

# **НАУКОВІ НОТАТКИ**

**Міжвузівський збірник  
(за галузями знань «Машинобудування та  
металообробка», «Інженерна механіка»,  
«Металургія та матеріалознавство»)**

**Випуск 44  
(січень-березень)  
2014**

**Луцьк 2014**

## РЕДАКЦІЙНА РАДА

Божидарнік В.В., ректор, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Заболотний О.В., декан ТФ, Луцький НТУ, к.т.н., доцент; Пустюльга С.І., декан МБФ, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Рудь В.Д., зав. кафедри, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Шваб'юк В.І., керівник відділу, Луцький НТУ, д.т.н., професор.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Рудь В.Д., зав. кафедри, професор, д.т.н., Луцький НТУ (відповідальний редактор); Пустюльга С.І., професор, д.т.н., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Заболотний О.В., доц., к.т.н., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Гулієва Н.М., асистент, Луцький НТУ (відповідальний секретар); Бобир М.І., директор інституту, професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Божидарнік В.В., ректор, проф., д.т.н., Луцький НТУ; Гавриш А.П., професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Гевко Б.М., зав. кафедри, професор, д.т.н., Тернопільський НТУ; Лотиш В.В., доц., к.т.н., Луцький НТУ; Майстренко А.Л., зав. відділом, член-кореспондент НАН України, д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів; Максимович В.М., зав. кафедри, професор, д.ф.-м.н., Луцький НТУ; Пальчевський Б.О., зав. кафедри, професор д.т.н., Луцький НТУ; Петраков Ю.В., зав. кафедри, професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Петровський В.Я., зав. відділом, проф., д.т.н., Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Повстяной О.Ю., доц. к.т.н., Луцький НТУ; Струтинський В.Б., зав. кафедри, професор, д.т.н., НТУ України "КПІ"; Шваб'юк В.І., зав. відділом, професор, д.т.н., Луцький НТУ; Штерн М.Б., зав. відділом, член-кореспондент НАН України, с.н.с., д.т.н., Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Ярошевич М.П., зав. кафедри, професор, д.т.н., Луцький НТУ.

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 9 від 24.04.2014 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:  
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

**ISSN: 978-617-672-039-3**

## ШАНОВНІ ДОПISУВАЧІ, КОЛЕГИ!

Постановою президії ВАК України від 10.02.2010р №1-05/1 затверджено Міжвузівський збірник наукових праць «НАУКОВІ НОТАТКИ», що видається Луцьким національним технічним університетом як наукове фахове видання України.

Тематична спрямованість збірника – висвітлення досягнень співробітників вищої школи та наукових установ України в розробках теоретичного та експериментального спрямування за галузями знань «Машинобудування та металообробка» і «Інженерне матеріалознавство».

Із зазначених галузей знань друкуються статті українською, англійською або російською мовами.

Довідки за тел. (0332) 26-25-19 e-mail: [notatki@meta.ua](mailto:notatki@meta.ua)

Наша адреса:

43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

Луцький національний технічний університет,  
редакція міжвузівського збірника “Наукові нотатки”

*З повагою,*

*Голова редакційної ради,  
ректор Луцький НТУ, професор*

*В. В. Божидарнік*

*Відповідальний редактор,  
професор Луцький НТУ*

*В.Д.Рудь*

Ціна договірна

## **Колектив авторів**

**Наукові нотатки**

**Міжвузівський збірник**

**(за галузями знань «Машинобудування та металообробка»,  
«Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»)**

Комп'ютерний набір та верстка: Н.М. Гулієва  
Редактор: в авторській редакції

Наклад **300 прим. Зам. № 51.**

Адреса редакції: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56.

Редакційно-видавничий відділ  
Луцького національного технічного університету  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.  
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123  
від 28.07.2011 р.



## ЗМІСТ

<b>Зміст</b> .....	4
<b>Алексеевко В.Н., Жиленко О.Б.</b> Перепрофилирование торговых зданий южного берега Крыма в офисные центры с жилыми помещениями .....	6
<b>Бондаренко А.Ю., Финкельштейн В.Б., Еремина Е.Ф.</b> Инструмент для магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов .....	11
<b>Букетов А.В., Браїло М.В., Алексенко В.Л., Овдій В.М.</b> Визначення оптимального вмісту двокомпонентного наповнювача методом математичного планування експерименту .....	18
<b>Буюкли И.М., Колесник В.М.</b> Разработка нового способа и инструмента для хонингования глухих отверстий .....	28
<b>Вісін О.О.</b> Вимоги безпеки до технологічних процесів при термічній обробці металів .....	33
<b>Габрусев Г.В.</b> Методика розв'язання задач термопружності для трансверсально ізотропного шару із концентричними коловими лініями розділу граничних умов .....	39
<b>Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю.</b> Тонке алмазне шліфування деталей тертя з композитів на основі алюмінію для поліграфічних машин .....	47
<b>Гевко І.Б., Тарасюк Ю.М., Клендій В.М.</b> Обґрунтування параметрів гвинтових завантажувачів .....	57
<b>Григор'єва Н.С.</b> Структуризація складальних модулів .....	63
<b>Гуда О.В.</b> Виведення рівнянь руху та розрахунків власних частот транслопних пластин з урахуванням поперечного зсуву, деформацій поперечного обтиснення та поперечного нормального напруження .....	69
<b>Гулієва Н.М.</b> Хімічний аналіз та фізичні властивості природного матеріалу – сапоніту.....	78
<b>Делявський М.В., Здолбіцька Н.В., Здолбіцький А.П.</b> Математичне моделювання напружено-деформованого стану тонких ортотропних плит .....	83
<b>Денисюк В.Ю., Заблоцький В.Ю., Лапченко Ю.С.</b> Практична реалізація методики пришвидшеного налагодження багатошпindelних токарних автоматів в умовах багатомономенклатурного підшипникового виробництва .....	88
<b>Добровольська Л.Н., Грицюк І.В., Собчук Д.С.</b> Аналіз експлуатаційної надійності автономних електростанцій з двигунами внутрішнього згорання .....	94
<b>Дячун А.Є., Тарасюк Ю.М., Клендій В.М., Босюк П.В., Кучвара І.М.</b> Морфологічний синтез пристроїв для заміру конструктивних параметрів шнека .....	98
<b>Заболотний О.В., Воїнков Д.О.</b> Розробка та виготовлення оригінальних конструкцій автомобільних дисків .....	104
<b>Залета О.М.</b> Аналіз системи подачі стрічкових матеріалів в машинах для пакування в м'яку тару та розрахунку параметрів її роботи .....	114
<b>Зубовецька Н.Т.</b> Високопродуктивна та високошвидкісна обробка на верстатах.....	119
<b>Карташов В.В.</b> Дослідження дисперснонаповнених епоксикомпозитів сформованих у змінному магнітному полі .....	124
<b>Кислюк Д.Я.</b> Вплив попереднього напруження зтяжки на перерозподіл зусиль в двохшарнірних залізобетонних арках при повторних навантаженнях .....	131
<b>Кіркєва О.Г., Штерн М.Б.</b> Визначення пластичного потенціалу пористих середовищ методом обчислювального експерименту .....	137
<b>Крисак Ф.М.</b> Особливості отримання і оптимізації впливу тонких водяних струменів високого тиску на процес миття рослинної сировини .....	145
<b>Кузьмов А.В.</b> Моделювання вдавлювання сферичного індентора в зворотно стисливий матеріал з розподіленими дефектами .....	149
<b>Кустов В.В., Маковійчук М.В., Роп'як Л.Я.</b> Дослідження руху та нагрівання частинок порошку в процесі наплення композиційних покриттів електродуговим методом .....	154
<b>Ляшук О.Л.</b> Дослідження динамічного процесу транспортування сипких матеріалів .....	164
<b>Мандрик О.М.</b> Оцінювання впливів на навколишнє середовище при транспортуванні природного газу .....	169
<b>Марчук В.І., Равенець Л.М.</b> Моделювання віброакустичних характеристик роликотідишпінника .....	174
<b>Михайлюк Ю.Д.</b> Механізм і фактори утворення оксидів нітрогену і карбону при згоранні природних газів .....	179
<b>Михалевич В.Т.</b> Кореляція систематичних та випадкових чинників у системах активного контролю розмірів деталей .....	184

<i>Мороз С.А., Пташенчук В.В.</i> Дослідження впливу технологічних факторів на якість поверхні для операції алмазного вигладжування .....	189
<i>Окрепкий Б.С., Мигович Ф.М.</i> Задача теплопровідності для системи двох контактуючих шарів .....	194
<i>Окрепкий Б.С., Новосад І.Я.</i> Задача теплопровідності для кругового циліндра з урахуванням теплообміну через тонкий проміжковий шар .....	200
<i>Пилипець М.І., Левкович М.Г., Кучвара І.М.</i> Технологічні передумови формування навивних гвинтових заготовок .....	208
<i>Полутренко М.С.</i> Екологічний аудит корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів .....	213
<i>Пристапуна С.О., Ткачук А.А., Дахнюк О.П.</i> Дослідження впливу технологічних факторів на енергоємність процесу різання .....	221
<i>Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Хомич А.А.</i> Дискретне формування еквідистант до моделей замкнених кривих апаратом числових послідовностей .....	227
<i>Ревенко В.П.</i> Визначення напружено-деформованого стану навантаженого на торцях двошарового циліндра .....	233
<i>Редько О.І.</i> Дослідження критичного вмісту наповнювачів різної природи для формування покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками .....	241
<i>Редько Р.Г., Редько О.І., Шанайда В.В., Склярів Р.А.</i> Дослідження пружно-силових характеристик затискних цанг, виготовлених за діючими та новими технологіями .....	249
<i>Ротко С.В., Мельничук І.І.</i> Захист залізобетону від корозії інтегральними капілярними системами на основі мінеральних і полімерних композицій .....	254
<i>Рудь Н., Гнускова Ю., Марчук О.</i> Індустріальні парки в Україні: доцільність створення .....	259
<i>Самчук В.П.</i> Згущення каркасів дискретно представлених поверхонь на основі перерозподілу формуючого навантаження .....	267
<i>Самчук Л.М.</i> Аналіз металографічного дослідження для системи Ti-C-ШХ15 отриманої методом СВС .....	273
<i>Сергеева К.О., Жук С.В., Грабівський К.П., Жердєв К.В.</i> Критерії оптимальності якості керування киснево-конвертерною плавкою .....	277
<i>Сітовський О.П., Деркач В.Л.</i> Визначення впливу передпускового підігріву на характеристику роботи двигуна з підвищеними обертами холостого ходу .....	282
<i>Ткачук В.В.</i> Інфрачервона спектроскопія біодизельних палив .....	286
<i>Шемет В.Я., Садовська Ю.В.</i> Халькогеніди у сучасному матеріалознавстві .....	291
<i>Шинкарчук Н.В.</i> Односторонній контакт ізотропної пластинки з коловим отвором і пружного диска .....	296

УДК 624.9

**В.Н. Алексеенко, О.Б. Жиленко**  
**ПЕРЕПРОФИЛИРОВАНИЕ ТОРГОВЫХ ЗДАНИЙ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА В**  
**ОФИСНЫЕ ЦЕНТРЫ С ЖИЛЫМИ ПОМЕЩЕНИЯМИ**

*Представлены основные результаты исследования технического состояния существующего торгового здания в г. Алуште. Предложены технические мероприятия по усилению несущих конструкций для реконструкции здания с последующей надстройкой.*

*Ключевые слова:* здание, усиление, реконструкция.

*Рис. 4. Лит. 5.*

**В.М. Алексеєнко, О.Б. Жиленко**  
**ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ ТОРГІВЕЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ ПІВДЕННОГО БЕРЕГА**  
**КРИМУ В ОФІСНІ ЦЕНТРИ З ЖИТЛОВИМИ ПРИМІЩЕННЯМИ**

*Представлені основні результати дослідження технічного стану існуючої торгівельної будівлі у м. Алушті. Запропоновані технічні заходи з посилення несучих конструкцій для реконструкції будівлі з подальшою надбудовою.*

*Ключові слова:* будівля, посилення, реконструкція.

**V.N. Alekseenko, O.B. Zhilenko**  
**CONVERSION OF COMMERCIAL BUILDINGS SOUTHERN COAST OF CRIMEA IN**  
**OFFICE CENTER WITH LIVING QUARTERS**

*The basic results of research of the technical state of the existing commercial building in Alushta were presented. Technical measures to strengthen structures for reconstruction of the building, followed by the superstructure were proposed.*

*Keywords:* building, strengthening, reconstruction.

Перепрофилирование торговых зданий, расположенных на прибрежных территориях Крыма в офисные центры с жилыми помещениями и последующей надстройкой является актуальной задачей. При этом оценка технического состояния несущих конструкций выявляет необходимость разработки инженерных решений по их усилению.

Строительная площадка находится в г. Алуште по ул. Партизанской.

Здание расположено на террасированном участке склона. Рельеф изменён в процессе освоения искусственными подрезками с закреплением склона выше здания подпорной стеной высотой ~ 3-3.5 м.

Строительная площадка находится в климатическом районе со следующими характеристиками [1]: по весу снегового покрова – 85 кг/м<sup>2</sup>; по ветровому давлению – 47 кг/м<sup>2</sup>. Глубина промерзания грунтов - 0,6 м.

Участок, на котором расположено здание, по карте А отнесён к району с расчётной сейсмичностью 8-баллов [2].

Здание одноэтажное с цокольным этажом (рис. 1), прямоугольное в плане. Габариты плана здания в 13,54x15,03 м (рис. 2, 3).



*Рис. 1. Перепрофилируемое здание в г. Алуште*

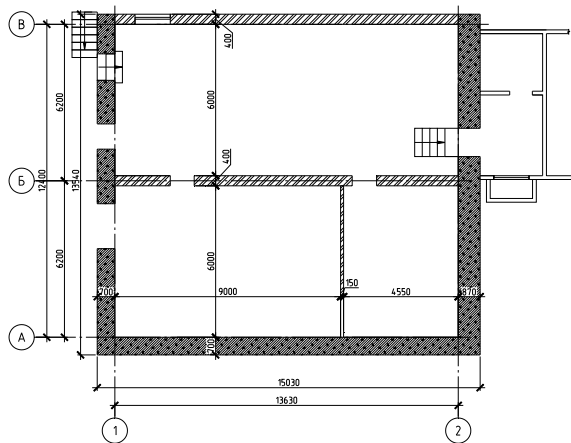


Рис. 2. План цокольного этажа

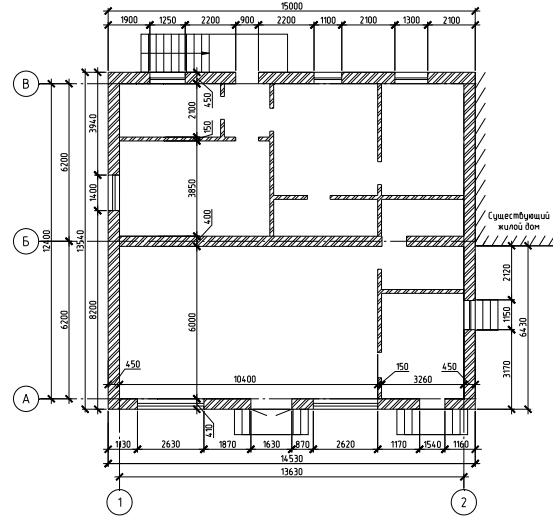


Рис. 3. План 1-го этажа

Конструктивная схема – бескаркасная с несущими продольными стенами, расположенными вдоль буквенных осей.

Обследуемый объект был построен в 1968 г. и соответствовал коду 1230.1 (магазин «Фрукты-овощи»), в настоящее время эксплуатируется в соответствии с кодом 1220.9 (Будівлі для конторських та адміністративних цілей інші) [3].

Фундаменты – ленточные бутобетонные. Глубина заложения и ширина сечения фундаментов несущих стен определена при помощи зондирования. Глубина заложения на 300 мм ниже уровня пола цокольного этажа. Ширина сечения фундамента наружных и внутренних несущих стен различная (600 мм и 700 мм). Прочность бетона бутобетонных фундаментов соответствует классу по прочности С 8/10 (В 10). Техническое состояние фундаментов – удовлетворительное. При этом необходимо отметить отсутствие гидроизоляции, что сопровождается фрагментарным увлажнением стен цокольного этажа.

Стены цокольного этажа (ширина 700 мм), контактирующие с грунтом, выполнены из монолитного бетона, установленны зоны стен из грунтобетона и шлакобетона на угольном шлаке. Прочность бетона зон из грунтобетона и шлакобетона достигает В 7.5 – С 8/10 (В 10). Прочность участков стены из бетона на морском песке и природной гальке достигает прочности В 12.5 – С 12/15 (В 15). Остальные стены цокольного этажа (ширина сечения стен – 400 мм) выполнены из мелкоштучных камней пильного известняка [4]. Камни Евпаторийского месторождения прочностью соответствующей марке М 15 и Альминского месторождения прочностью М 75 сложены на растворе соответствующей марке по прочности на сжатие М 50. Наблюдаются фрагменты кладки из глиняного кирпича прочностью соответствующей марке по прочности на сжатие М 75, кладочный раствор применен такой же прочности как и для кладки из мелкоштучных камней пильного известняка и соответствует классу по прочности на сжатие М 50. Техническое состояние стен цокольного этажа классифицируется как удовлетворительное. При этом следует подчеркнуть, что штукатурка требует капитального ремонта, отсутствие гидроизоляции способствует проявлению следов переувлажнения, стена здания примыкает к существующему жилому многоэтажному дому без антисейсмического шва. Конструкция пола цокольного этажа выполнена из монолитного железобетона армированного одной сеткой. При устройстве в цокольном этаже офисных помещений необходимо выполнить ремонт пола с устройством дополнительного армирования для предотвращения трещинообразования и разрушения будущего плиточного покрытия.

Стены надземного этажа (ширина сечения стен – 400 мм.) выполнены из мелкоштучных камней пильного известняка. Камни Евпаторийского месторождения прочностью соответствующей марке М 15 и Альминского месторождения прочностью М 75 сложены на растворе соответствующей марке по прочности на сжатие М 50. Наблюдаются фрагменты кладки из глиняного кирпича прочностью соответствующей марке по прочности на сжатие М 75, кладочный раствор применен такой же прочности, как и для кладки из мелкоштучных камней пильного известняка и соответствует классу по прочности на сжатие М 50. Перемычки дверных проемов в стенах надземного этажа выполнены из досок, оштукатуренных по сетке рабица, что не

рекомендується сучасними нормами будівництва в сейсмічних районах. Все такі перемички необхідно усилити. Технічне стан стін надземного етаж класифікується як задовільний, однак залізобетонні вертикальні сердечники, підвищують сейсмостійкість кладки стін, і залізобетонні антисейсмічні пояси, потрібні сучасними нормами, відсутні.

Перегородки виконані з цегли. Ширина сечення 120 мм. Прочність цегли відповідає марці по прочності на стиск М 75. Кладочний розчин – М 50. Армування і кріплення до перекриттів і стінам відсутні. Технічне стан – задовільний.

Перекриття над підвалом – монолітне залізобетонне. Висота сечення 160-180 мм. Бетон монолітного перекриття виконаний на морському піску. Прочність відповідає класу по прочності на стиск С 8/10 (В 10) – В 12.5. Армування робочими стержнями  $\varnothing$  16 АІІ з кроком 120-150 мм. Крок поперечної арматури до 450 мм. Корозія арматури на значній площі перекриття досягає 40%. Монолітне перекриття підвала в зоні вікна стіни по осі «В» опирається без перемички. Необхідно посилення зони опори або закладка вікна проема. Перекриття підвала в осях «А»-«Б»/«1»-«2» виконані з збірних багатопорожнистих плит перекриттів габаритними розмірами 1200х6300 мм. Технічне стан перекриття над підвалом з збірних залізобетонних багатопорожнистих плит перекриттів висотою сечення 220 мм в осях «А»-«Б»/«1»-«2» – задовільний. Технічне стан монолітного залізобетонного перекриття над підвалом в осях «Б»-«В»/«1»-«2» – не придатне для подальшої експлуатації без посилення.

Перекриття надземного етаж виконані з збірних залізобетонних багатопорожнистих плит перекриттів габаритними розмірами 1200х6300 мм, висотою сечення 220 мм. Монолітні вставки перекриття надземного етаж в результат багаторічного протікання даху пошкоджені корозією арматури (до 40%), спостерігається руйнування захисного шару. Все такі пошкоджені зони монолітних вставок слід видалити і виконати нові. Технічне стан перекриття надземного етаж з збірних залізобетонних багатопорожнистих плит перекриттів висотою сечення 220 мм задовільний.

Дах рулонний з теплоізоляцією - при реконструкції з надбудовою необхідний демонтаж.

По результатах обстеження для оцінки сейсмостійкості об'єкта виконаний аналіз просторової несучої системи будівлі в відповідності з вимогами норм проектування [2]. При цьому враховані прийняті архітектурно-планувальні і конструктивні рішення, параметри конструкцій і фактичні характеристики матеріалів.

На основі цього при розробці проекту реконструкції з надбудовою необхідно передбачити наступне.

Вікна проєми в підвалі в стіні усилити постановкою парних рамок з кутової сталі 100х100х7 по ГОСТ 8509-86, або закласти цегляною кладкою з каменів маркі по прочності на стиск М75 на цементно-піщаному розчині маркі на стиск М50.

Перекриття підвала в осях «А»-«Б»/«1»-«2» усилити постановкою балок (вдоль цифрових осей) в середині прольоту з спарених швеллерів №20 (по ГОСТ 8240-89), на металевих стійках і власних залізобетонних фундаментах з кроком від 3.5 до 4.0 м (Рис. 4). Таким чином, буде не тільки посилено перекриття, не придатне для подальшої експлуатації, але і значно розвантажено фундаменти стін по осях «Б» і «В». Для вирівнювання тисків під існуючими фундаментами, а також не допущення нерівномірних осадків будівлі при реконструкції з надбудовою мансарди рекомендується встановити аналогічну стовпочно-балочну систему (Рис. 4) під плитами перекриття підвала в осях «А»-«Б»/«1»-«2». При реалізації рекомендуваного технічного рішення будуть зменшені навантаження від власного ваги перекриття підвала, перегородок надземного етаж і корисної навантаження надземного етаж на несучі стіни підвала і відповідно фундаменти несучих стін в два рази. Це дозволить виконати надбудову мансардного етаж практично без збільшення гравітаційної складової навантаження на основи існуючих фундаментів. Таким чином уникнути ризику нерівномірних осадків існуючого будівлі. І не вносити додаткових силових факторів в існуючу складну статичну систему, створену обстежувані об'єктом і сусіднім близько розташований без антисейсмічного шва багатопверховим житловим будівлі.

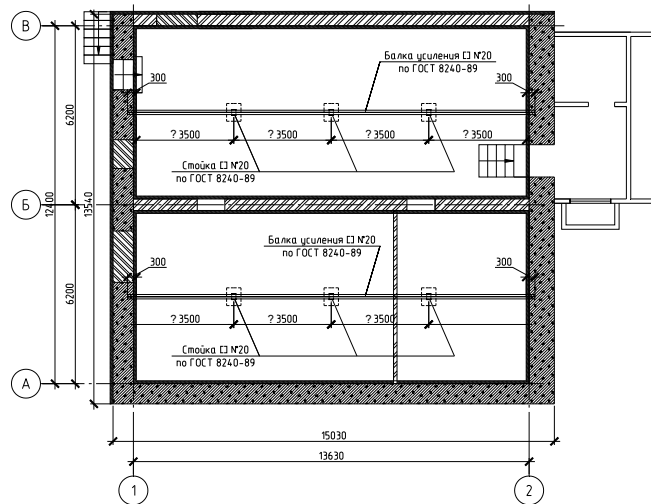


Рис. 4. Схема расположения стоечно-балочной системы в цокольном этаже

Поскольку стены здания и сборные железобетонные перекрытия не имеют антисейсмического конструктивного вооружения, регламентируемого нормами [2, п.п. 3.3.2, 3.10.9], необходимо выполнить эквивалентную этому замену. Наиболее экономичным решением в данной ситуации является устройство по стенам двухсторонних торкретбетонных армированных рубашек толщиной сечения 50 мм и антисейсмического пояса из стального прокатного швеллера. Такое усиление стен позволит решить несколько задач:

- устранил накопленные дефекты кладки стен (пустошовку, раковины, зоны размораживания поверхностных слоев и т.п.);
- послужит каменной кладке надёжной железобетонной обоймой, повысив тем самым её несущую способность и, следовательно, обеспечит возможность восприятия дополнительных нагрузок от надстройки;
- стянутые стальными шпильками между собой через стену швеллера, во-первых, будут работать аналогично антисейсмическому поясу, во-вторых, увеличат площадку опирания плит покрытий.

Сопряженные с обрезами фундаментов рубашки стен значительно повысят жёсткость здания при восприятии горизонтальных нагрузок, в т. ч. сейсмических.

Железобетонный козырёк (консольный элемент) над входом в стене по оси «А» - обрезать угло-шлифовальной машиной с абразивным кругом без нарушения целостности балочного элемента козырька находящегося в кладке.

Оконные проемы надземного этажа усилить постановкой стальных стоек.

Наружную лестницу на мансардный этаж выполнить на собственных стальных опорах у стены по оси «А».

Дверные и оконные проемы надземного этажа с перемычками из древесины усилить постановкой парных рамок из угловой стали.

Демонтировать элементы мягкой кровли, прочистить дефектные швы между плитами покрытия и зачеканить их мелкозернистым бетоном класса С 12/15.

Связать многпустотные плиты покрытия между собой при помощи внутренних анкеров из стержней арматурного проката  $\varnothing 12$  А 400С, замоноличенных бетоном С 12/15 в пустоты плит на стене по оси «Б».

Мансардный этаж устраивать с возможностью прохода вдоль стены смежного жилого дома для обслуживания газопровода. В надстраиваемом мансардном этаже необходимо предусмотреть облегчённые полы и перегородки.

#### Выводы:

1. С учетом сложившегося в курортных городах и поселках Крыма дефицита офисных помещений, а также неуклонно растущей с годами сезонной потребности в жилых помещениях, целесообразно перепрофилирование ряда торговых зданий, построенных в прошлом веке и не соответствующих предъявляемым к объектам торговли современным технологическим и эстетическим требованиям.

2. Снижение расчетной нагрузки на перекрытия (при перепрофилировании здания с изменением его функционального назначения) как правило выявляет запасы несущей способности грунтов оснований, позволяющих выполнить надстройку без усиления фундаментов.

3. При принятии решения о надстройке возникает необходимость решения технических проблем связанных с увеличением сейсмовооруженности здания в целом, а также весьма бережного отношения к недопущению неравномерных осадок фундаментов, даже при имеющихся солидных расчетных запасах несущей способности грунтов оснований.

1. ДБН В. 1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. К.: Мінбуд України. 2006. – 60 с.
2. ДБН В.1.1-12:2006. Строительство в сейсмических районах Украины. К.: Мінбуд України. 2006, – 49 с.
3. Державний класифікатор будівель та споруд ДК 018-2000, затвердженим наказом Держстандарту України від 17.08.2000 N 507.
4. ДБН В.1.1-1-94 «Проектирование и строительство гражданских зданий из блоков и камней пыльных известняков крымских месторождений в сейсмических районах», КиевЗНИИЭП, К.: 1995, – 36 с.
5. Алексеенко В.Н., Жиленко О.Б. Техническое заключение по результатам обследования несущих конструкций нежилого здания с разработкой рекомендаций по реконструкции с надстройкой по адресу: г. Алушта, ул. Партизанская, 23. / НПП Южсейсмострой – Симферополь, 2013 г., – 58 с.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2013.

УДК 621.318

**А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, Е.Ф. Яремина**  
*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*  
**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ ВМЯТИН В  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ**

*В данной статье показано использование конкретной конструкции для устранения вмятин в кузовах автомобилей. Предлагаемый инструмент включает прямоугольный плоский индуктор с продольными прорезями, экран и листовую заготовку, в которой имеется вмятина, подлежащая устранению. Проведен анализ электромагнитных процессов в инструменте силового магнитно-импульсного воздействия. Показано, что для более эффективного подавления магнитного давления необходимо не только увеличение количества вырезов, но и одновременное увеличение общей ширины токопроводов.*

*Ключевые слова:* индукторная система, магнитно-импульсная рихтовка, плоский индуктор с продольными прорезями.

*Рис. 4. Форм. 4. Лит. 8.*

**О.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, О.Ф. Єрьоміна**  
**ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ ВМ'ЯТИН У  
МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТЯХ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ**

*У даній статті показано використання конкретної конструкції для усунення вмятин в кузовах автомобілів. Пропонований інструмент включає прямокутний плоский індуктор з поздовжніми прорізами, екран і листову заготовку, в якій є вмятина, що підлягає усуненню. Проведено аналіз електромагнітних процесів в інструменті силового магнітно-імпульсного впливу. Показано, що для більш ефективного подавлення магнітного тиску необхідно не тільки збільшення кількості вирізів, а й одночасне збільшення загальної ширини струмопроводів*

*Ключові слова:* індукторна система, магнітно-імпульсне рихтування, плоский індуктор з поздовжніми прорізами.

**A.Yu. Bondarenko, V.B. Finkelstein, E.F. Yeryomina**  
**TOOL FOR MAGNETIC PULSE STRAIGHTENING NICKS IN METAL COATINGS OF CAR  
BODIES**

*This article shows use a particular design to remove dents in the bodywork of car. This tool comprises a rectangular flat inductor with slits and the sheet metal in which there is a dent to be eliminated. The analysis of electromagnetic processes in the tool magnetic pulse effects. It is shown that the presence of an appropriate amount of cutouts allow initiate attractive forces with amplitudes sufficient to counter the "scattered" forces of the magnetic pressure, repulsive workpiece from the inductor. The concrete calculation tasks and the distributions of the tangential component of the magnetic field on the surface of the screen and a workpiece for current lead with one and two notches of varying size in the central part, and also for continuous electrical pathway.*

*Keywords:* induction system, magnetoimpuls straightening, flat inductor with slits.

**Введение.** В настоящее время нередко мы сталкиваемся с проблемой появления вмятин различной формы и размеров на металлических кузовах транспортных средств. Как часто бывает, традиционная рихтовка с внутренней стороны кузовной обшивки невозможна из-за отсутствия доступа [1]. Прогрессивные магнитно-импульсные методы притяжения заданных участков листовых металлов, позволяющих осуществлять операции рихтовки с внешней стороны автомобильного кузова без какого-либо механического контакта с возможным сохранением защитного лакокрасочного покрытия [2,3,4], являются достаточно актуальными в области автомобильной и авиа- промышленности.

Настоящая работа посвящена анализу электромагнитных процессов в одном из вариантов конструктивного исполнения инструмента силового магнитно-импульсного воздействия (индукторной системы), предназначенного для рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов, обшивках летательных аппаратов, и др. [5].

**Цель работы.** Провести анализ электромагнитных процессов в инструменте силового магнитно-импульсного воздействия, предназначенного для рихтовки вмятин в металлических покрытиях транспортных средств.

**Работа инструмента.** Конструктивно, предлагаемый инструмент включает прямоугольный плоский индуктор с продольными прорезями (схематически показан на рис. 1а), экран и листовую заготовку, в которой имеется вмятина, подлежащая устранению.



Все три составляющие укладываются параллельными слоями: экран – индуктор – листовая заготовка, которая размещается так, чтобы вмятина находилась в рабочей зоне системы.

Особенность действенности таких систем заключается в том, что воздействие на обрабатываемый металл и его движение происходит по направлению к индукторам – источникам магнитных полей. Математически это означает: вектор действующей силы совпадает с вектором внешней нормали к поверхности листового металла.

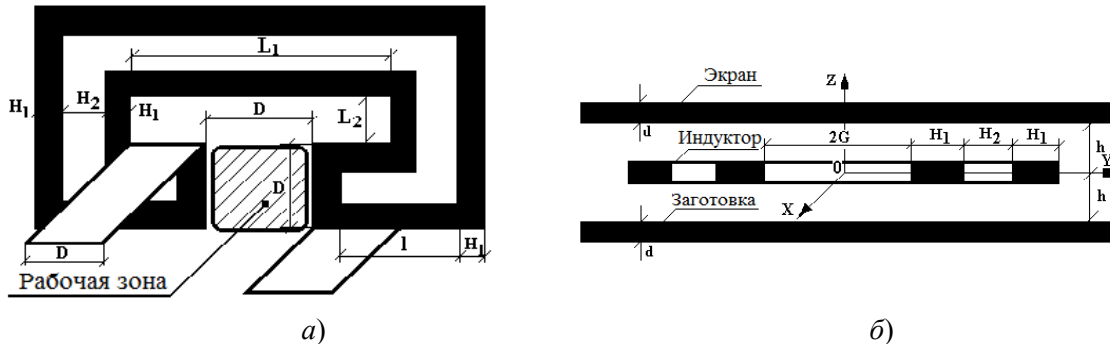


Рис. 1. Инструмент магнитно-импульсной рихтовки, принцип действия которого предполагает притяжение заданного участка листового металла: а) схематическое изображение; б) расчётная модель

Принцип действия предлагаемой индукторной системы состоит в следующем.

Протекание тока собственно в индукторе возбуждает вихревые токи в листовых металлах (один из них экран, другой – заготовка с вмятиной). Индуцированные токи в экране и заготовке текут в одном направлении. Они должны притягиваться друг к другу. Соответственно, если вмятину расположить в рабочей зоне, показанной на рис. 1а, силовое взаимодействие указанных токов позволит притянуть её к поверхности индуктора, то есть решить поставленную задачу по устранению вмятины.

Продольные прорезы в токопроводе индуктора должны обеспечить нейтрализацию сил магнитно-импульсного отталкивания его от заготовки с вмятиной. Как указывалось выше, токи, индуцированные в экране и листовой заготовке, текут в одном направлении. В зоне прорезей эти токи должны притягиваться друг к другу, противодействуя отталкиванию, причиной которого является возбуждение сил магнитного давления на листовый металл заготовки с вмятиной со стороны поля индуктора.

**Результаты исследований.** Для анализа электромагнитных процессов примем расчётную модель в декартовой прямоугольной системе координат (см. рис. 1б), соответствующую поперечным сечениям системы в ортогональных направлениях. Размер  $2G$  на рис. 1б может соответствовать размерам  $L_1$  или  $L_2$  на рис. 1а.

Для решения задачи примем следующие допущения.

- Имеет место геометрическая симметрия системы относительно координатных плоскостей  $XOY$  и  $ZOX$ .
- Экран и заготовка – одинаковые листовые металлы достаточно больших поперечных размеров.
- По токопроводу с внутренним разрезом шириной  $H_2$  течёт ток  $I(t)$ , его направления в ветвях слева и справа относительно плоскости  $ZOX$  (соответственно рис. 1б) – противоположны.
- Вдоль оси абсцисс система обладает достаточно большой протяжённостью, так что

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0.$$

- Толщина токопроводов пренебрежимо мала.
- Расстояния от индуктора до поверхностей экрана и заготовки –  $h$ , а также толщины экрана и заготовки –  $d$  много меньше всех характерных размеров системы, то есть

$$\frac{h}{b} \ll 1, \quad \frac{d}{b} \ll 1 \quad (\text{наибольший размер в поперечном направлении } b = 2 \cdot (2 \cdot H_1 + H_2) + G).$$

- Задача решается в приближении плоских волн, для которого справедлива прямо пропорциональная связь между касательными составляющими векторов электромагнитного поля на поверхности проводника, отделяющего источник поля от свободного полупространства [6]:

$$H_{\tau} = \pm(\gamma \cdot d) \cdot E_{\tau},$$

где  $\gamma$ ,  $d$  – электропроводность и толщина проводника.

Решение поставленной задачи можно провести с помощью известных методов интегрирования уравнений Максвелла аналогично тому, как это было сделано для инструментов магнитно-импульсной рихтовки с одновитковыми индукторными системами цилиндрической геометрии в работах [7,8].

Опуская подробности математических преобразований, выполненных с привлечением интегральных преобразований, запишем формулу для изображения напряжённости возбуждаемого магнитного поля в и пространствах на поверхностях проводящих плоскостей, ограничивающих рассматриваемую индукторную систему снизу и сверху.

$$H_y(p, \lambda, \pm h) = - \frac{p \cdot j(p)}{\left( p + \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \text{th}(\lambda h) \right)} \cdot \frac{f(\lambda)}{2 \cdot \text{ch}(\lambda h)}, \quad (1)$$

где  $j(p) = \frac{I(p)}{2 \cdot H_1}$ ,  $I(p) \leftrightarrow I(t)$  – ток в индукторе,

$\lambda$  – параметр интегрального преобразования Фурье,

$f(\lambda)$  – Фурье-образ функции, описывающей поперечное распределение плотности тока в индукторе,

$$f(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\lambda}{2} \cdot H_1\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda}{2} \cdot (2G + 2H_1 + H_2)\right) \cdot \cos\left(\frac{\lambda}{2} \cdot (H_1 + H_2)\right).$$

Достоверность полученного результата (1) легко проверить предельными переходами к физически прозрачным ситуациям, когда  $h \rightarrow 0, \infty$ .

В первом случае, вследствие достаточной близости проводников к индуктору на поверхности каждого из них распределение касательной составляющей напряжённости должно полностью повторять распределение плотности сторонних токов в индукторе с половинной амплитудой.

Во второй предельной ситуации, вследствие достаточной удалённости проводников очевидно, что поле на их поверхностях должно стремиться к нулю.

Итак,

$$\lim_{h \rightarrow 0} H_y(p, \lambda, \pm h) = - \lim_{h \rightarrow 0} \frac{p \cdot j(p)}{\left( p + \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \text{th}(\lambda h) \right)} \cdot \frac{f(\lambda)}{2 \cdot \text{ch}(\lambda h)} = - \frac{j(p)}{2} \cdot f(\lambda).$$

Поскольку  $f(\lambda)$  есть строгий Фурье-образ функции, описывающей поперечное распределение плотности токов в индукторе, следовательно, и найденный предел будет соответствовать тому же пространственному распределению. Амплитуда поля будет равна половинной амплитуде плотности тока в индукторе, как и следовало ожидать из закона полного тока.

Далее, как и указывалось ранее,

$$\lim_{h \rightarrow \infty} H_y(p, \lambda, \pm h) = - \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{p \cdot j(p)}{\left( p + \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \text{th}(\lambda h) \right)} \cdot \frac{f(\lambda)}{2 \cdot \text{ch}(\lambda h)} \approx 0.$$

Таким образом, выполненные предельные переходы подтвердили достоверность найденного результата (1).

Перейдём в пространство оригиналов и запишем выражение для касательной составляющей напряжённости магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки, пригодное для проведения практических вычислений.

$$H_y(t, y, \pm h) = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \left( \frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{-\beta(\lambda)t} \right) \cdot \frac{f(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} \cdot \sin(\lambda y) \right] \cdot d\lambda, \quad (2)$$

$$\text{где } \beta(\lambda) = \frac{\lambda}{\mu_0 \gamma d} \cdot \operatorname{th}(\lambda h).$$

**Пример расчета.** В токопроводе индуктора протекает ток, плотность которого равна  $j(t) \approx j_m \cdot \sin(\omega t)$ , частота  $\omega = \pi \cdot 10^4$  Гц (5 кГц).

Форма индуктора и индукторной системы соответствуют схематическим изображениям на рис. 1а,б.

Ширина участков токопроводов и внутреннего разреза варьируются  $H_2 = k \cdot H_1$ ,  $k \in [0.5, 1]$ , общая ширина токопровода зафиксирована:  $2H_1 + H_2 \approx 0.02$  м.

Расстояния от токопроводов до экрана и заготовки одинаковы и равны  $h = 0.001$  м.

Расстояние от геометрического центра системы до токопроводов  $G = 0.005$  м,  $0.03$  м. Данные цифры соответствуют сечениям во взаимно ортогональных направлениях соответственно рис. 1.

Заготовка и экран выполнены из листовой стали толщиной  $d = 0.001$  м ( $\gamma = 0.6 \cdot 10^7$   $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ ).

Для момента времени, соответствующему первому максимуму возбуждающего тока, свёртка функций в (2) принимает вид:

$$\left( \frac{dj(t)}{dt} \cdot e^{-\beta(\lambda)t} \right) = \frac{1 - \beta_1(\lambda) \cdot e^{-\beta_1(\lambda) \frac{\pi}{2}}}{1 + \beta_1^2(\lambda)} = g(\lambda), \quad (3)$$

$$\text{где } \beta_1(\lambda) = \frac{\beta(\lambda)}{\omega}.$$

В окончательном варианте формула для вычисления касательной компоненты напряжённости магнитного поля на поверхностях экрана и заготовки (естественно, что они зеркально симметричны) в рассматриваемой индукторной системе запишется как:

$$H_y(t = \frac{\pi}{2\omega}, y, z = \pm h) = -\frac{4}{\pi} j_m \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda)}{\operatorname{ch}(\lambda h)} \cdot g(\lambda) \cdot \sin(\lambda y) \cdot dy. \quad (4)$$

Результаты расчётов, сформулированных в терминах относительных напряжённостей приведены на рис. 2 – 4.

$$H_0 = \left| \frac{\pi}{4 j_m} H_y(t = \frac{\pi}{2\omega}, y, z = \pm h) \right|,$$

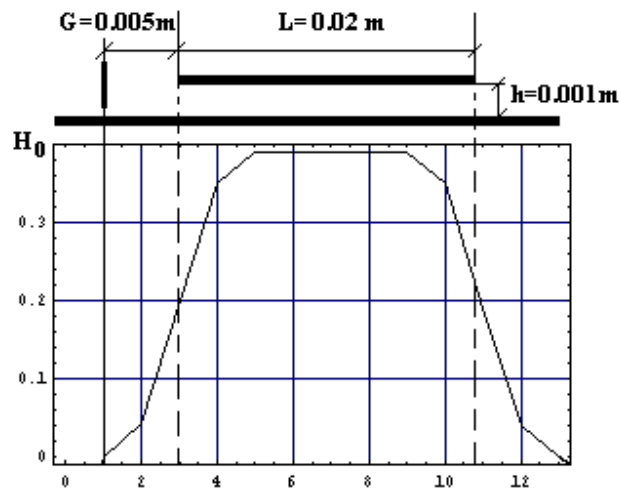
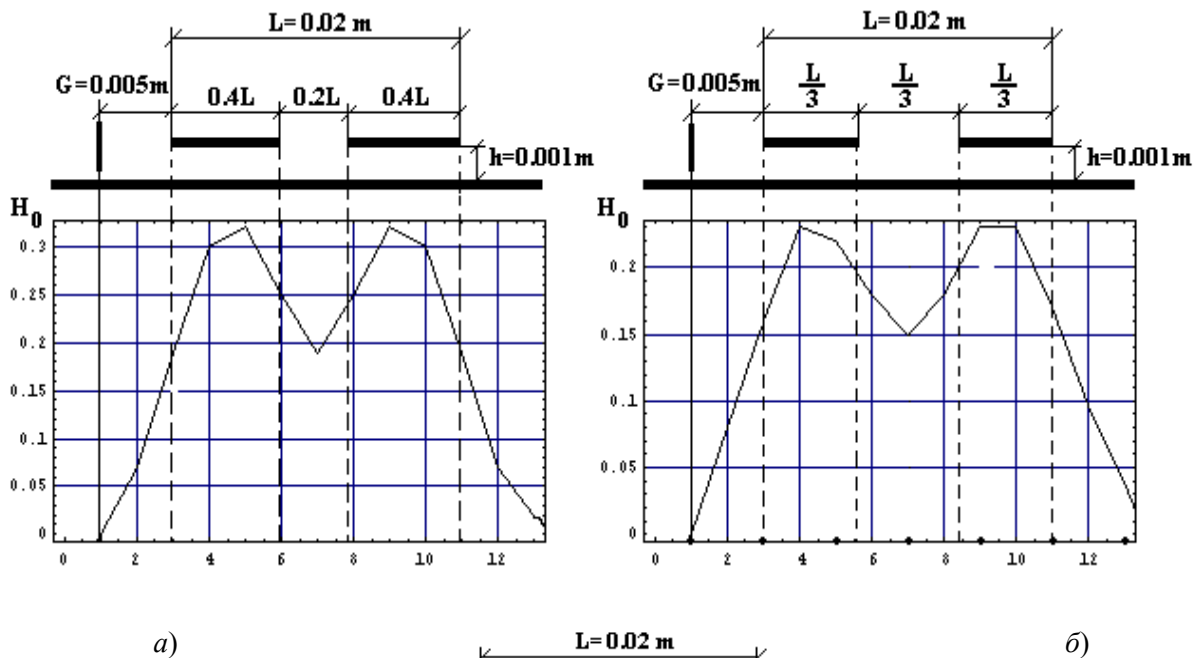
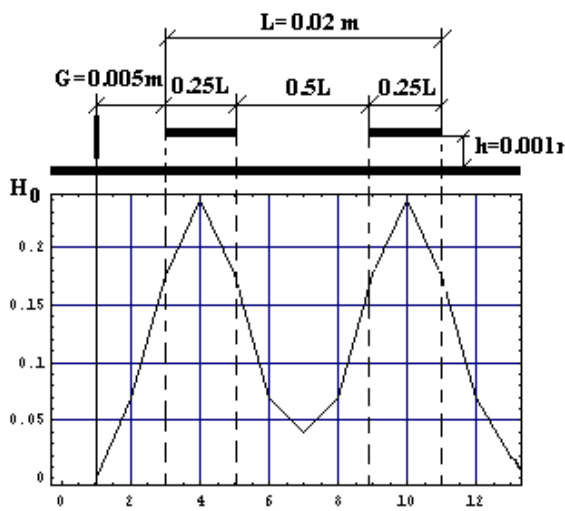


Рис. 2. Распределение касательной компоненты напряжённости магнитного поля по поверхностям экрана и заготовки для сплошного токопровода



a)

б)



в)

Рис. 3. Распределение касательной компоненты напряжённости магнитного поля по поверхностям экрана и заготовки для токопровода с одним вырезом различной величины в центральной его части

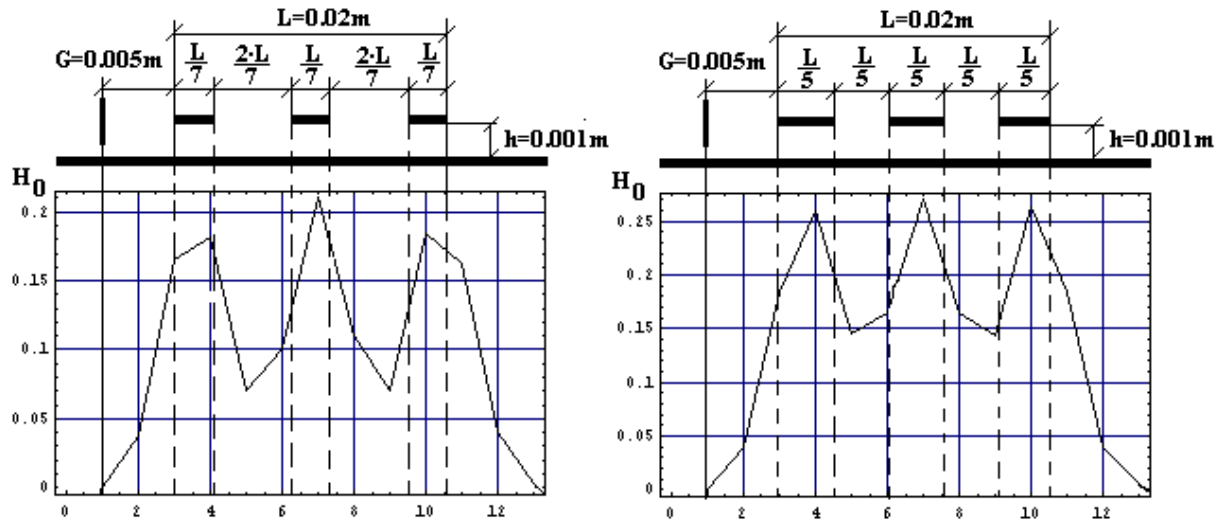


Рис. 4. Распределение касательной компоненты напряжённости магнитного поля по поверхностям экрана и заготовки для токопровода с двумя вырезами различной величины в центральной его части

Анализ расчётных результатов показал следующее:

- Величины токов, возбуждаемых на поверхностях экрана и заготовки за внешними краями индуктора, практически одинаковы для всех рассмотренных конструкций основного токопровода и составляют не более  $\sim (0.02 - 0.04) \cdot I_m$ , то есть 2-4% от общего тока индуктора.
- Величины токов, возбуждаемых в областях, соответствующих продольным вырезам в токопроводах, несколько выше, чем на внешних краях, до  $\sim 0.13 \cdot I_m$  (13% от общего тока индуктора). Их амплитуды зависят от величины разреза.
- Существенное повышение суммарной амплитуды токов, индуцированных в центральных зонах, имеет место при увеличении количества вырезов, причём их размер практически не оказывает влияния на количественные характеристики процесса.
- Если в первой рассмотренной конструкции токопровода без выреза магнитному давлению на заготовку не препятствовали практически никакие силы, то в системах с двумя вырезами такое противодействие будет иметь место за счёт взаимного притяжения одинаково направленных токов, индуцированных в экране и заготовке в областях, соответствующих вырезам в токопроводах.

**Выводы.** Полученные результаты показали, что

- для снижения амплитуд сил отталкивания заготовки от индуктора, последний должен выполняться с максимально допустимым количеством продольных вырезов при заданной общей ширине всего токопровода;
- в целом, для более эффективного подавления магнитного давления необходимо не только увеличение количества вырезов, но и одновременное увеличение общей ширины токопроводов. Последнее обстоятельство даст возможность снизить действующие силы отталкивания заготовки за счёт увеличения площади взаимодействия. Наличие соответствующего количества вырезов позволит возбудить силы притяжения с амплитудами, достаточными для противодействия «рассеянными» силам магнитного давления, отталкивающим заготовку от индуктора.

1. Бажинов А.В., Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. // Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - Харьков. - 2005. - Выпуск 16. - С. 349-353.
2. Meichtry R., Dent Removing Method and Device. International Patent Application WO2006/119661 A1, 2006.
3. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications. //Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2013. 213, PP. 444-452.

4. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V. Pulsed Electromagnetic Attraction of non-magnetic Sheet Metals. Applications. // Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2014. 214, PP. 390-401.
5. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. //Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков. – 2005. – Выпуск 16. – С. 349-353.
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. – 284 с.
7. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида. // Техническая электродинамика. 2010. №1. С. 9 – 14.
8. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals.//Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2014. № 214 (2). PP. 390–401.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.

А.В. Букетов<sup>1</sup>, М.В. Браїло<sup>1</sup>, В.Л. Алексенко<sup>1</sup>, В.М. Овдій<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Херсонська державна морська академія

<sup>2</sup>Херсонський державний університет

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВМІСТУ ДВОКОМПОНЕНТНОГО НАПОВНЮВАЧА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

*Методом математичного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у композитному матеріалі за властивостями руйнівних напружень та модуля пружності при згинанні і теплостійкості (за Мартенсом). Встановлено, що поєднання двох наповнювачів різної дисперсності покращує когезійні властивості матеріалів. Визначено, що для розробленої матриці на основі твердників ПЕПА (5 мас.ч.) і Telalit 410 (5 мас.ч.) у епоксидному олігомері CHS-Ероху 525 (100 мас.ч.) оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача становить: графіт АГ-1500 – 40...60 мас.ч. і перліт – 10...30 мас.ч.*

*Ключові слова:* епоксидний композит, математичне планування експерименту, полімер, властивості.

*Табл. 15. Форм. 12. Літ. 7.*

Букетов А.В., Браїло Н.В., В.Л. Алексенко, Овдей В.Н.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ДВОКОМПОНЕНТНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

*Методом математического планирования эксперимента определено оптимальное содержание двокомпонентного дисперсного наполнителя в композитном материале по свойствах разрушающих напряжений и модуля упругости при изгибе, а также теплостойкости (за Мартенсом). Установлено, что сочетание двух наполнителей различной дисперсности улучшает когезионные свойства материала. Определено, что для разработанной матрицы на основе отвердителей ПЕПА (5 мас.ч.) и Telalit 410 (5 мас.ч.) в эпоксидном олигомере CHS-Ероху 525 (100 мас.ч.), оптимальное содержание двокомпонентного наполнителя составляет: графит АГ-1500 – 40...60 мас.ч. и перлит – 10...20 мас.ч.*

*Ключевые слова:* эпоксидный композит, математическое планирование эксперимента, полимер, свойства.

A.V. Buketov, M.V. Brailo, V.L. Aleksenko, V.M. Ovdey

## DEFINITION OF THE OPTIMUM MAINTENANCE OF THE TWO DIFFERENT FILLER BY THE METHOD OF MATHEMATICAL PLANNING OF EXPERIMENT

*Mathematical planning method experiment determined optimal composition of the two different filler in the composite material for destructive stress properties, flexural modulus and heat resistance (Martens). The matrix of orthogonal central composite planning of experiment according to which 9 researches were conducted is made, each of which repeated three times for the purpose of an exception of system mistakes. The mathematical model  $y = f(x_1, x_2)$  is formulated in the form of the regression equation. For statistical analysis of the experimental results an inspection of reproduction of researches on Kokhren's criterion is carried out. The significance of the regression coefficients determined by Student's test. The adequacy of the resulting model is checked by Fisher. Based on experimental studies demonstrated that both factors are significant. It is determined that the union of two different fillers dispersion improves the cohesive properties of the materials. For developed matrix based PEPA (5 parts) and Telalit 410(5 parts) hardeners in epoxy oligomer CHS-Epoxy 525 (100 parts) optimum content of the two different filler is graphite AG – 1500 – 60 parts and perlite – 10...30 parts. Such a material has a destroying the bending stress –  $\sigma_b = 28,6...35,6$  MPa, elastic modulus –  $E = 5,4...6,2$  GPa and heat resistance (Martens) –  $T = 349...350$  K.*

*Keywords:* epoxy composite, mathematical planning of the experiment, polymer, properties.

**Вступ.** Важливою проблемою на сьогодні є формування конструкційних матеріалів з поліпшеними властивостями [1]. Водночас властивості матеріалів, у тому числі і полімерних, залежать від багатьох керованих і некерованих факторів, які визначають апріорною інформацією у вигляді результатів дослідження теоретичними та експериментальними методами. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є отримання необхідних даних при мінімальній кількості дослідів. Одним із варіантів вирішення даної задачі є використання методу математичного планування експерименту. Застосування математичної моделі дозволяє не тільки зменшити кількість необхідних дослідів, але й підвищити економічність при проведенні експерименту за рахунок зменшення матеріальних затрат і часу на їх проведення [2, 3].

Відомо [4], що одним із методів поліпшення властивостей композитних матеріалів (КМ) на основі епоксидної матриці є введення у зв'язувач різних за природою та дисперсністю наповнювачів. Це забезпечує створення матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Водночас дисперсність наповнювачів різної природи впливає на швидкість

перебігу процесів структуроутворення матеріалів при їх зшиванні та виникнення хімічних та фізичних зв'язків на межі поділу фаз «наповнювач – полімер» [5]. При цьому метод математичного планування експерименту дозволяє оптимізувати вміст декількох наповнювачів різної природи та дисперсності в епоксидному композиті за мінімальної кількості проведених експериментів [6].

**Мета роботи** – методом математичного планування експерименту встановити оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача різної фізичної природи і дисперсності для формування КМ з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

**Обговорення експериментальних результатів дослідження.** Використовуючи активний експеримент досліджували когезійні властивості КМ з двокомпонентним наповнювачем, що містить різні за природою та дисперсністю частки. Вміст двокомпонентного наповнювача у вигляді основних та додаткових часток вибрано на основі попередніх результатів досліджень когезійних властивостей КМ. У табл. 1 наведено основні діапазони вмісту інгредієнтів, які вводили у епоксидний зв'язувач для поліпшення руйнівних напружень при згинанні КМ. Це, зокрема: графіт антифрикційний марки АГ-1500 (ТУ 48-20-4-87) і перліт (ГОСТ 25226-96).

Таблиця 1. Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, $q$ , мас.ч.	Крок варіювання, $\Delta q$ , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
Основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500	$x_1$	50	10	40	50	60
Додатковий наповнювач – перліт	$x_2$	20	10	10	20	30

Відповідно до схеми планування експерименту було проведено 9 дослідів ( $N = 9$ ), кожний з яких повторювали тричі ( $p = 3$ ) з метою виключення системних помилок (табл. 2). Для того щоб матриця планування була ортогональною [7], вводили коректовані значеннями рівня  $x'$ , які обчислювали за формулою:

$$x'_i = (x_i)^2 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}{N}; \quad (1)$$

Розширена матриця планування повного факторного експерименту (ПФЕ) та його результати наведено у табл. 3.

Таблиця 2. Схема планування експерименту

Параметри	№ Дослід (u)	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x'_1 = x_1^2 - 0,67$	$x'_2 = x_2^2 - 0,67$	$x_1 x_2$
План ПФЕ ( $2^2$ )	1	1	-1	-1	0,33	0,33	+1
	2	1	+1	-1	0,33	0,33	-1
	3	1	-1	+1	0,33	0,33	-1
	4	1	+1	+1	0,33	0,33	+1
Нульова точка	5	1	0	0	-0,67	-0,67	0
Зіркові точки	6	1	+1	0	0,33	-0,67	0
	7	1	-1	0	0,33	-0,67	0
	8	1	0	+1	-0,67	0,33	0
	9	1	0	-1	-0,67	0,33	0
$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2$	9	6	6	2	2	4	



Таблиця 3. Результати дослідження руйнівних напружень та модуля пружності при згинанні і теплостійкості (за Мартенсом) КМ

№ досліджу	Вміст компонентів, $q$ , мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{32}$ , МПа	Модуль пружності при згинанні, $E$ , ГПа	Теплостійкість (за Мартенсом), $T$ , К
	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	40	10	25,2	3,9	338
2	60	10	35,6	5,4	349
3	40	30	28,7	4,9	346
4	60	30	28,6	5,6	349
5	50	20	37,5	5,0	349
6	60	20	29,0	6,2	350
7	40	20	27,5	4,8	350
8	50	30	30,5	4,3	350
9	50	10	18,0	4,1	351

Математичну модель  $y = f(x_1, x_2)$  формували у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (2)$$

Коефіцієнти регресії визначали за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_i y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (3)$$

Таблиця 4. Коефіцієнти рівняння регресії

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
31,09	1,97	1,5	0,43	-3,57	-2,63

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 31,09 + 1,97x_1 + 1,5x_2 + 0,43x_1^2 - 3,57x_2^2 - 2,63x_1x_2.$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} \leq G_{(0,05; f_1; f_2)} \quad (4)$$

де:  $S_{ui}^2$  – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів для  $m = 3$ ;

$m$  – кількість паралельних дослідів;

$S_{u \max}^2$  – найбільша з дисперсій у рядках плану;

Дисперсії адекватності визначали за формулою:

$$S_{ui}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m - 1}; \quad (5)$$

де:  $y_{im}$  - значення, отримане з кожного паралельного дослідів;

$\bar{y}_i$  - середнє значення величини  $y$ , отримане при паралельних дослідів.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

$$\sigma^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{N=9} \sigma^2\{y\}_i}{N(m-1)}; \quad (6)$$

$$\text{де } \sigma^2\{y\}_i = \sum_{i=1}^{m=3} (y_i - \bar{y}_i)^2;$$

$$\sigma^2\{y_{\text{сер}}\} = \frac{a^2\{y\}}{N}, \text{ або } S_{b_0}^2 = \frac{S_0^2}{N} \quad (7)$$

Значення дисперсій наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Значення дисперсій адекватності ( $S_{ui}^2$ ) і дисперсій відтворення ( $\sigma^2\{y\}_i$ )

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{u1}^2$	0,16	$\sigma^2\{y\}_1$	0,32
2	$S_{u2}^2$	0,21	$\sigma^2\{y\}_2$	0,42
3	$S_{u3}^2$	0,13	$\sigma^2\{y\}_3$	0,26
4	$S_{u4}^2$	0,31	$\sigma^2\{y\}_4$	0,62
5	$S_{u5}^2$	0,28	$\sigma^2\{y\}_5$	0,56
6	$S_{u6}^2$	0,13	$\sigma^2\{y\}_6$	0,26
7	$S_{u7}^2$	0,07	$\sigma^2\{y\}_7$	0,14
8	$S_{u8}^2$	0,09	$\sigma^2\{y\}_8$	0,18
9	$S_{u9}^2$	0,49	$\sigma^2\{y\}_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,37$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,21$$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5 %-ному рівні значущості:

$$G_{\text{розр}} = \frac{S_{u_{\text{max}}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}; \quad (8)$$

$$G_{\text{розр}} = \frac{0,49}{1,87} = 0,262$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [3] для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів:  $S_{u_{\text{max}}}^2 = 0,49$ .

Розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{\text{розр}} = 0,262$ .

Табличне значення критерію Кохрена:  $G_{\text{табл}} = 0,478$ .

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{\text{розр}} = 0,262 \leq G_{\text{табл}} = 0,478.$$

Надалі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 6).

Таблиця 6. Експериментальні результати дослідження руйнівних напружень при згинанні матеріалів

№ досліджу	Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{3z}$ , МПа			Середнє значення, $\sigma_{3z}$ , МПа
	1	2	3	
1	25,6	24,8	25,2	25,2
2	35,2	35,5	36,1	35,6
3	28,6	29,1	28,4	28,7
4	28,0	28,7	29,1	28,6
5	37,1	37,3	38,1	37,5
6	28,7	28,9	29,4	29,0
7	27,3	27,8	27,4	27,5
8	30,2	30,5	30,8	30,5
9	17,7	17,5	18,8	18,0

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 7) за формулою:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (9)$$

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стюдента [3, 7]. При цьому визначали табличний ( $t_m$ ) і розрахунковий критерій ( $t_p$ ) критерії Стюдента (табл. 7).

Залежно від ступенів вільності:  $f = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$  визначали табличне значення критерію Стюдента, яке становить  $t_T = 2,04$ .

Визначали розрахункові значення критерію Стюдента ( $t_p$ ) і значущість коефіцієнтів:  $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p} > t_T$ .

Причому:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}; \quad (10)$$

Таблиця 7. Дисперсії коефіцієнтів регресії ( $S_b^2$ ) і розрахункові значення критерію Стюдента ( $t_p$ )

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,023	$t_{0p}$	199,79
2	$S_{b_1}^2$	0,035	$t_{1p}$	10,37
3	$S_{b_2}^2$	0,035	$t_{2p}$	7,89
4	$S_{b_{11}}^2$	0,105	$t_{11p}$	1,34
5	$S_{b_{22}}^2$	0,105	$t_{22p}$	11,16
6	$S_{b_{12}}^2$	0,053	$t_{12p}$	11,43

Враховуючи те, що розрахункові значення критерію Стюдента  $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{22p}, t_{12p}$  є більшими від  $t_T$  вважали, що коефіцієнти рівняння регресії є значущими. Значення  $t_{11p}$  є меншим від  $t_T$ , тому коефіцієнт  $b_{11}$  не є значущим. В результаті відкидання незначущих коефіцієнтів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 31,09 + 1,97x_1 + 1,5x_2 - 3,57x_2^2 - 2,63x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3, 7]:

$$F_p = \frac{S_{u \max}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ao}; f_y)} \quad (11)$$

де  $S_{u \max}^2 = 0,49$  – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5);

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}{N}; \tag{12}$$

$S_y^2 = 0,21$  – дисперсія відтворення;

Тоді:  $F_p = 2,33$ .

$F_{(0,05; f_{ab}; f_u)}$  – табличне значення критерію Фішера при 5 %-ному рівні значущості ( $f_l = N - (k + 1) = 9 - (5 + 1) = 3, f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$ ). Тоді:  $F_{(l)} = 2,8$  [2, 7].

Розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (10). Можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

Отже, на основі проведених розрахунків можна стверджувати, що обидва фактори є важливими, тому що значення коефіцієнтів  $x_1$  і  $x_2$  є великими за абсолютною величиною. Однак, на основі результатів експериментальних досліджень (табл. 3) доведено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні КМ відзначається епоксидний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (50...60 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (10...20 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Аналогічно схемі розрахунків математичного планування експерименту за властивістю руйнівних напружень при згинанні, визначали адекватність композиції за властивостями модуля пружності при згинанні та теплостійкості (за Мартенсом). Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах та схема планування експерименту вибрано згідно табл. 1 і табл. 2.

При аналізі результатів дослідження модуля пружності при згинанні композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 8).

Таблиця 8. Коефіцієнти рівняння регресії для модуля пружності при згинанні

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
4,87	0,6	0,23	0,67	-0,63	-0,2

В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 4,87 + 0,6x_1 + 0,23x_2 + 0,67x_1^2 - 0,63x_2^2 - 0,2x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (5-7) наведено у табл. 9.

Таблиця 9. Значення дисперсії адекватності ( $S_u^2$ ) і дисперсії відтворення ( $\sigma^2(y)$ )

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{u1}^2$	0,04	$\sigma^2\{y\}_1$	0,32
2	$S_{u2}^2$	0,04	$\sigma^2\{y\}_2$	0,42
3	$S_{u3}^2$	0,04	$\sigma^2\{y\}_3$	0,26
4	$S_{u4}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_4$	0,62
5	$S_{u5}^2$	0,04	$\sigma^2\{y\}_5$	0,56
6	$S_{u6}^2$	0,07	$\sigma^2\{y\}_6$	0,26
7	$S_{u7}^2$	0,07	$\sigma^2\{y\}_7$	0,14
8	$S_{u8}^2$	0,01	$\sigma^2\{y\}_8$	0,18
9	$S_{u9}^2$	0,03	$\sigma^2\{y\}_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ii}^2 = 1,87$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,21$$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості визначали за формулою (8)

$$G_p = \frac{0,07}{0,37} = 0,189$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [7] для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів:  $S_{i \max}^2 = 0,07$ .

Розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,189$ .

Табличне значення критерію Кохрена:  $G_{табл} = 0,478$ .

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,262 \leq G_{табл} = 0,478$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 10).

Таблиця 10. Експериментальні результати дослідження модуля пружності при згинанні КМ

№ досліду	Модуль пружності при згинанні, Е, ГПа			Середнє значення, Е, ГПа
	1	2	3	
1	3,9	3,7	4,1	3,9
2	5,2	5,6	5,4	5,4
3	4,7	5,1	4,9	4,9
4	5,5	5,8	5,5	5,6
5	5,2	4,8	5,0	5,0
6	6,4	5,9	6,3	6,2
7	4,5	5,0	4,9	4,8
8	4,4	4,2	4,3	4,3
9	4,3	4,0	4,0	4,1

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 11) за формулами (9-10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить  $t_T = 2,04$  [3, 7]. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 11.

Таблиця 11. Дисперсії коефіцієнтів регресії ( $S_b^2$ ) і розрахункові значення критерію Стьюдента ( $t_p$ )

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,0046	$t_{0p}$	53,12
2	$S_{b_1}^2$	0,00068	$t_{1p}$	23,08
3	$S_{b_2}^2$	0,00068	$t_{2p}$	8,85
4	$S_{b_{11}}^2$	0,0021	$t_{11p}$	14,56
5	$S_{b_{22}}^2$	0,0021	$t_{22p}$	13,7
6	$S_{b_{12}}^2$	0,001	$t_{12p}$	6,25

Враховуючи те, що розрахункові значення критерію Стюдента  $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p}$  є більшими від  $t_T$  вважали, що коефіцієнти рівняння регресії є значущими. В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 4,87 + 0,6x_1 + 0,23x_2 + 0,67x_1^2 - 0,63x_2^2 - 0,2x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3, 7].

Розрахункове значення дисперсії адекватності:  $S_{u_{\max}}^2 = 0,07$  (табл. 9).

Дисперсія відтворення:  $S_y^2 = 0,04$ .

Тоді:  $F = 1,75$ .

$F_{(0,05; f_E; f_u)}$  – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ( $F_{(0)} = 3,6$ ).

Слід зазначити, що оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

На основі експериментальних досліджень доведено, що обидва фактори є значущими. При цьому встановлено (табл. 3), що максимальними показниками модуля пружності при згинанні має епоксидний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (60 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (20...30 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

При аналізі результатів дослідження теплостійкості (за Мартенсом) композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 12).

Таблиця 12. Коефіцієнти рівняння регресії для теплостійкості КМ

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
344,33	2,33	1,17	-3,0	-2,5	-2,0

В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 685,14 + 2,33x_1 + 1,17x_2 - 3,0x_1^2 - 2,5x_2^2 - 2,0x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (5-7) наведено у табл. 13.

Таблиця 13. Значення дисперсії адекватності ( $S_u^2$ ) і дисперсії відтворення ( $\sigma^2(y)$ )

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{u1}^2$	1	$\sigma^2\{y\}_1$	2
2	$S_{u2}^2$	1	$\sigma^2\{y\}_2$	2
3	$S_{u3}^2$	3	$\sigma^2\{y\}_3$	6
4	$S_{u4}^2$	1	$\sigma^2\{y\}_4$	2
5	$S_{u5}^2$	3	$\sigma^2\{y\}_5$	6
6	$S_{u6}^2$	4	$\sigma^2\{y\}_6$	8
7	$S_{u7}^2$	1	$\sigma^2\{y\}_7$	2
8	$S_{u8}^2$	3	$\sigma^2\{y\}_8$	6
9	$S_{u9}^2$	3	$\sigma^2\{y\}_9$	6

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 20$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 2,22$$

Розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості визначали за формулою (8):

$$G_{розр} = \frac{4}{20} = 0,2$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [7] для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів:  $S_{i \max}^2 = 4$ . Розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,2$ . Табличне значення критерію Кохрена:  $G_{табл} = 0,478$ .

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,2 \leq G_{табл} = 0,478$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 14).

Таблиця 14. Експериментальні результати дослідження теплостійкості КМ

№ досліду	Теплостійкість КМ, T, К			Середнє значення, T, К
	1	2	3	
1	338	339	337	338
2	350	349	348	349
3	348	345	345	346
4	350	348	349	349
5	347	350	350	349
6	348	352	350	350
7	351	350	349	350
8	348	351	351	350
9	353	350	350	351

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 15) за формулами (9 - 10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить  $t_m = 2,04$  [3, 7]. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 15.

Таблиця 15. Дисперсії коефіцієнтів регресії ( $S_b^2$ ) і розрахункові значення критерію Стьюдента ( $t_p$ )

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,25	$t_{0p}$	692,48
2	$S_{b_1}^2$	0,37	$t_{1p}$	3,82
3	$S_{b_2}^2$	0,37	$t_{2p}$	1,92
4	$S_{b_{11}}^2$	1,11	$t_{11p}$	2,86
5	$S_{b_{22}}^2$	0,0023	$t_{22p}$	2,38
6	$S_{b_{12}}^2$	0,56	$t_{12p}$	2,67

Враховуючи значимі і не значимі коефіцієнти, рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = 685,14 + 2,33x_1 - 3,0x_1^2 - 2,5x_2^2 - 2,0x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3, 7].

Розрахункове значення дисперсії адекватності:  $S_{u\max}^2 = 4$  (табл. 13).

Дисперсія відтворення:  $S_y^2 = 4,44 \dots$

Тоді:  $F_p = 0,9$ .

$F_{(0,05; f_T; f_u)}$  – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ( $F_{(0)} = 3,6$ ).

Слід зазначити, що оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. Однак, на основі результатів експериментальних досліджень (табл. 3) доведено, що максимальними показниками теплостійкості (за Мартенсом) характеризується композит наступного складу: основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (50 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (10 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

**Висновки.** Методом ортогонального центрального композиційного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у епоксидному композиті з поліпшеними когезійними властивостями. Композицію слід формувати наступного складу: твердник ПЕПА (5 мас.ч.), твердник Telalit 410 (5 мас.ч.), епоксидний олігомер CHS-Ероху 525 (100 мас.ч.), основний наповнювач – графіт антифрикційний марки АГ-1500 (60 мас.ч.), додатковий наповнювач – перліт (10...30 мас.ч.). Такий матеріал має руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{зг} = 28,6 \dots 35,6$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 5,4 \dots 6,2$  ГПа і теплостійкість (за Мартенсом) –  $T = 349 \dots 350$  К.

В подальшому планується дослідити триботехнічні властивості розроблених матеріалів.

1. P.O. Maruschak, I.V. Konovalenko, V. Gliha, et al., "Physical regularities in cracking of nanocoating and the method for automated determination of crack network parameters" in: Book of Abstracts of the 19th Conf. on Materials and Technology (November 22-23, 2011, Slovenia, Portoroz) (2011), p. 52.
2. Крутов В.И. Основы научных исследований: Учебник для технических вузов / Крутов В.И., Грушко И.М., Попов В.В. и др.; Под ред. Крутова В.И., Попова В.В. – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.
3. Зазимко В. Г. Оптимизация свойств строительных материалов: Учебное пособие для вузов / Зазимко В. Г. – М.: Транспорт, 1981. – 103 с.
4. Тхір І.Г., Гуменецький Т.В. Фізико-хімія полімерів: Навч. посібник. – Львів: вид. нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
5. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.І. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості: монографія. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
6. Сапронов О.О. Оптимізація складу захисного покриття методом математичного планування експерименту / О.О. Сапронов // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ. – 2013. – № 43. – Ч. II. – С. 260-267.
7. Планирование эксперимента и применение вычислительной техники в процессе синтеза резины: сб. статей / под ред. В.Ф. Евстратова, А.Г. Шварца. – М.: Химия, 1970. – 352 с.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.



УДК 621. 923. 5

И.М. Буюкли, В.М. Колесник

Одесский национальный политехнический университет

**РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ХОНИНГОВАНИЯ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ**

*Розглянута ефективність схем процесу зняття припуску, при хонінгуванні глухих отворів інструментами, які забезпечують сталість розмірного зносу різючих елементів по їх довжині, або компенсаційні переміщення різючих елементів з урахуванням нерівномірності їх зносу по довжині. На цій основі з метою підвищення ефективності процесу обробки глухих отворів, розроблено новий спосіб хонінгування і конструкція для його реалізації.*

*Ключові слова:* хонінгування; глухі отвори; точність форми; компенсація зносу; сталість зносу.

*Рис. 4. Табл. 1. Форм. 2. Літ. 6.*

И.М. Буюкли, В.М. Колесник

**РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ХОНИНГОВАНИЯ ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЙ**

*Рассмотрена эффективность схем процесса съема припуска, при хонинговании глухих отверстий инструментами, обеспечивающими постоянство размерного износа режущих элементов по их длине, либо компенсационные перемещения режущих элементов с учетом неравномерности их износа по длине. На этой основе с целью повышения эффективности процесса обработки глухих отверстий, разработан новый способ хонингования и конструкция для его реализации.*

*Ключевые слова:* хонингование; глухие отверстия; точность формы; компенсация износа; постоянство износа.

I.M. Boukli, V.M. Kolesnik

**DEVELOPMENT OF A NEW METHOD AND A TOOL FOR HONING BLIND HOLES**

*Efficiency of schemes stock removal process, for honing blind holes tools ensures constant dimensional wear of the cutting elements along their length, or compensatory movement of the cutting elements, taking into account their uneven wear length. On this basis, in order to increase the efficiency of the processing of blind holes, a new method of honing and design for its implementation.*

*Keywords:* honing, blind holes, the accuracy of the form; wear compensation; constancy wear.

Известно, что при хонинговании глухих отверстий имеет место неравномерный размерный износ по длине режущих элементов в связи с тем, что в подавляющем большинстве случаев в зоне дна обрабатываемого отверстия невозможно обеспечить оптимальный перебег инструмента. Это обуславливает появление на рабочей части инструмента геометрической погрешности в виде конусности, которая трансформируется в соответствующую продольную геометрическую погрешность на хонингуемом отверстии изделия.

Существует множество направлений повышения точности обработки глухих отверстий в продольном сечении.

В данной работе рассматриваются следующие основные направления:

– нивелирование неравномерности темпа размерного износа по длине режущих элементов, например, за счет варьирования шириной режущих элементов (применения режущих элементов трапецидальной формы) [1], либо за счет варьирования величиной концентрации алмазных зерен по длине режущих элементов [2] и т.д.;

– компенсация неравномерности темпа размерного износа по длине режущих элементов посредством реализации радиальной подачи за счет поворота режущих элементов вокруг собственных фиксированных осей, либо за счет управления величиной радиальной подачи по средством двух приводов разжима.

На рис. 1 и в таблице 1 представлены, соответственно, конструкция бруска трапецидальной формы и результаты экспериментальной проверки его исправляющей способности при хонинговании глухих отверстий [1].

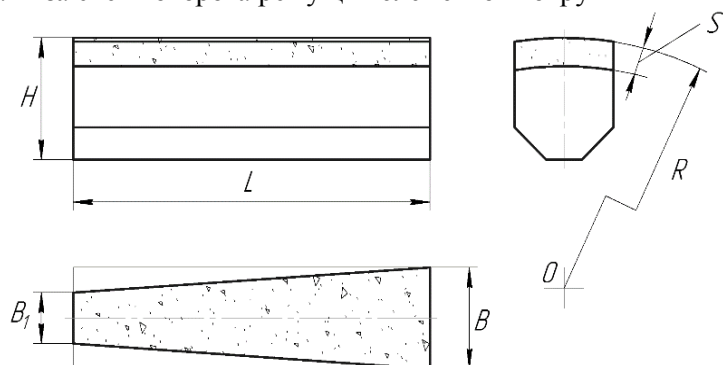


Рис. 1. Конструкция трапецидального бруска

Экспериментальные данные получены при хонинговании глухих отверстий в образцах из термически необработанной стали 45 ( $d_{\text{отв}} = 40$  мм;  $l_{\text{отв}} = 150$  мм) с исходной конусообразностью 0,03 ... 0,04 мм брусками АСР 125/100 – М1 – 100 с суммарной площадью режущей части алмазоносного слоя F (при числе брусков  $z = 4$ ). Установлено, что степень исправления конусообразности отверстия зависит от отношения оснований трапеции:

$$\varepsilon = B_1/B. \quad (1)$$

Таблица 1. Геометрическая точность отверстий при хонинговании трапецидальными брусками

Форма бруска	Данные бруска					Средние показатели, мКм	
	<i>L</i>	<i>B</i>	<i>B<sub>1</sub></i>	$\varepsilon$	<i>F</i> мм <sup>2</sup>	конусообразности	овальности
	мм						
Прямоугольная	50	10	10	1,0	2000	+130	10
Трапецидальная	50	10	5	0,5	1500	+74	5
Трапецидальная	50	10	3	0,3	1300	-62	5

В каждом конкретном случае оптимальное значение  $\varepsilon$  следует подбирать опытным путем. Как видно из таблицы 1, для данного конкретного случая, эффективное исправление конусности достигается при значениях  $\varepsilon = 0,4 \div 0,5$ .

В технической литературе приведены рекомендации по выбору конструктивных параметров призматических брусков применительно для хонингования сквозных отверстий. Оптимальное значение одного из этих параметров, а именно, значение суммарной ширины брусков, при котором процесс хонингования наиболее эффективен, определяется в соответствии с формулой [3]:

$$Bz = (0,25 \div 0,35) \pi d_{\text{отв}} \quad (2)$$

Варьирование же шириной брусков по их длине в соответствии с таблицей 1 (более чем в два раза) приведет к тому, что хонингование существенно большей частью рабочей поверхности брусков будет осуществляться в неоптимальном режиме. Это неизбежно отразится на эффективности процесса съема припуска, удельного износа алмазоносного слоя, качестве обработанной поверхности и т.д.

Суть в следующем. При алмазно-абразивной обработке, при съеме припуска, параллельно протекают два основных процесса: процесс микрорезания и процесс пластического поверхностного деформирования (механического истирания). Соотношение этих двух процессов характеризуется величиной, которая численно равна отношению толщины срезаемой стружки единичным зерном к радиусу закругления вершины этого зерна ( $a/\rho$ ) [3]. При  $a/\rho < (0,2 \div 0,3)$  микрорезание практически отсутствует, т.е. доминирует процесс пластического поверхностного деформирования (механического истирания). При  $a/\rho > (0,2 \div 0,3)$  начинается процесс микрорезания, а при дальнейшем увеличении значения  $a/\rho$  процесс микрорезания доминирует в большей степени. Однако, при увеличении  $a/\rho$  синхронно возрастают усилия резания, т.е. интенсифицируется процесс износа алмазоносного слоя (процесс вырывания алмазных зерен из связки). Следовательно, существует оптимальное значение  $a/\rho$ , которое соответствует процессу съема припуска в оптимальном режиме.

Процесс съема припуска брусками трапецидальной формы, либо брусками с переменной концентрацией алмазных зерен по длине неизбежно обуславливает обработку с изменяющейся в широких пределах (почти в два раза) величиной  $a/\rho$ .

Отсюда следует теоретический вывод о том, что величины оснований  $B$  и  $B_1$  трапецидальных брусков не должны существенно отличаться.

В работе [3] представлена схема хонингования глухих отверстий, в который радиальная подача режущих элементов реализуется посредством двух идентичных разжимных конусов рис. 2а (поз. 5 и 6). Каждый из разжимных конусов связан с автономным независимым приводом радиальной подачи. В процессе хонингования, при условии равенства скоростей осевого перемещения разжимных конусов, режущие элементы перемещаются только радиально.

При рассогласовании скоростей осевого перемещения разжимных конусов имеет место соответствующее рассогласование скоростей радиальных подач по длине режущих элементов. Величина и знак необходимого рассогласования скоростей определяются в соответствии с данными активного контроля текущего диаметрального размера в верхней и в нижней части хонингуемого отверстия (рис. б и в; поз. 7). Т. е., имеет место, система управления углом поворота режущих элементов с обратной связью. Эта схема и инструмент, реализующий эту схему, предназначены для определения и последующего исправления исходной конусности хонингуемого отверстия. Порядок величин исходной конусности – это микроны и десятки микронов.

Если, в данном инструменте, выполнить соответствующую модернизацию (удлинить в нижней части колодки с алмазосносным слоем так, чтобы корпус и игла разжима не касались дна отверстия в крайнем нижнем положении инструмента), то появится возможность использования его для обработки глухих отверстий. Если, при этом, за счет рассогласования скоростей радиальных подач, попытаться реализовать компенсацию неравномерности размерного износа по длине режущих элементов, то, по нашему мнению, это проблематично. Суть в том, что необходимо измерять и компенсировать сравнительно малые величины, порядок которых исчисляется долями микронов, тогда, как конструкция инструмента рассчитана на существенно больший порядок величин (как указывалось выше на микроны и десятки микронов). Дополнительно заметим, что описанный инструмент характеризуется конструктивной сложностью, что предопределяет недостаточную точность обработки и надежность в процессе эксплуатации.

В работе [4] приведена конструкция инструмента в которой компенсация неравномерности темпа размерного износа по длине режущих элементов осуществляется посредством реализации радиальной подачи за счет поворота режущих элементов вокруг собственных фиксированных осей, рис. 3.

В работе [5], выполнен анализ работоспособности этой конструкции, в результате которого установлено, что характерной особенностью конструкции является то, что величина радиальной подачи и величина компенсационного угла поворота режущих элементов функционально взаимозависимы. Согласование этих величин, с целью обеспечения условий оптимального процесса хонингования проблематично. Соответствующие расчеты, приведенные в этой работе, показали, что при согласованных величинах радиальной подачи и величины компенсационного угла поворота (а именно – согласованных т. о., чтобы, за время цикла, имел место, производительный сьем припуска всеми

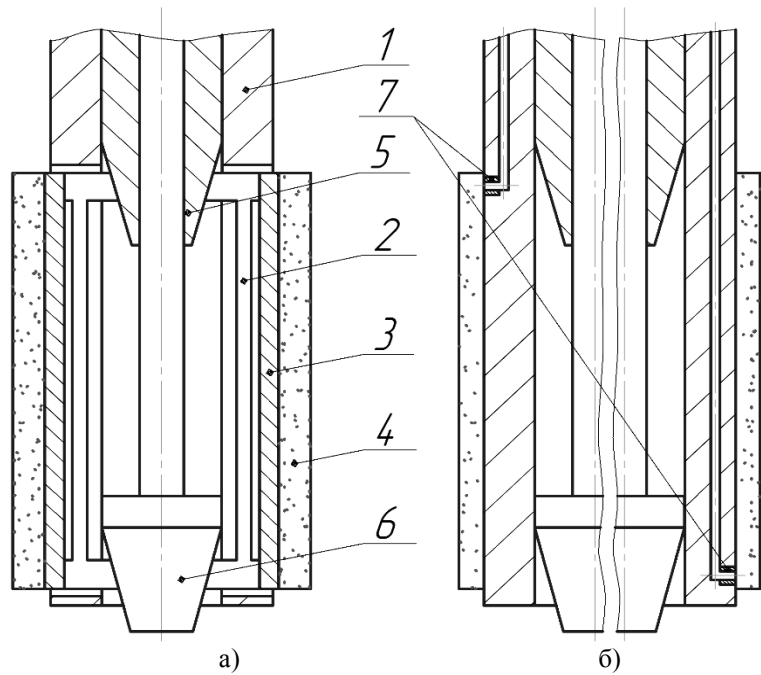


Рис. 2. Схема конструкции инструмента с двумя независимыми разжимными конусами

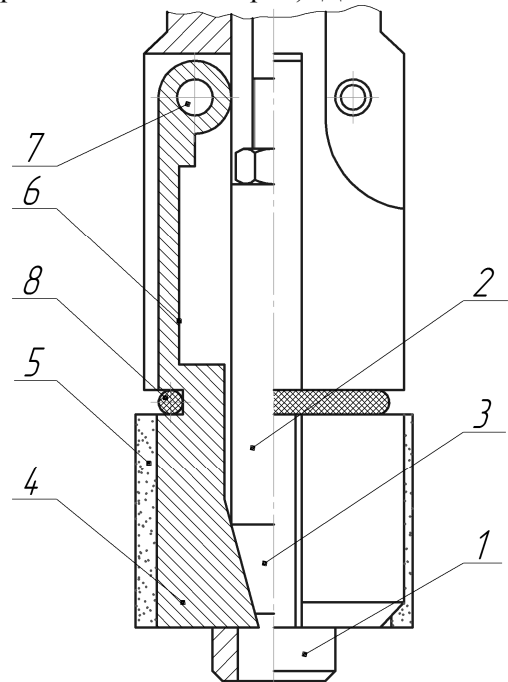


Рис. 3. Схема конструкции инструмента с фиксированными осями поворота режущих элементов

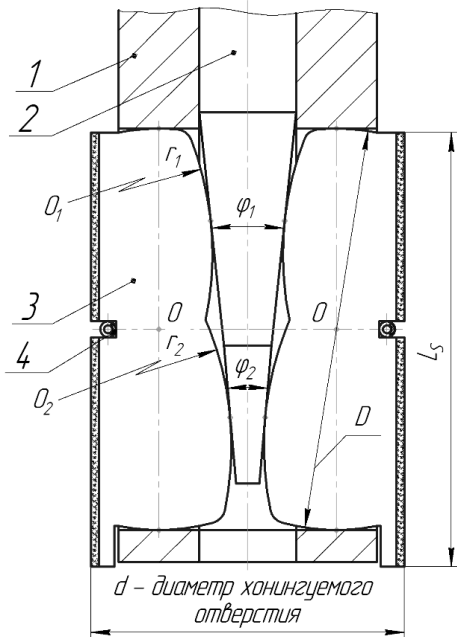
режущими зернами по длине режущих элементов), величина радиуса поворота режущих элементов должна быть не менее нескольких сотен метров, что конструктивно неприемлемо.

Отсюда следует вывод, что существующие конструкции для обработки глухих отверстий, описанные выше, не обеспечивают требуемой точности и эффективности обработки.

Целью данной работы является создание более совершенной схемы и конструкции инструмента для хонингования глухих отверстий.

На основе анализа приведенных выше конструкций разработана конструктивная схема инструмента [6], представленная на рис. 4.

Инструмент состоит из корпуса 1, в продольных радиальных пазах которого установлены подвижно и с возможностью контактирования с иглой разжима, подпружиненные пружиной 4 режущие элементы 3.



**Рис. 4. Схема конструкции разработанного инструмента с двойным конусом разжима и с подвижными осями поворота режущих элементов**

Каждый режущий элемент выполнен с двумя, разнесенными по длине, опорными (например, цилиндрическими с радиусами кривизны  $r_1$  и  $r_2$  и центрами радиусов кривизны  $O_1$  и  $O_2$ ) поверхностями и установлен с возможностью радиального перемещения и поворота (например, вокруг оси  $O$ ). Соосно корпусу, установлена с возможностью продольного перемещения посредством механизма радиальной подачи станка (на фиг. не изображен) игла разжима 2. Рабочая часть иглы разжима выполнена с двумя разными по величине конусности (либо, по величине угла клина) и разнесенными по длине рабочими опорными частями, каждая из которых контактирует с соответствующей опорной поверхностью режущих элементов.

**Работа инструмента.**

До начала обработки, определяют положение иглы разжима (положение режущих элементов), соответствующее требуемому диаметральному размеру отверстия в хонингуемых изделиях. Это может быть осуществлено, например, по эталонной детали. Затем переводят инструмент в исходное положение.

В исходном положении инструмент находится вне хонингуемого отверстия; игла разжима 2 находится в крайнем верхнем положении (по фиг.) и, соответственно, режущие элементы 3 сжаты пружиной 4. Инструмент вводится в обрабатываемое отверстие, и посредством соответствующих приводов осуществляется возвратно-поступательное, вращательное и ускоренные радиальные перемещения режущих элементов 3. В момент достижения контакта режущих элементов с обрабатываемой поверхностью ускоренное радиальное перемещение режущих элементов системой управления станка переключается на рабочую подачу и осуществляется съём припуска. При этом съём припуска сопровождается соответствующим радиальным износом режущих элементов, который в связи с асимметричностью перебега характеризуется большей интенсивностью в нижней части режущих элементов по отношению к верхней части режущих элементов. По окончании съёма припуска, инструмент выводится из отверстия в исходное крайнее положение.

Однако, при осевом перемещении иглы разжима ее верхняя опорная часть перемещает радиально верхние части режущих элементов с меньшей скоростью, чем ее нижняя опорная часть нижние части режущих элементов. То есть, имеет место одновременно радиальная подача и дополнительный поворот режущих элементов вокруг осей  $O$  в продольных радиальных пазах корпуса. Дополнительный поворот выбирается таким образом, чтобы компенсировать разность износов соответственно верхней и нижней части режущих элементов. Это исключает формирование геометрической погрешности хонингуемого отверстия в виде конусности, то есть повышается точность обработки.

Требуемый дополнительный поворот  $\varphi$  определится из уравнения

$$\varphi = \arctg(\Delta_2 - \Delta_1)/l, \quad (3)$$

где  $l$  — длина режущих элементов;

$\Delta_2$  и  $\Delta_1$  соответственно величин средних радиальных износов по краям режущих элементов в продольном направлении.

В конкретных условиях хонингования параметр  $\varphi$  можно определить экспериментально. Для этого, достаточно обработать аналогичным известным инструментом (с углом  $\varphi_1$  при вершине рабочей части иглы разжима) партию пробных деталей. Затем непосредственно измерить величины радиального износа в крайних по длине режущих элементов точках  $\Delta'_1$  и  $\Delta'_2$ . Если  $\Delta'_1$  и  $\Delta'_2$  разделить на размер партии, то получим усредненные величины радиального износа в крайних точках по длине режущих элементов за время съема припуска на одной детали. То есть, получим соответственно величины  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ . Подставив значения этих величин и значение величины  $l$  в приведенную формулу, определим величину угла  $\varphi$ .

Обеспечение поворота на угол  $\varphi$  осуществляется за счет выполнения рабочей части иглы с углами при вершинах конусов на рабочей части  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . При этом, при фиксированном значении угла  $\varphi_1$ , геометрически рассчитывают значение  $\varphi_2$  таким образом, чтобы за время съема припуска, при хонинговании глухого отверстия, режущие элементы радиально перемещаясь, повернулись бы на требуемый компенсационный угол  $\varphi$ .

Погрешность при определении экспериментальных величин  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , соответственно, величины  $\varphi$  может привести к формированию при хонинговании остаточной конусности на обрабатываемом отверстии. Однако, величина этой конусности существенно меньше (на порядок и более), чем в случае обработки без компенсационного поворота режущих элементов на угол  $\varphi$ . Это остаточная конусность может быть устранена за счет незначительной корректировки величины перебега режущих элементов в зоне, противоположной дну обрабатываемого отверстия.

#### **Выводы.**

1. На основе анализа съема припуска известными схемами и конструкций инструментов для реализации этих схем, разработана более совершенная схема и конструкция инструмента для хонингования глухих отверстий.

2. Отличительным признаком разработанной схемы является то, что предусмотрена возможность радиального перемещения осей поворота режущих элементов, что обеспечивает возможность реализации в широком диапазоне сочетания величин радиальной подачи и компенсационного поворота режущих элементов. Это позволяет реализовать схему хонингования при которой режущие зерна по длине режущих элементов участвуют в процессе резания полностью от начала и до конца съема припуска.

3. Выполнение рабочей части иглы разжима, в разработанной конструкции, с двумя разными по величине конусности (либо, по величине угла клина) и разнесенными по длине рабочими опорными частями конструктивно ограничивает величину суммарного хода иглы. Этот недостаток легко устраняется за счет наличия комплекта игл разжима с рабочими частями отличными по диаметру и длине и с идентичными углами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . В этом случае возможно полное использование алмазоносного слоя.

1. Хонингование: справочное пособие / С.И. Куликов, В.А. Романчук, Ф.Ф. Ризванов, Ю.М. Евсеев – М.: Машиностроение, 1973. – 168 с.
2. А. с. 1437205 СССР, МКИ<sup>3</sup> В24 D 17/00. Способ изготовления абразивного инструмента/ Л.И. Мастюгин, А.П. Якимиха, В.В. Минец, С.В. Амазов, И.П. Филонов (СССР). – №4160477/40–08; заявл. 21.10.86; опубл. 15.11.88, Бюл. № 42.
3. Пат. 2233216 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 24В 33/06. Способ хонингования/ А.М. Фирсов, Андреев М.В.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технологический университет И.И. Ползунова. – № 2003110903/02; заявл. 16.04.2003; опубл. 27.07.2004, Бюл. № 21
4. Андреев М. Повышение производительности хонингования глухих отверстий путем оптимизации режимов обработки и конструктивных параметров инструмента: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.08 / Андреев Михаил Витальевич. – Бийск, 2005 – 159 с.
5. Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2013. – Вип. 2(41). – 373 с.
6. Рішення про видачу патенту України на винахід №30063/3А/13 від 10.12.2013 за заявкою а201207667 від 22.06.12. МПК В24В 33/00. Спосіб хонінгування глухих отворів та інструмент для його здійснення/ І.М. Буюклі, В.М. Колеснік, П.А. Лінчевський.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2014.

© *И.М. Буюкли, В.М. Колесник*

УДК 622

**О. О. Вісин***Луцький національний технічний університет***ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ДО ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ПРИ ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ**

*В роботі проведено аналіз загальних вимог безпеки при термічній обробці металів. Основна увага приділена вимогам безпеки до технологічних процесів.*

*Ключові слова: безпека праці, безпечність технологічного процесу, технологічний процес, термічна обробка металів, засоби колективного та індивідуального захисту.*

*Лит. 8.***Е.А. Висын****ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ  
ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ**

*В работе проведён анализ общих требований безопасности при термической обработке металлов. Основное внимание уделено требованиям безопасности к технологическим процессам.*

*Ключевые слова: безопасность труда, безопасность технологического процесса, технологический процесс, термическая обработка металлов, средства коллективной и индивидуальной защиты.*

**E.A. Visyn****SAFETY REQUIREMENTS FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESSES DURING THE  
HEAT TREATMENT OF METALS**

*The paper analyzes the general safety requirements for heat treatment of metals. Focuses on the safety requirements to technological processes.*

*Keywords: safety, process safety, process, heat treatment of metals, collective and personal protection.*

**Актуальність роботи.** Збільшення “технологічної орієнтації” науки приводить до зростання обсягу завдань щодо токсикологічної та гігієнічної оцінки сучасних технологічних процесів із метою їх практичного використання за умови вилучення небезпечних для здоров’я виробничих факторів, у тому числі шкідливих речовин.

**Аналіз останніх досліджень.** Питання безпечності технологічних процесів було висвітлено В.Ц. Жидецьким, В.С. Джигирєєм, О.В. Мельниковим, В.М. Москальовою, В.В. Березуцьким [1-3]. Більш детально ці питання відображені авторами П.П. Кукінім, В.Л. Лапінім та Є.О. Підгородним [4]. Деякі питання стосовно безпеки праці висвітлені у колективній монографії І.П. Піскуна, М.Ф. Мандзюка, І.О. Трунової, М.Є. Ліщука [5].

**Постановка проблеми.** Сучасне виробництво характеризується наявністю різноманітних систем з небезпечними для навколишнього середовища та людини чинниками, складними технологічними системами зі значною кількістю рухомих і різальних елементів, високим рівнем загазованості і запиленості тощо. У вищих навчальних закладах готують майбутніх керівників виробництва, і від якості цієї підготовки залежить безпека виробництва та життя багатьох людей. Відповідальність за доручену інженеру справу вимагає від фахівця й керівника знання питань, пов’язаних із забезпеченням безпечних та комфортних умов праці на відповідному рівні.

Незадовільна організація робочих місць і виконання робіт, а також безвідповідальне ставлення керівників виробництва і безпосередніх виконавців до дотримання вимог безпеки праці – це основні причини аварій та травмувань працівників.

**Постановка завдання.** Основними складовими безпеки праці на виробництві є: безпечне виробниче обладнання, безпечні технологічні процеси та організація безпечного виконання робіт.

**Виклад основного матеріалу.** Якщо говорити про безпечність будь-якого технологічного процесу, то спочатку необхідно оцінити безпечність виробничого процесу.

Безпечність виробничого процесу – це властивість виробничого процесу відповідати вимогам безпеки праці під час проведення його в умовах, установлених нормативною документацією.

Безпечність виробничих процесів забезпечується: правильним вибором технологічних процесів, робочих операцій та порядку обслуговування виробничого устаткування; вибором виробничих приміщень чи зовнішніх майданчиків; вибором вихідних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів; вибором виробничого устаткування; розташуванням виробничого устаткування

та організацією робочих місць; вибором способів зберігання та транспортування вихідних матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, готової продукції та відходів виробництва; розподілом функцій між людиною та устаткуванням з метою зменшення важкості праці; професійним відбором та навчанням працівників; застосуванням засобів захисту працівників; включенням вимог безпеки в нормативно-технічну та технологічну документацію.

Безпека виробничих процесів визначається, у першу чергу, безпекою обладнання, яке входить у виробничий процес. Виробничі процеси не повинні забруднювати навколишнє середовище викидами шкідливих та небезпечних речовин, а також спричинювати вибухи та пожежі. Якщо під час технологічного процесу виявляються певні небезпеки, то це зазвичай наслідки помилок, які були допущені ще на стадії його розробки та проектування.

Тому основними вимогами безпеки до технологічних процесів є:

- усунення безпосереднього контакту працівників з вихідними матеріалами, заготовками, напівфабрикатами, готовою продукцією та відходами виробництва, які є вірогідними чинниками небезпек;

- заміна технологічних процесів та операцій, пов'язаних з виникненням безпечних та шкідливих виробничих факторів, процесами і операціями, за яких зазначені фактори відсутні або характеризуються меншою інтенсивністю;

- комплексна механізація та автоматизація виробництва, застосування дистанційного управління технологічними процесами і операціями за наявності небезпечних та шкідливих виробничих факторів;

- герметизація обладнання;

- застосування засобів колективного захисту працівників;

- раціональна організація праці та відпочинку з метою профілактики монотонності та гіподинамії, а також обмеження важкості праці;

- своєчасне отримання інформації про виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів (НШВФ) на окремих технологічних операціях (обов'язково з виводом на системи попереджувальної сигналізації);

- впровадження систем контролю та керування технологічним процесом, що забезпечує захист працівників та аварійне відключення обладнання;

- своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, що є джерелами НШВФ;

- забезпечення пожежної та вибухової безпеки.

При розробці і проведенні технологічних процесів термообробки металів слід керуватися цими НПАОП 28.5-1.02-07, ГОСТ 12.1.010-76, ГОСТ 12.3.002-75, СП 1042-73 та іншими чинними нормативними актами.

Відповідно до НПАОП 28.5-1.02-07 технологічні процеси термічної і хіміко-термічної обробки металів повинні передбачати [6]:

- усунення безпосереднього контакту працівників з хімічними речовинами, матеріалами, деталями і відходами виробництва, які здійснюють на них шкідливий вплив;

- заміну операцій, при яких виникають небезпечні і шкідливі виробничі фактори, на операції, де зазначені фактори відсутні або мають меншу інтенсивність;

- використання автоматизованих методів визначення концентрації речовин 1 класу небезпеки в повітрі робочої зони;

- оптимальні режими роботи устаткування, що забезпечують безперервність технологічного процесу;

- раціональний ритм роботи людей, які виконують окремі технологічні операції;

- унеможливлення створення аварійних ситуацій;

- застосування комплексної механізації та автоматизації, дистанційного керування-контролю і регулювання параметрів технологічних процесів (температури, інфрачервоного випромінювання, тиску в робочому просторі печі, вмісту компонентів у газовому середовищі та ін.);

- використання блокувальних пристроїв (з метою унеможливлення виникнення аварійних ситуацій) і засобів світлової і звукової сигналізації про порушення технологічного процесу;

- герметизацію устаткування, з якого можливе виділення шкідливих речовин;

- своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, які є джерелами небезпечних і шкідливих виробничих факторів;

- захист від надмірного опромінення робочих місць;

– дотримання встановленої періодичності чищення гартівних баків, ємностей і нагрівальних печей;

– механізацію ручної праці.

Для всіх термічних процесів, де це можливо за умовами технології, слід виключати полум'яне нагрівання, замінюючи його електричним. При неможливості цього для нагрівання слід використовувати газоподібне паливо. Застосування твердого або рідкого палива допускається тільки в технічно обґрунтованих випадках.

Технологічні процеси, при яких застосовуються або утворюються шкідливі речовини, повинні проводитися на устаткуванні з герметичними і надійними в експлуатації арматурою і комунікаціями.

Внутрішні поверхні апаратів і ємностей для агресивних речовин, мішалки і труби слід виготовляти з антикорозійних матеріалів або захищати антикорозійними покриттями.

Для безпечного транспортування технологічних рідин і газів слід максимально використовувати трубопроводи. Відповідно до ГОСТ 14202-69 для легкості розпізнавання трубопроводи фарбують в пізнавальні кольори: для води – зелений, для пари – червоний, для повітря – синій, для горючих і негорючих газів – жовтий, для кислот – жовтогарячий, для луґу – фіолетовий, для горючих і негорючих рідин – коричневий, для інших речовин – сірий.

Для підкреслення виду небезпеки на трубопроводи наносяться кольорові кільця: червоного кольору - для вибухонебезпечних, вогненебезпечних, легкозаймистих речовин; зеленого кольору – для безпечних або нейтральних речовин; жовтого кольору – для шкідливих, радіоактивних речовин, а також здатних викликати задуху, термічні або хімічні опіки. Крім того, кільця жовтого кольору вказують на інші види небезпек: глибокий вакуум, високий тиск та ін.

На трубопроводах також застосовуються попереджувальні знаки, маркувальні щитки і написи (цифрове позначення речовини, слово "вакуум" для вакуум – проводів, стрілки, що вказують напрямку руху рідини).

Кислотопроводи слід прокладати на висоті до 1,5 м із захистом від механічних ушкоджень. Як матеріал для труб можна використовувати скло, кераміку, вінілпласт та ін.

Вміст миш'яку в кислотах, контрольований при проведенні лабораторних аналізів, не повинен перевищувати 0,0001% ГДК миш'яковистого водню.

Приміщення термічних цехів, термічне устаткування і комунікації повинні бути оснащені приладами для контролю рівнів небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що виникають при процесах термообробки металів.

У всіх випадках виникнення аварійної ситуації при веденні технологічного процесу (перегрів гартівного середовища, виявлення в повітрі ціаністого водню та інших шкідливих речовин вище граничнодопустимих концентрацій, припинення подачі повітря до форсунки газового пальника термічної печі та ін.) роботу слід негайно припинити і вжити заходів до усунення небезпеки.

Контроль за параметрами технологічного процесу, якістю продукції повинний бути по змозі дистанційним. Доступ до апаратури контролю і керування технологічними процесами термічної обробки для обслуговування і ремонту повинен бути вільним і безпечним.

Замір рівня шкідливих і агресивних речовин повинен здійснюватися за допомогою рівнемірів, що виключають необхідність відкривання люків апаратів.

Захисно-запобіжна, регульовальна і запірна арматура, а також системи автоматики термічного устаткування і комунікації повинні перевірятися в терміни, установлені нормативно-технічною документацією на відповідні механізми і прилади.

При термообробці деталей у газових середовищах горючого складу в механізованій печі безперервної дії не дозволяється відкривати одночасно дверцята по обидва боки печі.

Персонал не повинний перебувати перед завантажувально-розвантажувальними прорізами печі в період завантаження і вивантаження деталей, а також при пуску контрольованої атмосфери або видаленні її з печі.

Не допускається випуск горючої контрольованої атмосфери в приміщення цеху або в систему загальноцехової вентиляції без попереднього спалювання.

При зупинці електропечі, а також у випадку виникнення на ній аварійної ситуації необхідно: 1) відключити електронагрів печі; 2) продути піч інертним газом з витратою не менше п'яти обсягів печі; 3) повільно відкрити входні і вихідні дверцята печі.

У разі відсутності інертного газу для продувки печі допускається видалення пічної атмосфери методом випалювання.



При використанні для термічної обробки металів (загартування, відпускання) контрольованої азотної атмосфери негорючого складу слід виконувати вимоги, що належать до роботи з вибухонебезпечними і токсичними газовими середовищами, з урахуванням того, що зазначена атмосфера може вводиться в піч при температурах як вище, так і нижче  $750^{\circ}\text{C}$ .

Перед пуском контрольованої ендотермічної атмосфери в піч слід перевірити контрольною термопарою температуру в камері печі при цьому вона повинна бути не нижче ніж  $760^{\circ}\text{C}$ .

При загасанні запального пальника відкривати дверцята печі до повторного запалювання пальника забороняється.

Горючі гази, що виходять у процесі роботи з електропечі, повинні згоряти у вогні полум'яної завіси, а при її відсутності - на свічі під вентиляційним ковпаком.

У термічних цехах на газопроводах, на лініях стиснутого повітря в легкодоступних місцях повинні бути установлені висікальні пристрої швидкої дії для можливості локалізації дії небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Для загартування необхідно застосовувати масло з температурою спалаху не нижче  $170^{\circ}\text{C}$ . Максимальна робоча температура нагрівання масла при загартуванні не повинна перевищувати  $80^{\circ}\text{C}$ .

Вантажопідйомні механізми, призначені для завантаження великих деталей у масляні гартівні ванни, повинні забезпечувати швидкість занурення не менше 15 м/хв.

При загартуванні в маслі занурення деталей слід здійснювати на глибину не менше 200 мм від поверхні, щоб уникнути перегріву і спалаху масла.

Ціанування, тобто карбонітрація, як правило, проводиться в титанових тиглях. При цьому процесі необхідно здійснювати продувку розплаву повітрям з метою попередження можливості місцевих перегрівів і утворення ціанідів. Не дозволяється підвищувати температуру розплаву ціаністих з'єднань вище  $650^{\circ}\text{C}$  з метою попередження утворення ціанідів. Процес карбонітрації повинний здійснюватися при температурі  $520\text{-}580^{\circ}\text{C}$ .

Не дозволяється користуватися водою і пінними вогнегасниками у випадку загоряння яких-небудь предметів біля ванн карбонітрації. З цією метою використовується сухий пісок або вуглекислотні вогнегасники.

Щодо процес дифузійної металізації в газових середовищах, то він є вибухонебезпечним.

Тому при роботі з порошкоподібними металами необхідно стежити за концентрацією металевого пилу в робочій зоні, яка не повинна перевищувати значень граничнодопустимих концентрацій, передбачених ГОСТ 12.1.005-88. Відкривання металевої тари з порошками (алюмінієм, цинком та ін.) слід здійснювати за допомогою спеціального інструмента і пристосувань, які не викликають іскроутворювання. Роботу рекомендується здійснювати в спеціальному приміщенні.

Щодо очищення металевих деталей від окалини та іржі, то воно здійснюється механічним або хімічним способом.

Механічне очищення здійснюється в мийних машинах, у яких застосовується розчин лугу з умістом до 10% кальцинованої соди при температурі до  $90^{\circ}\text{C}$ , або в установках для гідроочищення і гідропіскоочищення, у дробометних і дробометно-дробоструменних установках, а також на агрегатах ультразвукового очищення або вручну за допомогою абразивного інструмента. Застосування піскоструминних апаратів для сухого піскоочищення деталей забороняється. Дробометні і дробометно-дробоструменні установки повинні розміщуватися в приміщенні, обладнаному припливно-витяжною вентиляцією. Конструкція цих установок повинна передбачати повне укриття робочої зони (кількість повітря, що відсмоктується, повинна бути встановлена нормативно-технічною документацією на кожну модель устаткування, виходячи з числа установок і їх продуктивності).

Очищення резервуарів і відстійників від опадів шламу повинно бути механізовано. Стационарні верстати для обробки абразивним інструментом повинні бути обладнані індивідуальними аспіраційними установками або підключені до місцевої витяжної вентиляції.

Хімічне очищення деталей від окалини та іржі здійснюється шляхом травлення металу в кислоті або розчині електроліту з наступним промиванням у гарячій і холодній воді. Ванни для травлення повинні бути обладнані місцевою вентиляцією у вигляді бортових відсмоктувачів, вентиляційних шаф та ін. Приміщення ділянок де відбувається травлення повинні мати ефективну загальнообмінну механічну вентиляцію.

Операції завантаження деталей у травильні ванни і вивантаження їх повинні бути механізовані, щоб уникнути опіків кислотою.

Переливання кислоти повинно здійснюватися насосами або сифонами. Засмоктування кислоти в сифони повинно здійснюватися тільки спеціальними пристосуваннями.

Вакуумні печі, які використовують при технологічній обробці слід установлювати тільки в сухих, чистих, добре вентильованих приміщеннях. Підлоги, стелі і стіни цих приміщень повинні бути покриті матеріалами, які не дозволяють скупчуватися в приміщенні пилю і сміття, легкодоступними для вбирання (лицювальною і метглаською плитками, лінолеумом, пластиком).

Поруч з вакуумними печами не повинне розміщуватися устаткування, робота якого пов'язана зі значними виділеннями пилю, диму і теплового випромінювання. У приміщенні не повинні здійснюватися технологічні процеси, пов'язані з виділенням пар лугів, кислот та інших речовин, здатних взаємодіяти з працюючими у вакуумі деталями.

Вакуумні печі повинні бути обладнані місцевою витяжною вентиляцією для видалення газів і тепла. Гази, що викидаються з вихлопних патрубків вакуумних насосів, повинні виводитися по трубопроводах в атмосферу за межі виробничих будинків.

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори, що виникають при експлуатації лазерних установок, залежно від класу лазерів, а також класифікація лазерів за ступенем небезпеки генеруючого випромінювання визначаються вимогами ГОСТ 12.1.040-83 [8].

Лазери 3-4 класу до введення в експлуатацію в організації повинні бути прийняті комісією, призначеною роботодавцем, з обов'язковою участю в ній представника державного нагляду. Комісії повинні бути надані: паспорта на установки, інструкції з експлуатації та охорони праці, план розміщення установок, санітарний паспорт.

Ділянка лазерної обробки металів повинна розташовуватися в ізолюваному приміщенні.

Стіни приміщення, де розміщені лазерні установки, повинні бути з матеріалу, непроникного для лазерного випромінювання.

Внутрішні поверхні приміщення повинні фарбуватися в матовий колір, що має мінімальний коефіцієнт відбивання і забезпечує максимальне розсіювання світла по довжині хвилі лазерного випромінювання.

Працівники, що працюють з лазерними установками, повинні бути навчені правилам безпечного ведення робіт і правилам особистої гігієни, методам надання першої допомоги в разі ураження лазерним випромінюванням, електричним струмом, а також при впливі інших небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

На ділянці лазерної обробки металів повинні бути: інструмент з ізолюваними рукоятками; діелектричні рукавички і килимки; розрядні штанги; екрани непрозорі, що не дають відбиття лазерного випромінювання; засоби захисту очей; засоби захисту органів слуху; інструкція з охорони праці; інструкція з експлуатації установки; план розміщення установок із указівкою лазерної небезпечної зони.

Розміри лазерної небезпечної зони визначаються розрахунковим або експериментальним шляхом. У зонах з підвищеною інтенсивністю лазерного випромінювання повинні бути вивішені попереджувальні знаки з написом "Обережно! Лазерне випромінювання" (за ДСТУ ISO 6309:2007).

При роботі з лазерними установками виконання операцій, не передбачених інструкціями з експлуатації та охорони праці, забороняється. Особам, що не стосуються експлуатації та обслуговування лазерних установок, вхід у приміщення лазерної обробки металів не дозволяється. Про це повинні сповіщати відповідні написи.

Процеси лазерної обробки металів, які не потребують присутності обслуговуючого персоналу біля устаткування, повинні здійснюватися в спеціальному ізолюваному приміщенні. Керування процесом у цьому разі здійснюється з окремо розташованого пульта. Видалення шкідливих і небезпечних речовин з повітряного середовища (або зниження їх до рівня ГДК) повинно здійснюватися загальнообмінною вентиляцією. Для видалення великої кількості небезпечних і шкідливих речовин, крім загальнообмінної вентиляції, повинні застосовуватися місцеві відсмоктувачі.

При проведенні процесів, що вимагають присутності персоналу біля лазерної установки або поблизу зони впливу лазерного випромінювання на деталі, видалення шкідливих і небезпечних речовин із зони їх утворення повинно здійснюватися за допомогою місцевих відсмоктувачів. Якщо при проведенні таких технологічних процесів не можливо підтримувати концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони на рівні ГДК, необхідно: застосовувати засоби індивідуального захисту органів дихання (респіратори та інші пристрої); забезпечити захист шкірних покривів від влучення аерозольних часток, які можуть мати велику швидкість і високу температуру, що може

привести до опіку відкритих частин тіла; використовувати засоби захисту очей від аерозолів і лазерного випромінювання.

При поєднанні системи спостереження з оптичною системою лазерної установки необхідно застосовувати автоматичні затвори або світлофільтри, що захищають очі оператора в момент генерації випромінювання. Не дозволяється під час генерації випромінювання здійснювати візуальний контроль улучення променя в деталь без застосування відповідних засобів захисту, а також направляти промінь лазера в очі людини і на інші частини тіла.

При випадковому ушкодженні очей лазерним випромінюванням потерпілий повинен бути терміново обстежений офтальмологом і знаходитися під його спостереженням.

Характер медичної допомоги при ушкодженні очей визначається видом ушкодження, що залежить від довжини хвилі випромінювання.

**Висновки.** Саме раціональні методи технології та організації виробництва визначають умови праці.

Велику роль відіграє зміст праці, форми побудови трудових процесів, ступінь спеціалізації працівників під час виконання виробничих процесів, вибір режимів праці та відпочинку, дисципліна праці, психологічний клімат у колективі, організація санітарного і побутового забезпечення працівників.

У формуванні безпечних умов праці велике значення має врахування медичних протипоказань для використання працівників в окремих технологічних процесах, а також навчання та інструктажі працівників щодо безпечних методів проведення робіт.

Застосування нових нешкідливих і негорючих матеріалів, замкнених безвідходних технологій, комплексної механізації, автоматизації, комп'ютеризації виробничих процесів, створення оптимальних умов праці сприяють усуненню або зменшенню кількості несприятливих виробничих чинників, а відтак – запобігають виникненню нещасних випадків, отруєнь, професійних захворювань, аварій та пожеж.

Проте основна увага все ж повинна приділятися чіткому дотриманню встановлених вимог безпеки щодо технологічних процесів при термічній обробці металів. Потрібно також враховувати, що всі дії по забезпеченню безпеки повинні ґрунтуватися на розумінні й оцінці ризику, який неминуче присутній у будь-якій системі.

1. Основи охорони праці. Вид. 2-е / В.Ц. Жидецький, В.С. Джигирей, О.В. Мельников – Львів: Афіша, 2000. – 348 с.
2. Основи охорони праці: Навчальний посібник / За ред. проф. В.В. Березуцького. – Харків: Факт, 2005. – 480 с.
3. Москальова В.М. Основи охорони праці: Підручник. / В.М. Москальова. – К.: ВД "Професіонал", 2005. – 672 с.
4. Кукин П.П. Безопасность технологических процессов и производств (охрана труда) / П.П. Кукин, В.Л. Лапин, Е.А. Подгородных. – М.: Высшая школа, 1999. – 318 с.
5. Піскун І.П. Охорона праці (техніка безпеки): Навчальний посібник / І.П. Піскун, М.Ф. Мандзюк, І.О. Трунова, М.Є. Ліщук. / За ред. І.П. Піскуна – Луцьк : Волинянин. 2012. – 448 с.
6. НПАОП 28.5-1.02-07 Правила охорони праці при термічній обробці металів.
7. ГОСТ 12.2.003-91. "ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности".
8. ГОСТ 12.1.040-83 "Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность".

Стаття надійшла до редакції 08.02.2014.

УДК 539.3

**Г.В. Габрусев***Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя***МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТЕРМОПРУЖНОСТІ ДЛЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО ІЗОТРОПНОГО ШАРУ ІЗ КОНЦЕНТРИЧНИМИ КОЛОВИМИ ЛІНІЯМИ РОЗДІЛУ ГРАНИЧНИХ УМОВ**

*Запропоновано методику дослідження напруженого стану пружного шару при врахуванні теплообміну із навколишнім середовищем. Для демонстрації розробленої методики розв'язано задачу термопружності для трансверсально ізотропного шару при наявності на його граничних площинах колових ліній розділу граничних умов для температури та із врахуванням теплообміну між шаром і навколишнім середовищем за законом Ньютона.*

*Ключові слова:* напруження, трансверсально ізотропний шар, тепловий контакт, теплообмін за законом Ньютона.

Рис. 4. Форм. 11. Літ. 8.

**Г.В. Габрусев****МЕТОДИКА РЕШЕННЯ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТІ ДЛЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНО ІЗОТРОПНОГО СЛОЯ С КОНЦЕНТРИЧЕСКИМИ КРУГОВЫМИ ЛИНИЯМИ РАЗДЕЛА ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ**

*Предложена методика исследования напряженного состояния упругого слоя при учете теплообмена с окружающей средой. Для демонстрации разработанной методики решена задача термоупругости для трансверсально изотропного слоя при наличии на его предельных плоскостях круговых линий раздела граничных условий для температуры и с учетом теплообмена между слоем и окружающей средой по закону Ньютона.*

*Ключевые слова:* напряжение, трансверсально изотропный слой, тепловой контакт, теплообмен по закону Ньютона.

**H.V. Habrusiev****METHODS OF SOLUTION PROBLEMS OF THERMOELASTICITY FOR TRANSVERSAL ISOTROPIC LAYER, WHEN CIRCLE LINES OF THE BOUNDARY CONDITIONS DISTRIBUTION ARE AVAILABLE**

*In modern engineering many constructions, machine parts and device units operate under sufficient heat loads. Thermal stresses, which occur, can be of critical values and be crucial while structural designing. That is why the problems of thermoelasticity, which became of special importance in the middle of the last century [1, 2] are actual nowadays. The objective of the paper in question is the development of the method for the investigation of the stress state in the axis-symmetric problems of thermoelasticity, when the distribution lines of the boundary conditions of the 3-d order are available for the temperature on the boundary planes of the transversal isotropic layer.*

*To demonstrate the developed method the problem of thermoelasticity for the transversal isotropic layer, when three circle lines of the boundary conditions distributions for the temperature are available, has been solved. Plane-parallel, transversal isotropic layer of the finite thickness  $2h$  has been analyzed. The boundary plane of the layer are considered to be parallel to the isotropy and free from the external loads. Heat exchange according to the Newton law takes place between the points of the layer boundary planes and external environments, three lines of the boundary conditions distribution of the 3-d order for the temperature as the concentric circles being available on the upper layer boundary plane. The temperature of the external environment, which correspond different areas of the boundary planes, are different. Heat-exchange coefficients between the layer points and external environments are different too.*

*To solve the problem the main equations and relations of the thermoelasticity theory for the transversal isotropic bodies obtained in the papers by W. Novatsky [3], has been used.*

*When the boundary conditions of the problem are provided, the system of integral equations is obtained. To solve it the unknown function as the segment of the generalized Fourier's series according to the Bessel's function is introduced. The system of linear equations relatively unknown coefficients has been obtained. The system was built so, that the more the number of its equations is, the more accurate the solution of the task is. That is, taking advantage of the developed method, the problem of thermoelasticity can be solved with the preliminary defined accuracy.*

*To demonstrate the developed method the numerical example has been analyzed. Expressions for the functions of temperature and stress distributions in the layer have been built. Using the obtained functions the effect of the environment temperature and conditions of contact with the layer on the temperature distribution in the layer, as well as on the value and nature of stresses inside the layer, has been analyzed.*

*Key words:* stresses, transversal isotropic layer, thermal contact, heat exchange according to the Newton law.

**Вступ.** Цілий ряд задач у галузі будівництва та машинобудування призводять до необхідності розв'язання задач термопружності. У процесі визначення їх розв'язку необхідно з'ясувати питання про вплив температурних полів на розподіл напружень, на розміри області контакту тощо. Багато вітчизняних, та закордонних науковців розглядали задачі термопружності [1-6]. Великий інтерес до такого типу задач в першу чергу пояснюється тим, що температурні напруження, які виникають у пружних тілах під впливом значних температурних градієнтів,

© Г.В. Габрусев

можуть набувати критичних значень і відігравати вирішальну роль при розрахунках на міцність. Окрім самостійної цінності, задачі термопружності відіграють важливу роль, як одна із складових широкого кола задач, зокрема контактних.

У зв'язку з цим задачі термопружності, які набули особливого розвитку в середині минулого століття, не втрачають актуальності досі, а тому потребують розробки нових і вдосконалення існуючих методик розв'язання.

**Метою запропонованої роботи** і є розроблення алгоритму дослідження напруженого стану пружного шару в задачах термопружності за наявності концентричних колових ліній розділу граничних умов для температури на його поверхні.

**Постановка задачі.** Для демонстрації розробленої методики розглянемо плоскопаралельний, трансверсально ізотропний шар скінченної товщини  $2h$ . Будемо вважати, що граничні площини шару паралельні до площин ізотропії і вільні від зовнішніх навантажень. Між точками граничних площин шару і зовнішнім середовищем здійснюється теплообмін за законом Ньютона. При цьому на обох граничних площинах шару є по три лінії розділу граничних умов для температури у вигляді концентричних кіл. Температура зовнішнього середовища, що відповідає різним областям граничних площин, які відокремлені лініями розділу – різна.

Зафіксуємо циліндричну систему координат  $(O, r, \varphi, z)$  так, щоб координатна площина  $z = 0$  співпадала з серединною площиною шару. Вісь  $OZ$  направимо перпендикулярно до граничних площин, рівняння яких відносно вибраної системи матимуть вигляд  $z = h$  та  $z = -h$  (рис.1).

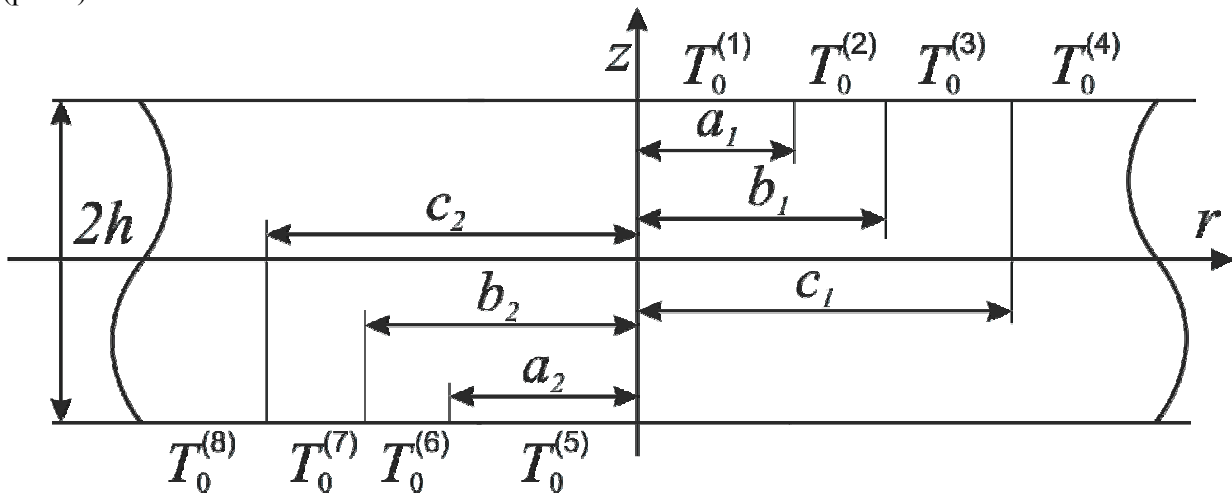


Рис. 1. Розрахункова схема

Граничні умови для температури на верхній граничній площині шару матимуть вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -k_i(T(r, h) - T_0^{(i)}), \quad r_{i-1} \leq r < r_i, \\ i = \overline{1, 4}, \quad r_0 = 0, \quad r_1 = a_1, \quad r_2 = b_1, \quad r_3 = c_1, \quad r_4 = \infty. \quad (1)$$

На нижній –

$$\frac{\partial T}{\partial z} = k_j(T(r, -h) - T_0^{(j)}), \quad r_{j-1} \leq r < r_j, \\ j = \overline{5, 8}, \quad r_4 = 0, \quad r_5 = a_2, \quad r_6 = b_2, \quad r_7 = c_2, \quad r_8 = \infty. \quad (2)$$

Оскільки граничні площини шару вільні від зовнішніх навантажень, матимемо:

$$\sigma_{rz}(r, \pm h) = 0, \quad 0 \leq r < \infty; \\ \sigma_{zz}(r, \pm h) = 0, \quad 0 \leq r < \infty. \quad (3)$$

Тут  $T = T(r, z)$  є функцією розподілу температури в шарі;  $T_0^{(i)}$  – температура зовнішнього середовища відносно областей граничних площин, відокремлених лініями розділу граничних умов;  $k_i$  – коефіцієнти теплообміну між шаром та навколишнім середовищем.

Виходячи з граничних умов задач, потрібно визначити розподіл температури, а також напружень, що виникли у шарі. Для цього використаємо співвідношення термопружності для трансверсально ізотропного тіла, запропоновані В. Новацьким в його роботі [7]. У результаті застосування до них інтегрального перетворення Ганкеля [8], отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_{rz}(r, z) &= \beta A_{33} A_{44} \int_0^\infty \alpha^2 \frac{d}{dz} \left( e^* \frac{d^2}{dz^2} - d^* \alpha^2 \right) \bar{\psi}(\alpha, z) J_1(r\alpha) d\alpha, \\ \sigma_{zz}(r, z) &= -\beta A_{33} A_{44} \int_0^\infty \alpha^3 \left( e^* \frac{d^2}{dz^2} - d^* \alpha^2 \right) \bar{\psi}(\alpha, z) J_0(r\alpha) d\alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

$$T(r, z) = B \int_0^\infty \alpha^5 [C_5(\alpha) sh \mu_5 z \alpha + D_5(\alpha) ch \mu_5 z \alpha] J_0(r\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

В останніх співвідношеннях введено наступні позначення:

$$B = A_{33} A_{44} (\mu_5^2 - \mu_1^2)(\mu_5^2 - \mu_3^2), \quad \beta = \frac{1+\nu}{EE'D} (\alpha + \nu \alpha'), \quad \beta' = \frac{1+\nu}{ED} \left( 2 \frac{\nu \alpha'}{E'} + \frac{1-\nu}{E} \alpha' \right),$$

$$A_{11} = \frac{1}{DE'} \left( \frac{1}{E} - \frac{\nu'^2}{E'} \right), \quad A_{13} = \frac{\nu'(1+\nu)}{EE'D}, \quad A_{33} = \frac{1-\nu^2}{DE^2}, \quad A_{44} = \frac{E'}{2(1+\nu')},$$

$$D = \frac{1+\nu}{EE'} \left( \frac{1-\nu}{E} - \frac{2\nu'^2}{E'} \right), \quad \varepsilon^4 = \frac{A_{11}}{A_{33}}, \quad e^* = \frac{\beta'}{\beta} \frac{A_{13}}{A_{33}} - 1, \quad d^* = \frac{A_{13}}{A_{33}} - \mu_1^2 \mu_3^2 \frac{\beta'}{\beta},$$

$$\mu_{1,3}^2 = \begin{cases} \varepsilon^2 (\omega \pm \sqrt{\omega^2 - 1}), & \omega > 1, \\ \varepsilon^2, & \omega = 1, \\ \varepsilon^2 \left( \sqrt{\frac{1+\omega}{2}} \pm i \sqrt{\frac{1-\omega}{2}} \right)^2, & \omega < 1, \end{cases} \quad \mu_5^2 = \frac{\lambda}{\lambda'}, \quad \omega = \frac{A_{11} A_{33} - 2 A_{13} A_{44} - A_{13}^2}{2 A_{44} \sqrt{A_{11} A_{33}}},$$

$\bar{\psi}(\alpha, z) = \sum_{j=1,3,5} [C_j(\alpha) sh(\mu_j z \alpha) + D_j(\alpha) ch(\mu_j z \alpha)]$  – трансформанта Ганкеля термопружного

потенціалу,  $C_j(\alpha)$ ,  $D_j(\alpha)$  – невідомі функції, що визначаються граничними умовами задач;  $J_0(r\alpha)$ ,  $J_1(r\alpha)$  – функції Бесселя першого роду;  $E$  та  $\nu$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для площин ізотропії;  $E'$  та  $\nu'$  – для напрямку  $Oz$ . Аналогічно  $\alpha$  та  $\alpha'$  – коефіцієнти лінійного температурного розширення, а  $\lambda$  та  $\lambda'$  – коефіцієнти теплопровідності.

**Температурна частина.** Вимагаючи виконання граничних умов задач для температури (1) та (2), отримаємо систему інтегральних рівнянь відносно невідомих функцій  $C_5(\alpha)$ ,  $D_5(\alpha)$ :

$$B \int_0^\infty \alpha^5 (C_5(\alpha) Q_i(\alpha) + D_5(\alpha) R_i(\alpha)) J_0(r\alpha) d\alpha = k_i T_0^{(i)}, \quad r_{i-1} \leq r < r_i;$$

$$i = \overline{1, 4}, \quad r_0 = 0, \quad r_1 = a_1, \quad r_2 = b_1, \quad r_3 = c_1, \quad r_4 = \infty; \quad (6)$$

$$B \int_0^{\infty} \alpha^5 (C_5(\alpha) Q_j(\alpha) - D_5(\alpha) R_j(\alpha)) J_0(r\alpha) d\alpha = -k_j T_0^{(j)}, \quad r_{j-1} \leq r < r_j;$$

$$j = \overline{5, 8}, \quad r_4 = 0, \quad r_5 = a_2, \quad r_6 = b_2, \quad r_7 = c_2, \quad r_8 = \infty; \quad (7)$$

$$Q_i(\alpha) = \mu_5 \alpha c h \mu_5 h \alpha + k_i s h \mu_5 h \alpha, \quad R_s(\alpha) = \mu_5 \alpha s h \mu_5 h \alpha + k_s c h \mu_5 h \alpha.$$

Продовжимо співвідношення (6) при  $i=4$  та (7) при  $j=8$  на всю додатну піввісь  $0 \leq r < +\infty$ . Для цього введемо дві невідомі функції  $x(r)$  та  $y(r)$ :

$$B \int_0^{\infty} \alpha^5 [C_5(\alpha) Q_4(\alpha) + D_5(\alpha) R_4(\alpha)] J_0(r\alpha) d\alpha =$$

$$= k_4 T_0^{(4)} [\eta(r - c_1) + x(r) \eta(c_1 - r)], \quad 0 \leq r < +\infty; \quad (8)$$

$$B \int_0^{\infty} \alpha^5 [C_5(\alpha) Q_8(\alpha) - D_5(\alpha) R_8(\alpha)] J_0(r\alpha) d\alpha =$$

$$= -k_8 T_0^{(8)} [\eta(r - c_2) + y(r) \eta(c_2 - r)], \quad 0 \leq r < +\infty. \quad (9)$$

Тут  $\eta(x)$  – функція Гевісайда.

Виберемо невідомі функції у вигляді відрізків ряду:

$$x(r) = 1 + \sum_{n=1}^N a_n J_0\left(\frac{r}{c_1} \gamma_n\right), \quad 0 \leq r < c_1; \quad y(r) = 1 + \sum_{n=1}^N b_n J_0\left(\frac{r}{c_2} \gamma_n\right), \quad 0 \leq r < c_2, \quad (10)$$

де  $\gamma_n$  – додатні корені рівняння  $J_0(x) = 0$ ;  $a_n$  та  $b_n$  – невідомі коефіцієнти.

Застосовуючи до співвідношення (8) та (9) формулу обернення інтегрального перетворення Ганкеля, отримаємо систему двох лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих функцій  $C_5(\alpha)$  та  $D_5(\alpha)$ . Розв'язавши отриману систему, будемо мати:

$$C_5(\alpha) = \frac{R_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} X^{(T)}(\alpha) + \frac{R_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} Y^{(T)}(\alpha),$$

$$D_5(\alpha) = \frac{Q_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} X^{(T)}(\alpha) - \frac{Q_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} Y^{(T)}(\alpha), \quad (11)$$

$$X^{(T)}(\alpha) = \frac{k_4 T_0^{(4)}}{B \alpha^5} \left[ \delta(\alpha) - \sum_{n=1}^N a_n \gamma_n J_1(\gamma_n) c_1^2 \frac{\alpha J_0(c_1 \alpha)}{(c_1 \alpha)^2 - \gamma_n^2} \right],$$

$$Y^{(T)}(\alpha) = -\frac{k_8 T_0^{(8)}}{B \alpha^5} \left[ \delta(\alpha) - \sum_{n=1}^N b_n \gamma_n J_1(\gamma_n) c_2^2 \frac{\alpha J_0(c_2 \alpha)}{(c_2 \alpha)^2 - \gamma_n^2} \right].$$

Тут  $\Delta_0(\alpha) = Q_4(\alpha) R_8(\alpha) + Q_8(\alpha) R_4(\alpha)$ ,  $\delta(\alpha)$  – дельта функція Дірака.

Коефіцієнти розкладу (10) будемо шукати, вимагаючи виконання співвідношень (6) при  $i = \overline{1, 3}$ , та (7) при  $j = \overline{5, 7}$ . Помноживши їх обидві частини на  $r J_0(\gamma_q r)$ ,  $q = \overline{1, N}$  і проінтегрувавши отримані співвідношення по  $r$  від 0 до  $c_1$  та від 0 до  $c_2$  відповідно, отримаємо систему відносно невідомих  $a_n$  та  $b_n$ .

За допомогою співвідношень (5) та (11) отримуємо функцію розподілу температури в шарі

$$T(r, z) = -k_4 T_0^{(4)} \sum_{n=1}^N a_n \gamma_n J_1(\gamma_n) c_1^2 \int_0^\infty K_1(\alpha, z) \frac{\alpha J_0(c_1 \alpha) J_0(r \alpha)}{(c_1 \alpha)^2 - \gamma_n^2} d\alpha +$$

$$+ k_8 T_0^{(8)} \sum_{n=1}^N b_n \gamma_n J_1(\gamma_n) c_2^2 \int_0^\infty K_2(\alpha, z) \frac{\alpha J_0(c_2 \alpha) J_0(r \alpha)}{(c_2 \alpha)^2 - \gamma_n^2} d\alpha +$$

$$+ \frac{k_4 T_0^{(4)} [k_8(z+h)+1] + k_8 T_0^{(8)} [k_4(z-h)+1]}{2hk_4k_8 + k_4 + k_8},$$

$$K_1(\alpha, z) = \frac{R_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} sh(\mu_5 \alpha z) + \frac{Q_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} ch(\mu_5 \alpha z),$$

$$K_2(\alpha, z) = \frac{R_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} sh(\mu_5 \alpha z) - \frac{Q_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} ch(\mu_5 \alpha z).$$

**Силова частина.** Вимагаючи виконання граничних умов (3) отримаємо систему чотирьох лінійних рівнянь відносно невідомих  $C_1(\alpha)$ ,  $D_1(\alpha)$ ,  $C_3(\alpha)$ ,  $D_3(\alpha)$ , розв'язавши яку матимемо:

$$C_1(\alpha) = -C_5(\alpha) \frac{(e^* \mu_5^2 - d^*) f(\mu_3, \mu_5, \alpha)}{(e^* \mu_1^2 - d^*) f(\mu_3, \mu_1, \alpha)}, \quad C_3(\alpha) = -C_5(\alpha) \frac{(e^* \mu_5^2 - d^*) f(\mu_5, \mu_1, \alpha)}{(e^* \mu_3^2 - d^*) f(\mu_3, \mu_1, \alpha)},$$

$$D_1(\alpha) = -D_5(\alpha) \frac{(e^* \mu_5^2 - d^*) \varphi(\mu_3, \mu_5, \alpha)}{(e^* \mu_1^2 - d^*) \varphi(\mu_3, \mu_1, \alpha)}, \quad D_3(\alpha) = -D_5(\alpha) \frac{(e^* \mu_5^2 - d^*) \varphi(\mu_5, \mu_1, \alpha)}{(e^* \mu_3^2 - d^*) \varphi(\mu_3, \mu_1, \alpha)},$$

$$f(\mu_i, \mu_j, \alpha) = \mu_i ch(\mu_i \alpha h) sh(\mu_j \alpha h) - \mu_j ch(\mu_j \alpha h) sh(\mu_i \alpha h),$$

$$\varphi(\mu_i, \mu_j, \alpha) = \mu_i sh(\mu_i \alpha h) ch(\mu_j \alpha h) - \mu_j sh(\mu_j \alpha h) ch(\mu_i \alpha h).$$

Використовуючи співвідношення (11), отримаємо формули для обчислення компонент тензора напружень:

$$\sigma_{zz}(r, z) = \frac{\beta(e^* \mu_5^2 - d^*)}{(\mu_5^2 - \mu_1^2)(\mu_5^2 - \mu_3^2)} \times$$

$$\times \left[ k_4 T_0^{(4)} \sum_{n=1}^N a_n \gamma_n J_1(\gamma_n) \int_0^\infty \left[ \frac{R_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} F_1(\alpha, z) + \frac{Q_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} \Phi_1(\alpha, z) \right] \frac{c_1^2 \alpha J_0(c_1 \alpha) J_0(r \alpha)}{(c_1 \alpha)^2 - (\gamma_n)^2} d\alpha + \right.$$

$$\left. + k_8 T_0^{(8)} \sum_{n=1}^N b_n \gamma_n J_1(\gamma_n) \int_0^\infty \left[ \frac{R_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} F_1(\alpha, z) - \frac{Q_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} \Phi_1(\alpha, z) \right] \frac{c_2^2 \alpha J_0(c_2 \alpha) J_0(r \alpha)}{(c_2 \alpha)^2 - (\gamma_n)^2} d\alpha \right],$$

$$\sigma_{rz}(r, z) = -\frac{\beta(e^* \mu_5^2 - d^*)}{(\mu_5^2 - \mu_1^2)(\mu_5^2 - \mu_3^2)} \times$$

$$\times \left[ k_4 T_0^{(4)} \sum_{n=1}^N a_n \gamma_n J_1(\gamma_n) \int_0^\infty \left[ \frac{R_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} F_2(\alpha, z) + \frac{Q_8(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} \Phi_2(\alpha, z) \right] \frac{c_1^2 \alpha J_0(c_1 \alpha) J_0(r \alpha)}{(c_1 \alpha)^2 - (\gamma_n)^2} d\alpha + \right.$$



$$+ k_8 T_0^{(8)} \sum_{n=1}^N b_n \gamma_n J_1(\gamma_n) \int_0^{\infty} \left[ \frac{R_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} F_2(\alpha, z) - \frac{Q_4(\alpha)}{\Delta_0(\alpha)} \Phi_2(\alpha, z) \right] \frac{c_2^2 \alpha J_0(c_2 \alpha) J_0(r \alpha)}{(c_2 \alpha)^2 - (\gamma_n)^2} d\alpha \Bigg],$$

$$F_1(\alpha, z) = sh(\mu_5 z \alpha) - \frac{f(\mu_3, \mu_5, \alpha)}{f(\mu_3, \mu_1, \alpha)} sh(\mu_1 z \alpha) - \frac{f(\mu_5, \mu_1, \alpha)}{f(\mu_3, \mu_1, \alpha)} sh(\mu_3 z \alpha),$$

$$\Phi_1(\alpha, z) = ch(\mu_5 z \alpha) - \frac{\varphi(\mu_3, \mu_5, \alpha)}{\varphi(\mu_3, \mu_1, \alpha)} ch(\mu_1 z \alpha) - \frac{\varphi(\mu_5, \mu_1, \alpha)}{\varphi(\mu_3, \mu_1, \alpha)} ch(\mu_3 z \alpha),$$

$$F_2(\alpha, z) = \mu_5 ch(\mu_5 z \alpha) - \frac{f(\mu_3, \mu_5, \alpha)}{f(\mu_3, \mu_1, \alpha)} \mu_1 ch(\mu_1 z \alpha) - \frac{f(\mu_5, \mu_1, \alpha)}{f(\mu_3, \mu_1, \alpha)} \mu_3 ch(\mu_3 z \alpha),$$

$$\Phi_2(\alpha, z) = \mu_5 sh(\mu_5 z \alpha) - \frac{\varphi(\mu_3, \mu_5, \alpha)}{\varphi(\mu_3, \mu_1, \alpha)} \mu_1 sh(\mu_1 z \alpha) - \frac{\varphi(\mu_5, \mu_1, \alpha)}{\varphi(\mu_3, \mu_1, \alpha)} \mu_3 sh(\mu_3 z \alpha).$$

**Числові приклади.** Проведемо дослідження впливу наявності стаціонарного температурного поля, яке діє на граничні площини шару, на величину та характер розподілу напружень та температури в шарі на прикладі трансверсально ізотропного магнію. Коефіцієнти  $\mu_i$ ,  $i = 1, 3$ , для даного матеріалу, мають такі значення:  $\mu_1 = 1.388395$ ,  $\mu_3 = 0.705194$ .

Параметри температурного поля виберемо наступними:

$$a_1 = 0.4, b_1 = 0.6, c_1 = 1, a_2 = 0.5, b_2 = 0.8, c_2 = 1, h = 1, T_0 = 100;$$

$$k_1 = k_3 = 1, k_4 = 5, k_2 = k_5 = k_6 = k_7 = k_8 = 0.01;$$

$$T_0^{(1)} = T_0^{(4)} = T_0^{(5)} = T_0^{(6)} = T_0^{(7)} = T_0^{(8)} = 0.8 \cdot T_0, T_0^{(2)} = T_0, T_0^{(3)} = 0.1 \cdot T_0.$$

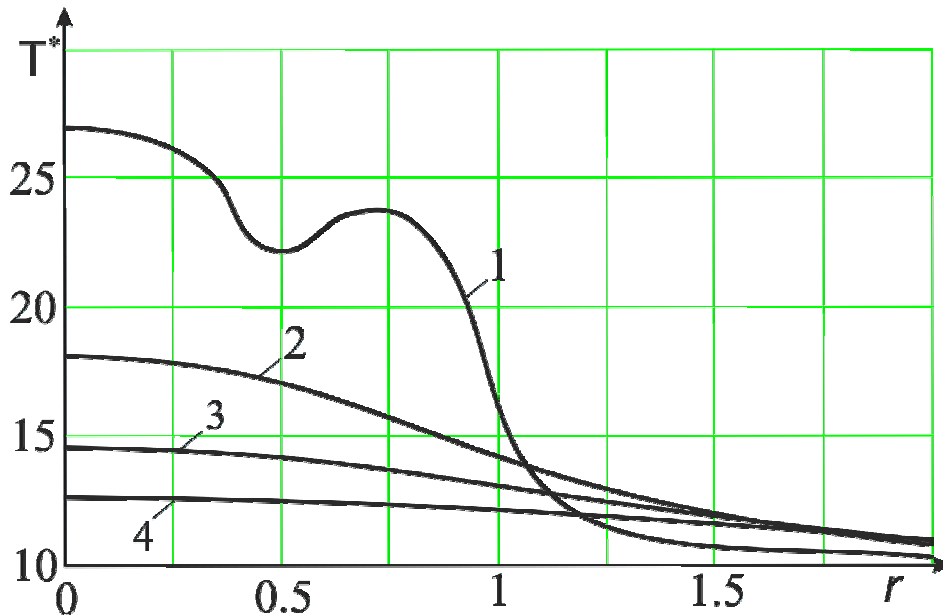


Рис. 2. Розподіл температури в шарі

На рис.2 зображено розподіл температури в шарі. Криві 1 та 4 відповідають верхній та нижній граничним площинам шару, 3 – серединній площині, а 2 – площині шару при  $z = \frac{1}{2} h$ .

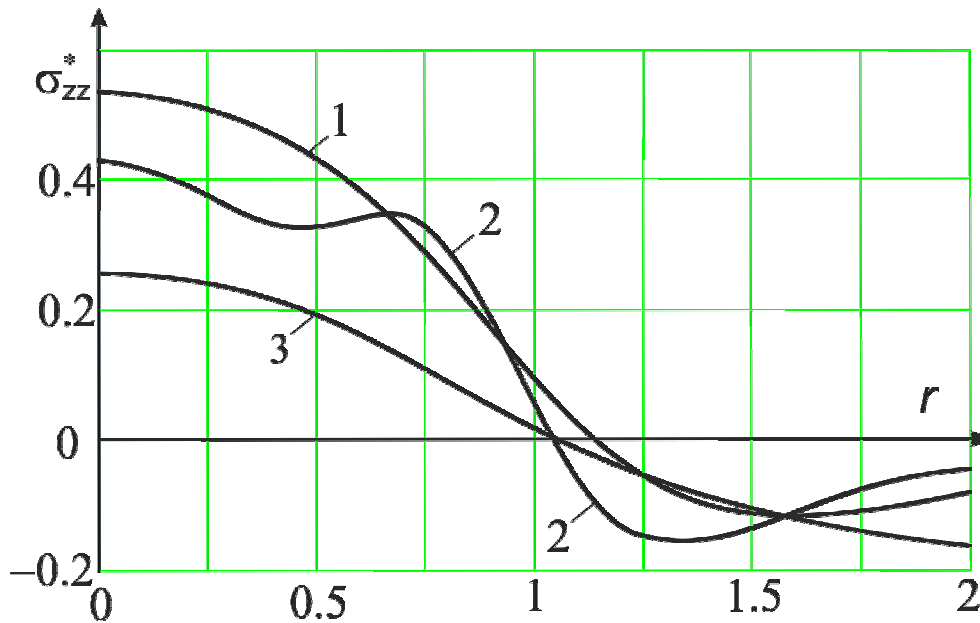


Рис. 3. Розподіл напружень  $\sigma_{zz}^*$  в шарі

На рис.3 зображено графік безрозмірної величини  $\sigma_{zz}^* = \frac{(\mu_5^2 - \mu_1^2)(\mu_5^2 - \mu_3^2)}{\beta(e^* \mu_5^2 - d^*)k_4 T_0^{(4)}} \sigma_{zz}(r, z)$ , що ілюструє розподіл нормальних напружень всередині шару. Крива 1 відповідає серединній площині шару, 2 та 3 – площинам шару при  $z = \frac{1}{2}h$  та  $z = -\frac{1}{2}h$  відповідно.

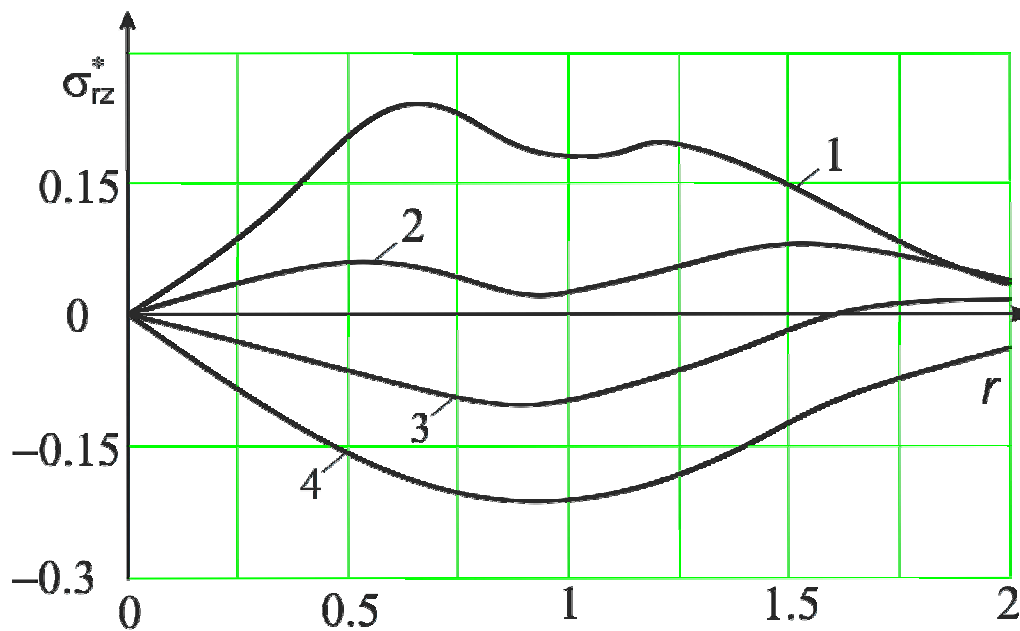


Рис. 4. Розподіл напружень  $\sigma_{rz}^*$  в шарі

На рис.4 зображено графік безрозмірної величини  $\sigma_{rz}^* = \frac{(\mu_5^2 - \mu_1^2)(\mu_5^2 - \mu_3^2)}{\beta(e^* \mu_5^2 - d^*)k_4 T_0^{(4)}} \sigma_{rz}(r, z)$ , що ілюструє розподіл дотичних напружень всередині шару. Крива 3 відповідає серединній площині шару, 1, 2 та 4 – площинам шару при  $z = \frac{1}{2}h$ ,  $z = \frac{1}{4}h$  та  $z = -\frac{1}{2}h$  відповідно.

**Висновки.** Із проведених розрахунків випливає, що як різниця в температурних показниках, так і різниця в умовах теплового контакту значно впливають на напружений стан у шарі. Тому, температурні напруження, виникаючі при цьому, обов'язково потрібно враховувати при проведенні розрахунків на міцність.

Описаний алгоритм можна успішно застосовувати для розв'язання задач термопружності при різній кількості концентричних колових ліній розділу граничних умов на поверхні шару. Їх збільшення призведе лише до зміни рівнянь (6) – (7) і не вплине на складність подальших викладок. Характерною особливістю даної наближеної методики є те, що збільшення кількості доданків у співвідношеннях (10) приводить до підвищення точності одержаного наближення.

Враховуючи відносну простоту та можливість реалізації запропонованої методики на ПК, вважаю доцільним її використання при проведенні інженерних розрахунків.

1. Боли, Б. Теория температурных напряжений [Текст] / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – Мир, 1962.
2. Грилицький, Д.В. Деякі випадки осесиметричної задачі термопружності для трансверсально ізотропного шару [Текст] / Д. В. Грилицький, В. Г. Габрусев, О. П. Піддубняк // Вісник ЛДУ, серія мех.-мат. – 1971. – № 6.
3. Кизыма, Я.М. Осесиметричные контактные задачи теории упругости и термоупругости [Текст] / Я.М. Кизыма, Д.В. Грилицкий. – Львов : Изд-во при Львов. ун-те, 1981. – 136 с.
4. Максимович, В.Н. Численно-аналитические решения задачи термопластичности для локального нагрева пологих оболочек [Текст] / В.Н. Максимович, Л.В. Хомляк // Известия АН СССР. Механика тверд. тела. – 1988. – № 5. – С. 126–132.
5. Подстригач, Я.С. Неустановившееся температурные поля и напряжения в тонких пластинках [Текст] / Я. С. Подстригач, Ю. М. Коляно. – К. : Наукова думка, 1972. – 308 с.
6. Sinh N., Sinh A. Thermoelastic stresses in an anisotropic slab. Proc. Indian Acad. Sci., A. 171, №4, 1970.
7. Новацкий, В. Вопросы термоупругости [Текст] / В. Новацкий. – Изд-во АН СССР, 1962. – 365 с.
8. Снеддон, И.Н. Преобразования Фурье [Текст] / И.Н. Снеддон – М.: Изд-во ИЛ, 1955. – 668 с.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2014.

УДК 621.923.6

А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут»

**ТОНКЕ АЛМАЗНЕ ШЛІФУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ З КОМПОЗИТИВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН**

*Метою роботи є експериментальне дослідження процесів тонкого алмазного шліфування деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі відходів алюмінієвих сплавів для поліграфічних машин. Вперше показано, що основні закономірності тонкого прецизійного алмазного шліфування нових композиційних матеріалів на основі відходів алюмінієвих сплавів співпадають при плоскому, круглому зовнішньому та внутрішньому шліфуванні. Доведено, що на параметр якості поверхні оброблення  $R_a$  суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки алмазного круга та режими тонкого алмазного шліфування. Найкращі показники параметру  $R_a$ , які задовольняють високі вимоги до робочих поверхонь деталей тертя, забезпечують шліфувальні круги з синтетичного алмазу АС зернистістю 14 – 28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці та тонкі режими різання. Показано переваги обробки поверхонь алмазними кругами. Розроблено рекомендації з вибору режимів різання для тонкого алмазного шліфування деталей тертя різного технологічного призначення, що виготовляються з композиційних сплавів на основі відходів алюмінію, і які забезпечують вимоги отримання необхідних параметрів шорсткості поверхні.*

*Ключові слова:* нові композитні матеріали, відходи алюмінієвих сплавів, інструмент, деталі тертя, шорсткість поверхні, тонке алмазне шліфування.

*Рис. 2. Табл. 5. Форм. 4. Літ. 21.*

А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк

**ТОНКОЕ АЛМАЗНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТРЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ МАШИН**

*Целью работы является экспериментальное исследование процессов тонкого алмазного шлифования деталей трения из новых композиционных материалов на основе отходов алюминиевых сплавов для полиграфической техники. Впервые показано, что основные закономерности тонкого прецизионного алмазного шлифования новых композиционных материалов на основе отходов алюминиевых сплавов совпадают при плоском, круглом внешнем и внутреннем шлифовании. Доказано, что на параметр качества поверхности обработки  $R_a$  существенно влияют зернистость, материал связки алмазного круга и режимы тонкого алмазного шлифования. Наилучшие показатели параметра  $R_a$ , которые удовлетворяют высокие требования к рабочим поверхностям деталей трения, обеспечивают шлифовальные круги из синтетического алмаза АС зернистостью 14–28 мкм на бакелитно-резиновой связке и тонкие режимы резания. Показаны преимущества обработки поверхностей алмазными кругами. Разработаны рекомендации по выбору режимов резания для тонкого алмазного шлифования деталей трения различного технологического назначения, которые изготавливаются из композиционных сплавов на основе отходов алюминия и обеспечивают требования получения необходимых параметров шероховатости поверхности.*

*Ключевые слова:* новые композитные материалы, отходы алюминиевых сплавов, инструмент, детали трения, шероховатость поверхности, тонкое алмазное шлифование.

A.P. Gavrish, T.A. Roik, Yu. Yu. Vitsiuk

**FINE DIAMOND GRINDING OF FRICTION PARTS BASED ON ALUMINIUM COMPOSITES FOR PRINTING MACHINES**

*The purpose of work is the experimental researches of fine diamond grinding of friction parts from new composite materials based on aluminium alloys wastes for printing equipment. For the first time it was shown the main regularities of fine precision diamond grinding of new composite materials based on aluminium alloys wastes agree with plain, round external and internal grinding. It was demonstrated the tool granularity, diamond disc's material of bond and fine diamond grinding parameters essentially influence for surface's parameter  $R_a$ . Grinding discs from synthetic diamond AC with granularity 14–28  $\mu\text{m}$  on bakelite-gum bond and fine parameters of cutting ensure the best value of parameters  $R_a$ , which satisfy the high requirements for friction parts surface quality. It was shown the advantages of surfaces' treatment by diamond discs. It was developed the recommendations for choice of cutting parameters for diamond grinding of parts for different purposes that are manufactured from composite alloys based on aluminium alloys wastes and which ensure the requirements for necessary parameters of surface roughness.*

*Keywords:* new composite materials, aluminium alloys wastes, tool, friction parts, surface' roughness, fine diamond grinding.

**Постановка проблеми.** У конструкціях новітнього обладнання поліграфічної галузі набули широкого розповсюдження зносостійкі композиційні матеріали, які одержані з цінної та дешевої сировини – промислових шліфувальних відходів кольорових металів, насамперед, алюмінієвих сплавів та які, на жаль, навіть на сьогодні, здебільше вивозяться у відвали і не використовуються у повторному циклі виробництва.

На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів [1, 2] в останні роки були створені оригінальні високозносоустійкі композиційні сплави на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АК8М3ч та АК12ММгН + (9 – 12 %) MoS<sub>2</sub> [3-6]. Вони пройшли всебічну перевірку в умовах дії агресивного оточуючого середовища (кисень, повітря, виробничий пил з абразивною властивістю, температурні навантаження при експлуатації у межах 100 – 170 °С, питомі навантаження до 7 МПа) і широко застосовуються для виготовлення деталей тертя (скоби, направляючі, затли та інші) у ножових різальних машинах поліграфії типу WOHLENBERG Trim-tec 560, у висікальному обладнанні паперу та картону типів DROSSERTST-6, BOBSTMISTRAL 110 A2, машин легкої промисловості (автооператорів панчочов'язальних машин типу PALERMO – 105SR, укладачів швидкісних ткацьких верстатів SPRINT – 1205PI) та машин харчової промисловості (лоткові системи, маніпулятори і затискувачів).

Зносостійкий матеріал на основі алюмінієвого сплаву АК12ММгН з домішками твердого мастила (дисульфід молібдену MoS<sub>2</sub>) набув визнання у конструкторів і наразі широко використовується у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють при підвищених навантаженнях і температурах без змащування рідким мастилом.

Відомо [7-9], що зносостійкість деталей, як один із головних параметрів надійності обладнання, суттєво залежить від параметрів якості поверхонь тертя і, в першу чергу, від шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару. Ці параметри формуються на фінішних операціях тонкого абразивного оброблення.

Деякі основні властивості нових зносостійких композиційних матеріалів на основі алюмінію наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Фізико-механічні та антифрикційні властивості композитів на основі алюмінію

Властивості композитів	Марка композиційного сплаву			
	АК12М2МгН [3]	АМ4,5Кд [4]	АК8М3ч [5]	АК12ММгН + (9-12)% MoS <sub>2</sub> [6]
Межа міцності на розтяг, МПа	180 - 185	187-190	187-195	190-197
Твердість НВ, МПа	550 -570	580-600	590-610	595-615
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	0,18 - 0,30	0,22- 0,34	0,25 - 0,35	0,27-0,37
Коеф. тертя при 5 МПа	0,0075 - 0,0080*	0,0077 - 0,0082**	0,0045 - 0,0048**	0,0038-0,0050**
Інтенсивність зношування при 5 МПа	3,9*	5,3*	2,66-2,69**	2,61-2,65
Інтенсивність зношування контртіла при 5 МПа	Сліди	0,005*	0,002**	сліди
Гранична температура, °С	120	170	150	155
Граничне навантаження, МПа	7	7	6**	6,5**

Примітка: \* - випробування при 100 °С; \*\* - випробування при 150 °С; змащування індустриальним мастилом «І – 20» в парі з контртілом зі сталі 45 (45 - 48 HRC)

У зв'язку з тим, що нові композиційні сплави на основі алюмінію знайшли своє використання у машинобудуванні та приладобудуванні відносно нещодавно, розгалужених та всебічних досліджень процесів їх тонкого абразивного оброблення до цього часу практично немає. Зроблено лише перші кроки у цьому напрямку, зокрема, є поодинокі публікації, присвячені дослідженню впливу складу інструменту та режимів різання на параметри шорсткості поверхонь при тонкому абразивному шліфуванні [7 - 9].

Виходячи із загальних положень теорії абразивного оброблення матеріалів [10-14] та враховуючи специфічні властивості композиційних сплавів на основі алюмінію, було б вельми корисним для формування необхідних параметрів шорсткості поверхонь тертя при їх обробленні

застосовувати шліфувальні круги з надтвердих синтетичних матеріалів, зокрема, з синтетичного алмазу АС. На жаль, досліджень у цьому напрямку до сьогодні не велось. Це, безумовно, є перешкодою до повного використання усіх резервів підвищення зносостійкості за рахунок використання, притаманних лише їм, властивостей найновітніх марок композитів на основі алюмінію і, у тому числі, зростання параметрів зносостійкості, надійності та довговічності шляхом формування найкращих параметрів шорсткості методами тонкого алмазного шліфування.

В науково-технічній літературі є багато публікацій по застосуванню інструментів з надтвердих синтетичних алмазів для обробки деталей різних галузей виробництва [10-19]. Науковцями та практикою провідних машинобудівних підприємств доведено, що застосування алмазного шліфування (перш за все, завдяки особливостям інструменту) дозволяє отримати найкращі показники якості оброблюваних поверхонь.

Втім відсутність технологічних рекомендацій з алмазного шліфування високолегованих та важкооброблюваних композитних сплавів призводить до застосування на практиці різних технологічних схем шліфування, далеко не завжди оптимальних. Вказане викликає поширення різних технологій, часто суттєво протирічних, і які здебільшого створені відповідно до можливостей того чи іншого підприємства.

Тому дослідження технологічних процесів тонкого алмазного шліфування композиційних матеріалів на основі алюмінію є актуальним питанням, що має безсумнівне як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення для технологів-виробничників.

**Мета і завдання.** Метою даної роботи було дослідження параметрів шорсткості поверхонь при тонкому алмазному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних матеріалів на основі алюмінію АК12М2МгН, АМ4,5Кд, АМ8МЗч та АК12ММгН + (9–12 %) MoS<sub>2</sub> та встановлення впливу зернистості шліфувального круга, типу зв'язки інструменту і основних режимів різання на якісні показники поверхонь оброблення досліджуваних деталей тертя.

**Результати досліджень.** Експериментальні дослідження з означеної науково-технічної задачі виконувались згідно з методикою наведеною у роботах [2, 7-10]. Їх результати наведені у табл. 2.

Аналіз даних табл. 2 показує, що параметр шорсткості R<sub>a</sub> змінюється зі зміною режимних факторів оброблення—глибини шліфування, поперечної та поздовжньої подач.

Таблиця 2. Параметр шорсткості R<sub>a</sub> при тонкому плоскому шліфуванні композитного сплаву АК12М2МгН [3]

Поперечна подача S <sub>поп</sub> , мм/подв. хід	Швидкість виробу (поздовжня подача) V <sub>в</sub> м/хв.	Глибина шліфування t, мм		
		0,002	0,01	0,05
		R <sub>a</sub> , мкм		
0,1	2	0,212	0,340	0,380
	5	0,315	0,350	0,400
	10	0,330	0,395	0,440
0,2	2	0,370	0,410	0,455
	5	0,395	0,435	0,445
	10	0,410	0,465	0,580
0,5	2	0,490	0,500	0,600
	5	0,545	0,565	0,670
	10	0,610	0,620	0,700
1,0	2	0,680	0,705	0,770
	5	0,740	0,775	0,820
	10	0,800	0,840	0,890

Примітки: Верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН), абразив – алмаз синтетичний АСМ14Бр1 100% на бакелітно-гумовій зв'язці БР1, швидкість круга – 25 м/с, обробка без охолодження

Обробка експериментів за допомогою статистичних методів, зокрема, із застосуванням методу Ст'юдента для випадку залежних змінних оброблених зразків при фіксованих значеннях двох варіюючих величин (наприклад, V<sub>в</sub>, t) та при змінній третій величині (наприклад, S<sub>поп</sub>), показала, що досліджені сукупності суттєво різні.

Аналогічні результати отримані при порівнянні вибірок для подач 0,1 – 1,0 мм/подв. хід та швидкостей 2 – 10 м/хв. Слід зауважити, що зі збільшенням різниці між подачами порівнюваних

вибірок і різниці між швидкостями відмінності між табличним та розрахунковим розподілом Ст'юдента зростають. Це дозволяє зробити висновок, що існує зв'язок між параметром шорсткості поверхні  $R_a$  та глибиною різання  $t: R_a = f(t), S_{\text{поп}} = \text{const}, V_B = \text{const}$ .

Використовуючи методи математичної статистики, неважко показати, що існує зв'язок між параметром  $R_a$  та поперечною подачею  $S_{\text{поп}}: R_a = f(S_{\text{поп}}), V_B = \text{const}, t = \text{const}$ .

Аналогічний статистичний зв'язок існує між параметром шорсткості  $R_a$  та швидкістю  $V_B: R_a = f(V_B), S_{\text{поп}} = \text{const}, t = \text{const}$ .

Дослідження фактичного зв'язку між шорсткістю поверхні та режимними факторами шліфування методами кореляційного аналізу дозволило встановити кількісні співвідношення між досліджуваними факторами.

Для отримання рівняння множинної кореляції на основі наведених експериментальних даних були знайдені коефіцієнти кореляції парних залежностей  $R_a - t; R_a - S_{\text{п}}; R_a - V_B; S_{\text{поп}} - V_B; S_{\text{поп}} - t; t - V_B$ .

Проведені розрахунки показують, що між факторами  $R_a, S_{\text{поп}}, V_B, t$  існує щільний лінійний зв'язок. Формальний математичний аналіз показує, що між факторами  $S_{\text{поп}} - t, t - V_B, S_{\text{поп}} - V_B$  зв'язок відсутній, хоча це видно із загальних технічних міркувань. Отримані коефіцієнти кореляції  $r_k$  далекі від 1. Це свідчить про те, що крім даного фактору (для якого визначено  $r_k$ ), на  $R_a$  впливають й інші фактори. Значення коефіцієнтів кореляції вказує на ступінь впливу на шорсткість поверхні досліджуваних факторів.

Найбільший вплив на параметр шорсткості  $R_a$  чинять глибина різання  $t$  та поперечна подача  $S_{\text{поп}}$ , найменше – швидкість випробу  $V_B$ .

Рівняння множинної кореляції для досліджуваних факторів має вигляд:

$$R_a = 0,2655S_{\text{п}} + 5,1t + 0,0053V_B - 0,0441 \quad (1)$$

Аналіз формули (1) показує, що на параметр шорсткості  $R_a$  чинять найбільший вплив глибина шліфування  $t$  та поперечна подача  $S_{\text{п}}$ , а найменший – швидкість виробу  $V_B$ .

Точність цієї моделі можна підвищити, якщо розділити весь діапазон режимів плоского шліфування на дві групи:

I – а група:

- поперечна подача  $S_{\text{п}} = 0,01 - 0,02$  мм/подв.хід;
- глибина шліфування  $t = 0,002 - 0,100$  мм;
- швидкість виробу  $V_B = 2,0 - 4,0$  м/хв.

II – а група:

- поперечна подача  $S_{\text{п}} = 0,5 - 1,0$  мм/подв.хід;
- глибина шліфування  $t = 0,02 - 0,05$  мм;
- швидкість виробу  $V_B = 5,0 - 15,0$  м/хв.

Після деяких перетворень рівняння (1) може бути трансформоване і набуде вигляду:

I – а група:

$$R_a = 0,2655S_{\text{п}} + 5,12t + 0,0053V_B - 0,0065 \quad (2)$$

II – а група:

$$R_a = 0,2547S_{\text{п}} + 5,31t + 0,0055V_B - 0,0546 \quad (3)$$

Розраховані за формулами (2) і (3) значення  $R_a$  відрізняються від експериментальних на 12 – 15%, що дозволяє використовувати дані формули для практичних розрахунків. Наприклад, знаючи конкретні значення  $S_{\text{поп}}, t, V_B$  для даного ельборового інструменту, можна орієнтовно визначити яким буде параметр  $R_a$  та оцінити (з точки зору вимог, що висуваються до підшипників) прийнятність вибраних режимів шліфування.

Слід зазначити, що отримані висновки підтверджуються також при тонкому алмазному шліфуванні кругами різної зернистості М50, М28, М14, М7. Відповідні експериментальні дані наведені у табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 дозволяє зробити суттєві практичні висновки: найменшу шорсткість поверхні у досліджуваному діапазоні зернистості інструменту (7 – 100 мкм) забезпечують алмазні круги з зернистістю 7 мкм. Ці результати можуть бути пояснені загальними положеннями теорії шліфування.

**Таблиця 3. Вплив зернистості інструменту на параметр шорсткості поверхні  $R_a$  при тонкому плоскому алмазному шліфуванні деталей з композитних сплавів на основі алюмінію [3-5]**

Характеристика ельборового (ЛО) інструменту	Матеріал зразків		
	AK12M2MГH	AM4,5Kд	AK8M3ч
	$R_a$ , мкм		
AC10Bp1 100%	0,890	0,871	0,855
AC 5Bp1 100%	0,850	0,835	0,815
AC M28Bp1 100%	0,261	0,240	0,260
AC M20 Bp1 100%	0,225	0,207	0,210
AC M14 Bp1 100%	0,212	0,203	0,195
AC M10 Bp1 100%	0,201	0,190	0,186
AC M7 Bp1 100%	0,181	0,174	0,163
63CM14Гл	0,673	0,621	0,615
63CM7Гл	0,367	0,358	0,345

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; обробка – без охолодження

Дійсно, збільшення шорсткості поверхонь зі зростанням зернистості обумовлюється збільшенням перерізу  $a_z$  зрізу шару металу. Покращення шорсткості також пояснюється і тим, що зерна алмазу мають достатньо гостру форму (мінімальний кут загострення при вершині зерна) та найменший (у порівнянні з зернами карбїду кремнію зеленого та електрокорунду) радіус округлення одиничного зерна (табл. 4.) [10, 17-19].

**Таблиця 4. Середні значення геометрії кута ріжучих зерен у різних абразивних матеріалів**

Абразивний матеріал	Зернистість	Геометрія вершини зерна	
		Радіус заокруглення $\rho$ , мкм	Кут при вершині, град.
Алмази природні	A10/8	2,8	78,1
	A6/5	2,3	73,3
	AM14/10	1,6	70,2
Алмази синтетичні	AC10/8	2,2	57,4
	AC6/5	1,1	52,2
	ACM14/10	0,7-0,8	49,5
Ельбор	63C10	7,5	95,1
	63CM28	2,3	92,1
	63CM14	2,0	90,6
Карбїд кремнію зелений	ЛО10/8	2,25	58
	ЛО6/5	1,15	53
	ЛОМ14/10	0,8-0,85	50,1
Електрокорунд білий	23A10	9,5	98,3
	23AM28	2,7	94,7
	23AM14	2,4	92,5

В результаті математичної обробки експериментальних даних було отримано кореляційне рівняння зв'язку параметру шорсткості  $R_a$  з зернистістю A алмазного інструменту, що має вигляд:



$$R_{\alpha} = 0,0051S_{\pi} - 0,0069 \quad (4)$$

Таким чином, знаючи зернистість алмазного шліфувального круга А можна розрахувати параметр шорсткості  $R_a$  і впевнитись у тому, що вибраний інструмент забезпечить вимоги до якості робочих поверхонь деталей тертя. Це значно спрощує зусилля технологів-практиків при виборі шліфувального інструменту під час проектування технологічних процесів.

Суттєвим питанням є і те, як впливає склад зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості поверхні  $R_a$ , результати дослідження якого наведені у табл.5.

Попередньо доцільно зауважити, що природні алмази (А), зерна яких мають найгострішу форму більш ефективні (з точки зору забезпечення параметру шорсткості  $R_a$  та продуктивності шліфування) при обробці таких матеріалів, як алюміній, мідь, латунь. Проте не слід забувати, що це найкоштовніший інструмент. Тому у всіх подальших експериментах по дослідженню процесів тонкого алмазного шліфування композитів на основі алюмінію застосовувались інструменти з алмазу синтетичного марки АС.

Зазначимо, що основні експерименти проводились на зразках композитів на типу АК12М2МгН і дещо обмежена кількість дослідів виконувалась на зразках композитів інших марок, для встановлення загальних закономірностей.

Аналізуючи дані табл. 5, необхідно зазначити, що найкращі значення параметрів шорсткості  $R_a$  поверхонь оброблення деталей з нових композитних сплавів на основі алюмінію забезпечують алмазні круги на бакелітно-гумовій зв'язці Бр1. Це може бути пояснено її більш еластичною здатністю і, таким чином, при шліфуванні (під час вривання абразивного зерна у метал) під дією складових сил різання кожне зерно начебто демфується в напрямку пружно-еластичного середовища зв'язки. Це обумовлює фактичне зменшення глибини різання. Отже, змінюються умови формування шорсткості поверхні оброблення і, як наслідок, зменшується параметр шорсткості  $R_a$ , який є одним із найголовніших факторів, що характеризує якість поверхні після тонкого ельборового шліфування.

**Таблиця 5. Вплив матеріалу зв'язки алмазного круга на параметр шорсткості обробленої поверхні  $R_a$  зразків з композитів на основі алюмінію АК12М2МгН при плоскому шліфуванні**

Характеристика абразивного інструменту	Матеріал зв'язки круга	Параметр шорсткості $R_a$ , мкм
АС5Б1 100 %	Бакелітна Б1	0,920
АС5Бр 100 %	Бакелітно-гумова Б1	0,850
АС5К1 100 %	Керамічна К1	1,210
АС5М1 100 %	Металева М1	1,105
АСМ28Б1 100 %	Бакелітна Б1	0,300
АСМ28Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,261
АСМ28К1 100 %	Керамічна К1	0,490
АСМ14Б1 100 %	Бакелітна	0,225
АСМ14Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,212
АСМ14К1 100 %	Керамічна	0,300
АСМ10Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,201
АСМ7Бр1 100 %	Бакелітно-гумова Бр1	0,181

Примітки: Верстат – FF-350 «Abawerk» (ФРН); режими різання: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача (швидкість виробу) – 2 м/хв; поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 0,002 мм; шліфування – без охолодження

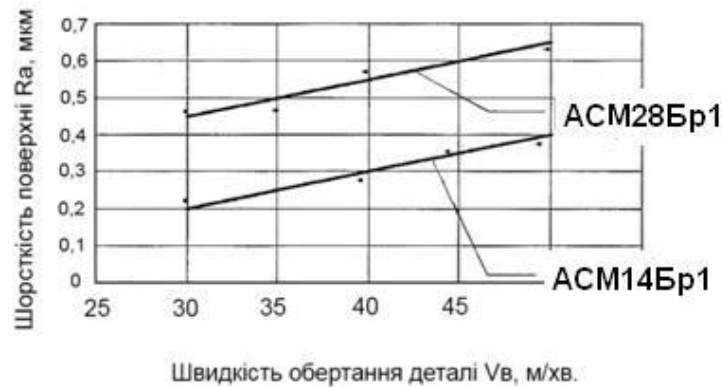
Слід зауважити, що ці висновки зроблені на підставі аналізу фактичних даних, отриманих під час експериментального дослідження із застосуванням широкої гами зв'язок (бакелітна, керамічна, металева, бакелітно-гумова) та зернистостей алмазного круга (100, 28, 14, 10 та 7 мкм).

Приймаючи до уваги те, що фізичні явища у процесі різання металів принципово подібні для плоского, зовнішнього круглого та внутрішнього шліфування, експериментальне дослідження процесів зовнішнього круглого і внутрішнього алмазного шліфування деталей тертя з композитних матеріалів на основі алюмінію виконувалось з урахуванням вищенаведених результатів. Зокрема, для дослідів використовувались алмазні інструменти з синтетичного алмазу

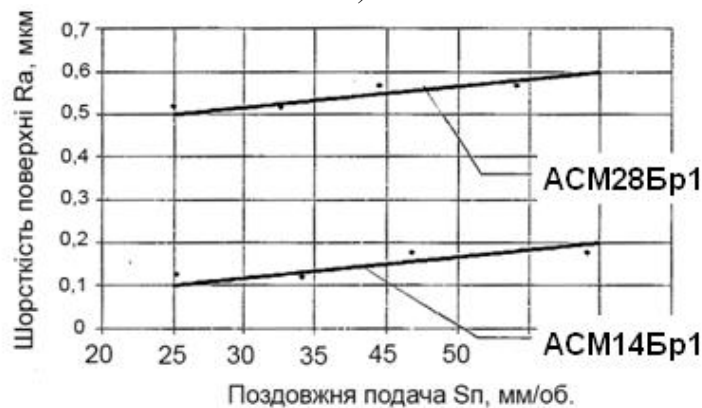
АС зернистістю 14 – 28 мкм, які сформовані у шліфувальні круги бакелітно-гумовою зв'язкою (Бр1).

Зазначимо, що зовнішнє тонке алмазне кругле шліфування здійснювалось на прецизійному верстаті AS-250 «Werkzajt» (ФРН), а для внутрішнього шліфування застосовувався прецизійний внутрішньошліфувальний верстат надвисокої точності SS – 125 «Studer» (Швейцарія). Основні результати досліджень наведені на рис. 1, 2.

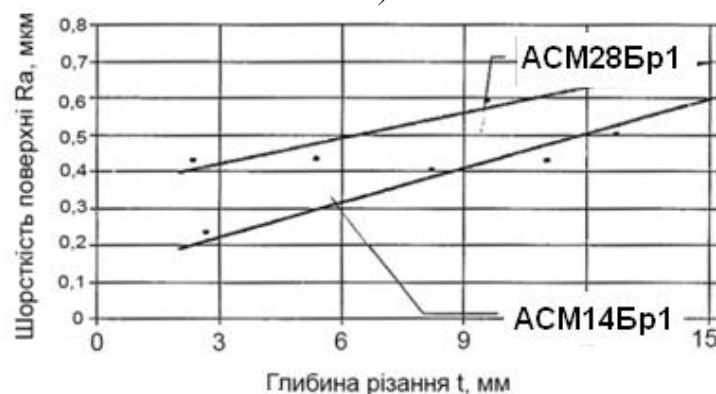
Аналіз експериментів (рис.1) показує, що на шорсткість поверхонь деталей з нових композитних матеріалів на основі алюмінію при тонкому зовнішньому круглому алмазному шліфуванні (як і при плоскому алмазному шліфуванні) суттєво впливають режими різання: швидкість виробу  $V_b$ , поздовжня подача  $S_n$  та глибина різання  $t$ , а також розмір зерна абразиву, та склад зв'язки алмазному інструменту.



а)



б)



в)

Рис. 1. Залежність параметрів шорсткості поверхні  $R_a$  деталей з композиційного сплаву АК12М2МГН на основі алюмінію від режимів тонкого ельборового шліфування  $V_b$ ,  $S_n$ ,  $t$  при зовнішньому круглому шліфуванні (швидкість кругу –  $V_{кр} = 35$  м/с): а)  $S = 5$  мм/об.;  $t = 2$  мкм; б)  $V_b = 30$  м/хв.;  $t = 2$  мкм; в)  $V_b = 30$  м/хв.;  $S_n = 5$  м/об

Аналогічно з плоским алмазним шліфуванням найкращу якість оброблених зовнішніх поверхонь композитних циліндричних деталей (за параметром шорсткості  $R_a$ ) тонким алмазним круглим зовнішнім шліфуванням забезпечує застосування інструментів з синтетичних алмазів (АС) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), зернистістю 14–28 мкм (М14 – М28) та застосування тонких режимів шліфування ( $V_b \rightarrow \min; S_n \rightarrow \min; t \rightarrow \min$ ).

Схожі результати отримані при тонкому круглому внутрішньому ельборовому шліфуванні робочих поверхонь деталей тертя з нових композитних сплавів на основі алюмінію АК12ММГН + (9 – 12) % MoS.

Результати експериментів наведені на графіках (рис. 2).

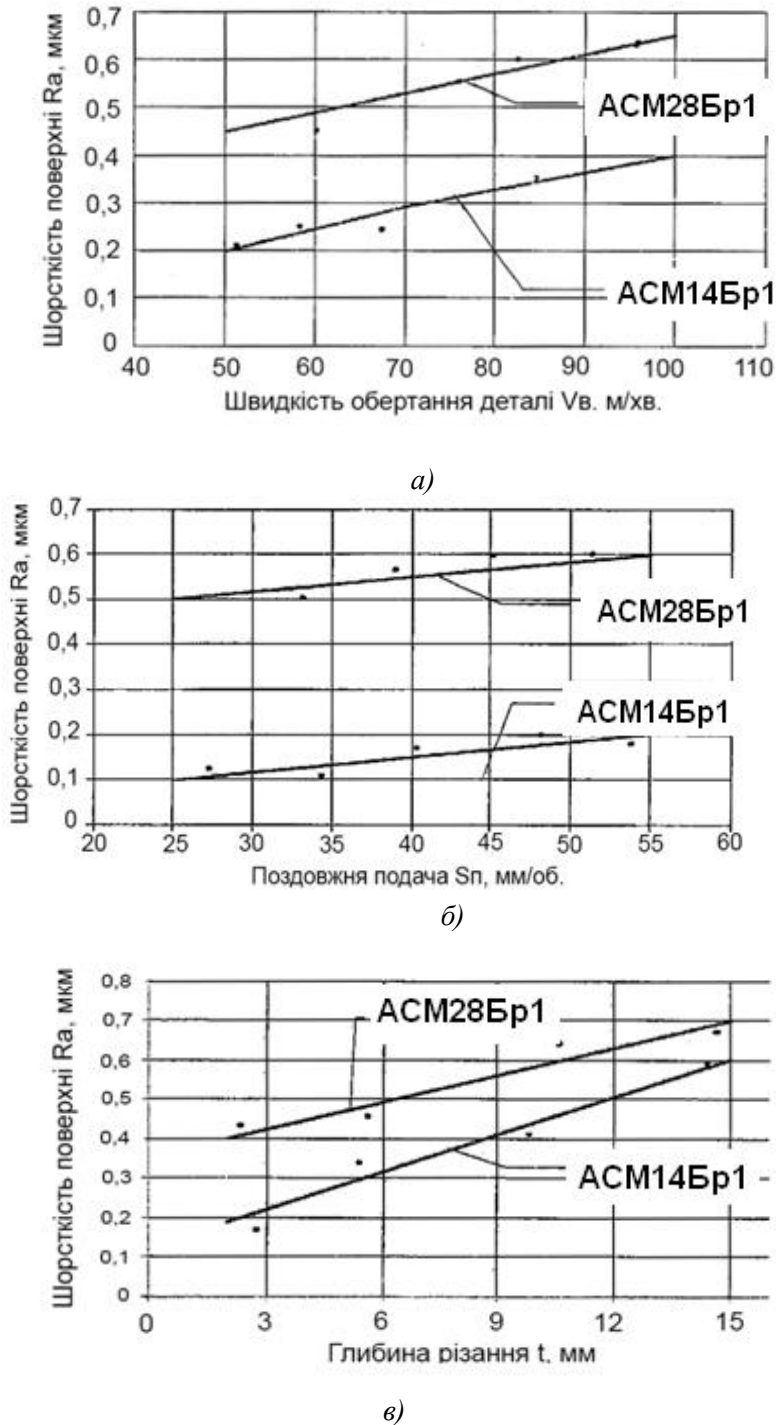


Рис. 2. Залежність параметрів шорсткості поверхні  $R_a$  деталей з композиційного сплаву АК12ММГН + (9 – 12) % MoS<sub>2</sub> від режимів тонкого ельборового шліфування  $V_b, S_n, t$  при тонкому круглому внутрішньому шліфуванні (швидкість ельборового круга –  $V_{кр.} = 45$  м/с):  
 а)  $S_n = 30$  мм/об.;  $t = 2$  мкм; б)  $V_b = 50$  м/хв.;  $t = 2$  мкм; в)  $V_b = 50$  м/хв.;  $S_n = 30$  мм/об

Аналіз рис. 2 показує, що при застосуванні для прецизійного внутрішнього алмазного шліфування деталей з нових композиційних сплавів на основі алюмінію з використанням для оброблення алмазних кругів з синтетичного алмазу АС зернистістю 14-28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці, на параметр шорсткості поверхні оброблення  $R_a$  найбільше впливають глибина різання  $t$ , поздовжня подача  $S_n$  та швидкість обертання деталі  $V_v$ . Найкращі результати за параметром якості  $R_a$  (тобто отримання мінімальної шорсткості поверхні) забезпечують тонкі режими алмазного шліфування, а саме, мінімальні можливі (з точки зору технічних можливостей верстата) режими різання – глибина шліфування, поздовжня подача та швидкість обертання деталі.

**Висновки.** Узагальнюючи комплекс виконаних досліджень, необхідно зробити важливі як наукові, так і практичні висновки.

1. Вперше досліджено процеси тонкого алмазного шліфування нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенерованих шліфувальних відходів виробництва деталей з алюмінію, що відкриває можливості одержання високоякісних деталей тертя з нових композитів для поліграфічних машин.

2. Показано, що основні закономірності тонкого прецизійного алмазного шліфування нових композиційних сплавів співпадають при плоскому, круглomu зовнішньому та внутрішньому шліфуванні.

3. Доведено, що на параметр якості поверхні оброблення  $R_a$  суттєво впливають зернистість, матеріал зв'язки алмазного круга та режими тонкого алмазного шліфування.

4. Найкращі показники параметру  $R_a$ , які задовольняють високі вимоги до поверхонь деталей тертя технологічних комплексів і машинних систем, забезпечують шліфувальні круги з синтетичних алмазів АС зернистістю 14 – 28 мкм на бакелітно-гумовій зв'язці та тонкі режими різання, а саме:

- для плоского алмазного шліфування: швидкість круга – 25 м/с, поздовжня подача – 2 м/хв., поперечна подача – 0,1 мм/подв.хід; глибина різання – 2 мкм;
- для зовнішнього круглого алмазного шліфування: швидкість абразивного круга – 35 м/с, швидкість виробу (деталі) – 30 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм;
- для круглого внутрішнього алмазного шліфування: швидкість круга – 45 м/с, швидкість виробу – 50 м/хв., поздовжня подача – 30 мм/об., глибина різання – 2 мкм.

Подальші дослідження будуть спрямовані на виконання експериментів та встановлення закономірностей формування параметрів якості поверхонь оброблення нових композитних деталей тертя машин, зокрема параметрів шорсткості та фізичних властивостей поверхневого шару оброблення при тонкому шліфуванні із застосуванням найновітніх шліфувальних інструментів-кругів на основі кубоніту та борозону, що обумовить реалізацію подальших кроків для підвищення зносостійкості деталей такого типу.

1. Роїк Т.А., Киричок П.О., Гавриш А.П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації: монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 404 с.
2. Киричок П.О., Роїк Т.А., Шевчук А.В., Гавриш А.П., Лотоцька О.І. Технологія поліграфічного машинобудування: Учебний посібник. – К.: вид. НТУУ «КПІ», 2014.– 404 с.
3. Патент України № 60174 А, МКИ С22С 21/02. Порошковий антифрикційний матеріал на основі алюмінію /Комнацький О. Л., Роїк Т. А., опубл. 15.09.2003, Бюл. №9.
4. Пат. 34407 Україна, МКИ С22С21/02 Композиційний підшипниковий матеріал на основі алюмінію /Роїк Т. А., Гавриш А.П., Гавриш О.А., Холяк В.В., Прохоренко О.М. – опубл. 11.08.08, Бюл. № 15.
5. Патент України №26862, МКИ С22С21/02. Антифрикційний матеріал на основі алюмінію/ Роїк Т.А., Гавриш А.П., Киричок П.О., Гавриш О.А. –опубл.10.10.2007, Бюл. №16.
6. Патент України № 75523, МПКС22С21/02(2006.01) Зносостійкий матеріал на основі алюмінієвого сплаву / Роїк Т.А., Гавриш А. П., Гавриш О.А., Киричок П.О., Віцюк Ю.Ю., Мельник О. О., Замулко С.О., Дорфман І. Є. опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.
7. Гавриш А.П., Шевчук А.В., Роїк Т.А., Ковальов В.А., Віцюк Ю.Ю., Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні//Технологія і техніка друкарства. – №3 (37). – 2012. – С. 119-127.
8. Гавриш А.П., Мельник О.О., Роїк Т.А., Аскеров М.Г., Гавриш О.А. Нові технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації: Монографія. – К.: НТУУ „КПІ”, 2012. – 196 с.
9. Гавриш А.П., Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю., Олійник В.Г., Дорфман І.Є. Розробка технологічних режимів тонкого абразивного шліфування зносостійких деталей поліграфічної техніки з нових композитів на основі алюмінію // Технологічні комплекси. – №1 (9), 2014, – С. 75 – 87.
10. Гавриш А.П., Мельничук П.П. Фінішне алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів: Монографія. – Житомир: вид. Житомирського ДТУ, 2004.– 551 с.

11. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов.– М.: Машиностроение, 1974.– 320 с.
12. Ящерицын П.И. Прогрессивная технология финишной обработки деталей. – Минск: Беларусь, 1989.– 312 с.
13. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования.– К.: Наукова думка, 1978.– 207 с.
14. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. К.: Техника, 1971.– 144 с.
15. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования.– Харьков: Вища школа, 1985.– 298 с.
16. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Учебное пособие /Под. общ. ред. А.И. Грабченко.– Харьков: изд. ХГПУ, 1999.– 436 с.
17. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Доброскок В.Л., Залога В.О., Новоселов Ю.К., Якубов Ф.Я. Основи теорії різання матеріалів: Підручник/Під заг. ред. М. П. Мазура. – Львів.: Новий світ, 2010. – 423 с.
18. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6 т./Под. общ. Н.В. Новикова.– К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАНУ, 2007.– Т. 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях обработки/Под. ред. А.А. Шепелева.– 340 с.
19. Лавриненко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: Енциклопедичний довідник/Під заг. ред. акад. НАН України М. В. Новікова. К.: вид. ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

УДК 621.867.42

**І.Б. Гевко, Ю.М. Тарасюк, В.М. Клендій**<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя<sup>2</sup>Вінницький національний аграрний університет**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГВИНТОВИХ ЗАВАНТАЖУВАЧІВ**

*Приведено конструкції гвинтових конвеєрів з бункерним завантаженням та гвинтових конвеєрів із завантаженням через насадки. Також приведена класифікація завантажувачів гвинтових транспортно-технологічних механізмів. Виведено аналітичні залежності для визначення конструктивних параметрів гвинтових завантажувачів.*

*Ключові слова:* гвинтовий завантажувач, насадка, транспортно-технологічний механізм.

*Рис. 5. Форм. 5. Літ. 7.*

**И.Б. Гевко, Ю.М. Тарасюк, В.Н. Клендий****ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВЫХ ПОГРУЗЧИКОВ**

*Приведены конструкции винтовых конвейеров с бункерной загрузкой и винтовых конвейеров с насадками. Также приведена классификация загрузчиков винтовых транспортно-технологических механизмов. Выведены аналитические зависимости для определения конструктивных параметров винтовых погрузчиков.*

*Ключевые слова:* винтовой погрузчик, насадка, транспортно-технологический механизм.

**I.B. Gevko, Y.M. Tarasyk, V.M. Klendiy****SUBSTANTIATION OF SCREW DOWNLOADER'S PARAMETERS**

*The constructions of screw conveyors with the bunker loading and screw conveyors with loading through the extensions were presented. Also the classification of screw transport and technological mechanisms loaders was shown. Analytical dependencies for determining the design parameters of screw downloader's were selected.*

*Keywords:* screw loader, extension, transport and technological mechanism.

Одним з найважливіших критеріїв роботи гвинтових конвеєрів (ГК) вважається продуктивність, яку необхідно забезпечувати як найбільшою за мінімальних енерговитрат. Тому для реалізації ефективного процесу перевантаження матеріалів з допомогою ГК необхідно забезпечувати їх оптимальне завантаження. При цьому слід врахувати, що завантаження ГК може відбуватися через бункери, насадки і завантажувальні пристрої.

Функціональне призначення бункерів ГК – накопичення, короткочасне зберігання та регульоване (нерегульоване) чи дозоване відвантаження матеріалу до вивантажувальної магістралі ГК за умови запобігання явища перевантаження шнека. За формою бункери ГК бувають квадратними, прямокутними, круглими (конічними, циліндричними), коритоподібними тощо. Функціональне призначення насадок ГК – бездеформаційний ввід спіралі в матеріал, її безпечна робота та здійснення оптимального завантаження кожуха ГК за умови запобігання явища перевантаження технологічного характеру і поломок транспортних засобів [1]. Насадки ГК поділяються на ті, за допомогою яких регулюється процес завантаження магістралей (з регульованими отворами) і ті, що не забезпечують процес регулювання (з постійними отворами). Функціональне призначення завантажувальних пристроїв – забезпечення завантаження ГК сипкими вантажами з площадок і ємкостей шляхом їх доправлення в шнек. Вони поділяються на ті, в яких завантажувальний пристрій розташований паралельно до основної транспортної магістралі (для завантаження конвеєра витікаючих з ємкостей матеріалів), і ті, в яких завантажувальний пристрій розташований перпендикулярно до основної транспортної магістралі (для підбирання з площадок і доправлення в магістраль матеріалів).

На рисунку 1 представлено типові ГК з бункерним завантаженням, де конструкції, зображені на рис. 1.б та рис. 1.в забезпечені бункерними решітками для унеможливлення потрапляння до жолоба значних частин, що можуть викликати поломки шнека.

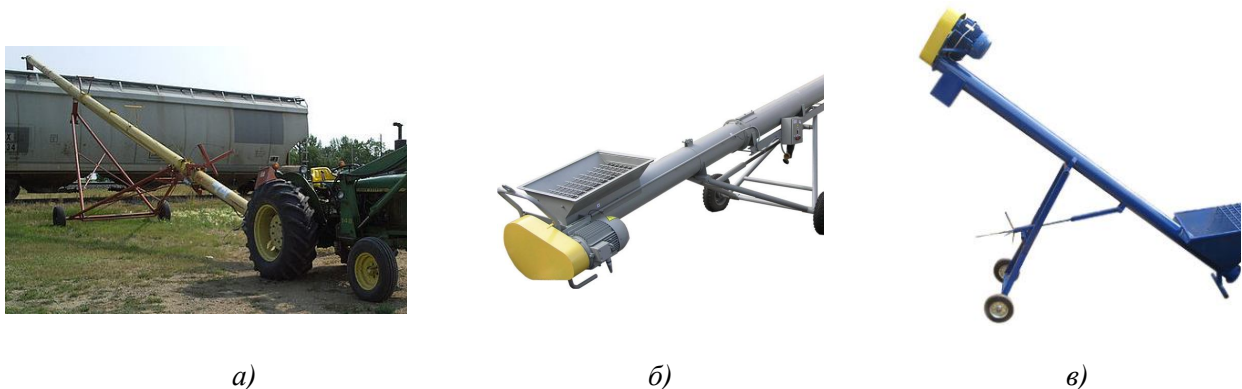


Рис. 1. Гвинтові конвеєри з бункерним завантаженням: а) з приводом від трактора (John Deere tractor, Canada, <http://uk.wikipedia.org/wiki>); б) пересувний КВП-60 (ПАТ «ЧеркасиЕлеваторМаш», <http://bronto.ub.ua>); в) пересувний (ПАТ «Завод Елеваторного Обладнання», м. Кіровоград, <http://www.kirelmash.com.ua>)

На рисунку 2 зображено жорсткі і гнучкі ГК, в яких завантаження здійснюється через насадки. Усі вони не забезпечують процес регулювання завантаження магістралей, що може призвести до перевантаження ГК, викликане технологічним процесом.



Рис. 2. Гвинтові конвеєри із завантаженням через насадки: а) (ПАТ «Завод елеваторного обладнання», м. Кіровоград, <http://transport-sv.com.ua>); б) (ООО «Промстройкомплект» Росія, <http://promstrojkomplekt.all.biz>); в) (ООО «Флона», Білорусія, <http://www.flona.by>); г) (ЕТ «КИСИ-Иван Маринов», Болгарія, <http://prodajba.net>); д) (ООО «ТехРесурс», Росія, <http://www.tehresurs-altay.ru>); е) (ООО ТД «БМЗ», Росія, <http://shneka.ru>)

На рисунку 3 представлено завантажувальні пристрої. Пристрої, зображені на рис. 3.а – рис. 3.г, призначені для завантаження транспортерів сипкими вантажами з площадок (в них завантажувальний пристрій у вигляді протилежно направлених шнеків розташований перпендикулярно до основної транспортної магістралі), а на рис. 3.д та рис. 3.е представлено гвинтовий розвантажувач вагонів (хоппер) У9-РХ-61, в якого завантажувальний пристрій розташований паралельно до основної транспортної магістралі (для завантаження конвеєра матеріалами, що подаються з вагонів).





**Рис. 3. Завантажувальні пристрої: а) завантажувач шнековий (ООО «Гарант-Агро», м. Кривий Ріг, <http://garantagro.com>); б) скребково-шнековий транспортер (ООО «Гарант-Агро», м. Кривий Ріг, <http://garantagro.com>); в) шнек підбору з землі зернових і технічних культур у вигляді приставки для завантаження транспортерів шнекових, стрічкових, норій (ООО «Гарант-Агро», м. Кривий Ріг, <http://garantagro.com>); г) шнековий забірний візок [2]; д) гвинтовий розвантажувач вагонів (хоппер) У9-РХ-61 в роботі (ПАТ «ЕКВІПТЕХ» м. Дніпропетровськ, [www.ekvipteh.com.ua](http://www.ekvipteh.com.ua)); е) гвинтовий розвантажувач вагонів У9-РХ-61 в роботі**

Для забезпечення надійної та продуктивної роботи ГК й унеможливлення їх поломок викликаних як випадковими, так і явищами технологічного характеру, необхідно використовувати захисні та регульовальні елементи. Так у ГК, завантаження яких здійснюється через бункер чи насадку, необхідно окрім захисних решіток використовувати регулюючі елементи, що забезпечують обсяг потрапляння певного матеріалу до магістралі за одиницю часу. Це забезпечуватиме, при їх правильному використанні, оптимальне завантаження магістралей та максимальну продуктивність при транспортуванні різноманітних матеріалів. Також у ГК, завантаження яких здійснюється через насадку можна використовувати запобіжні елементи, які можуть припинити завантаження магістралі шляхом відключення частину шнека, який знаходиться в насадці, при потраплянні до неї значних частин стороннього матеріалу, що можуть викликати поломки гвинта. Оптимальну величину завантаження конвеєрів з використанням завантажувальних пристроїв важко забезпечити (окрім тих, в яких завантажувальний пристрій розташований паралельно до основної транспортної магістралі). Враховуючи нерівномірність підбору з площадок і доправлення в магістраль матеріалів шнековими забірними візками їх транспортери (магістралі) повинні бути розраховані на максимальне завантаження. Окрім того, завантажувальні пристрої в обов'язковому порядку повинні бути оснащені запобіжними муфтами. Класифікацію завантажувачів гвинтових транспортно-технологічних механізмів за конструктивними ознаками представлено на рис. 4.

Виходячи з вище наведеного і враховуючи те, що питання протікання матеріалу через бункерні заслонки (шибери) детально відпрацьовано [6], необхідно зайнятись проблемою розробки і дослідження насадок ГК, що забезпечуватимуть регульований процес завантаження магістралей.



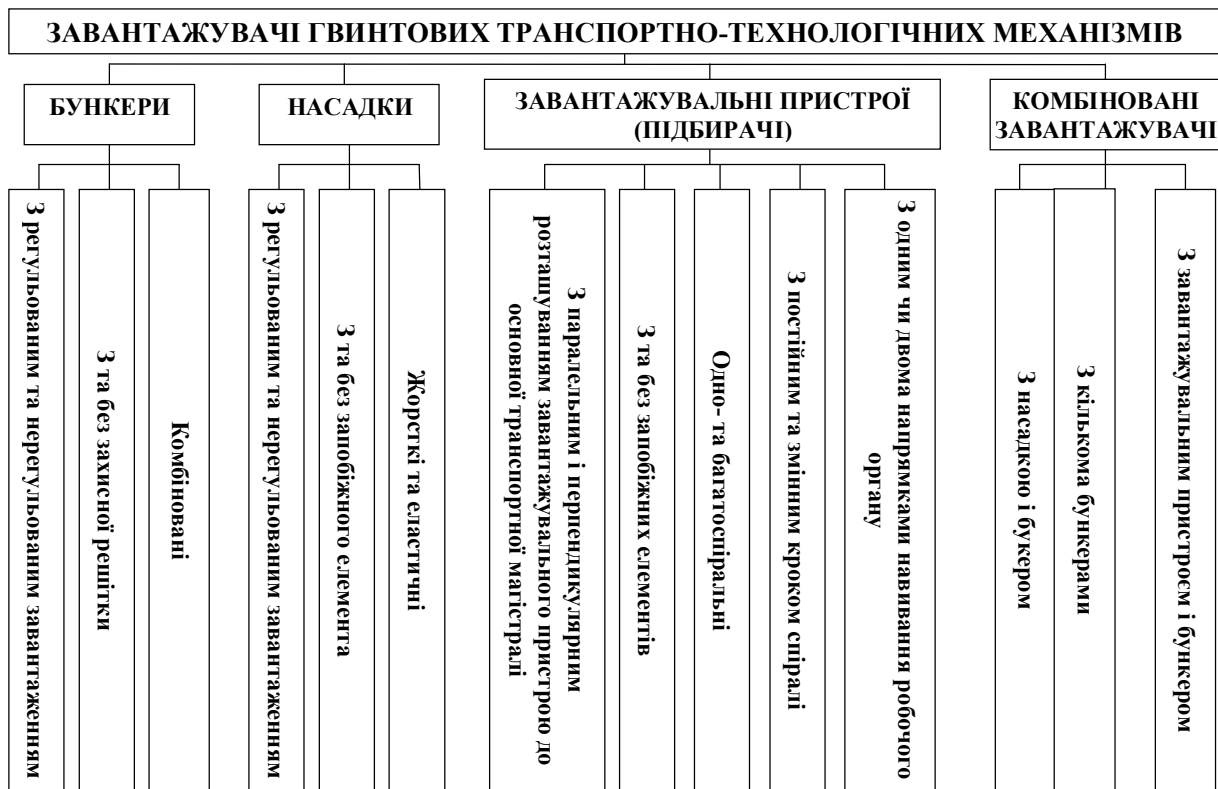


Рис. 4. Класифікація завантажувачів гвинтових транспортно-технологічних механізмів за конструктивними ознаками

Нами розроблено цілий ряд насадок, конструкції яких зображено на рис. 5. Конструкція самозавантажувальної насадки [3], яка зображена на рис 5.а, складається з конічної і циліндричної поверхонь, на останній з яких виконані радіальні отвори 2, що частково перекриваються відігнутими пелюстками 1. При введенні в сипкий матеріал магістралі ГК, насадка забезпечує захист спіралі від деформацій, а наявність отворів дає змогу матеріалу проникати до неї.

Самозавантажувальна насадка ГК [4], зображена на рис. 5.б, складається з наконечника 1 та циліндричних спіралей 2, між витками яких утворені зазори для просипання матеріалу. Для непопадання шнека в отвори між спіралями 2, напрям навівки останніх протилежний напрямку навівки транспортної спіралі. Відстань від вільного кінця шнека до кінця циліндричної частини насадки визначається з залежності:

$$h \geq l \cdot n,$$

де  $l$  – величина зазору між сусідніми витками спіралі ;  $n$  - кількість витків спіралі .

При введенні насадки в матеріал, витки циліндричної спіралі 2 під дією сили введення деформуються, що не призводить до деформації шнека. Після введення витки спіралі 2 під дією пружних сил займають початкове положення, що забезпечує просипання матеріалу в середину насадки.

Самозавантажувальна насадка ГК [5] для бездеформаційного введення шнека в матеріал (рис. 5.в.) складається з кожуха 1 і наконечника 2. Після введення насадки в матеріал наконечник натягується на кожух і його пелюстки розкриваються, що дає змогу матеріалу проникати в кожух.

На рис. 5.г зображена насадка [2], яка складається з конічного наконечника 1 та циліндричної поверхні 2, що містить отвори довжиною  $a$  і шириною  $l$ . Зовнішня циліндрична поверхня насадки 2 знаходиться в тісному контакті з внутрішньою поверхнею обмежувача 4, який містить аналогічні отвори  $a \cdot l$ . Ширина ребер 3, що знаходиться між отворами, рівна  $b$ . Провертанням обмежувача 4 відносно циліндра 2, можна регулювати величину отворів просипання для раціонального завантаження насадки й дотримання встановлених норм виконання технологічного процесу транспортування, забезпечуючи при цьому межі від  $a \cdot l$  до  $a \cdot (l - b)$  (де  $a > l$ ;  $l \geq 1,5b$  ).

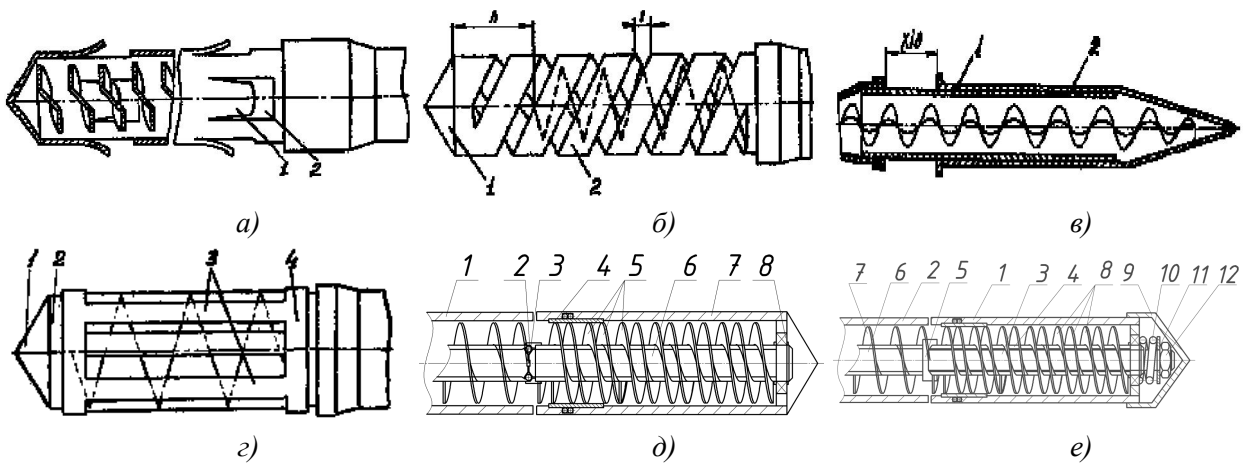


Рис. 5. Конструкції завантажувально-захисних насадок гвинтових конвеєрів

На рис. 5.д зображена запобіжна насадка, яка складається з втягуючої магістралі 1, на торці вала якої знаходяться лунки, в контакт з якими входять три кульки 2, розташовані через  $120^\circ$ , що знаходяться в отворах вала насадки 6. Кульки 2 підтиснуті тарілчастими пружинами 3, які знаходяться в отворі вала 6 і жорстко між собою з'єднані. Насадка складається з циліндричної поверхні 7, в якій виконані отвори для просипання транспортованого матеріалу, в якій розташовано в радіальному 4 та торцевому 8 підшипниках 3-х західний гвинт 5, що закріплений на валу 6. Якщо до насадки потрапляють сторонні предмети, які можуть викликати поломку спіралі, виникає зупинка 3-х західного гвинта 5 насадки й відключення його від шнека втягуючої магістралі шляхом виходу кульок 2 з лунок, які виконані на валу магістралі 1, через їх осьове зміщення й деформування пружин 3.

На рис. 5.е зображена запобіжна насадка, яка складається з втягуючої магістралі 6 з шнеком 7, що знаходиться в кожусі 2, на торці вала якої виконано три кулачки, що входять в контакт з аналогічними трьома кулачками 5, виконаними через  $120^\circ$ , що знаходяться на торці вала 3. З вала 3, який розташовано з можливістю осьового зміщення у валу 4, обертальний момент передається на вал 4 і закріплений на ньому 3-х західний гвинт 8 насадки 1. Гвинт 8 закріплено в радіальному 4 та торцевому 8 підшипниках. При потраплянні до насадки 1 через виконані в ній отвори для просипання транспортованого матеріалу сторонніх предметів, які можуть викликати поломку спіралі, виникає зупинка 3-х західного гвинта 8 насадки й відключення його від шнека втягуючої магістралі 6 шляхом розчеплення кулачкового з'єднання 5. При цьому проходить осьове зміщення вала 3 і стискання пружини 10, натяг якої регулюється підтиском гайки 12 через шайбу 11.

Отже, для забезпечення протікання нормального технологічного процесу транспортування ГК з втягуючою магістраллю, необхідно визначати оптимальні геометричні розміри отворів просипання насадок. Продуктивність ГК визначається за формулою [7]:

$$Q_{\text{ex}} = 0,25 \cdot \pi \cdot \varphi \cdot V_n \cdot (D_c^2 - d), \quad (1)$$

де  $D_{\text{ж}}$  - діаметр жолоба;  $d$  - діаметр вала;  $V_n$  - осьова швидкість переміщення вантажу в жолобі;  $\varphi$  - коефіцієнт заповнення міжвиткового простору.

Продуктивність вивантаження відповідно рівна продуктивності завантаження сипкого матеріалу. У випадку завантаження сипких вантажів через насадку, продуктивність визначається залежністю:

$$Q_{\text{ex}} = k_3 \cdot F \cdot n \cdot V_3, \quad (2)$$

де  $F$  - площа одного отвору;  $n$  - кількість отворів;  $V_3$  - швидкість засипання матеріалу;  $k_3$  - коефіцієнт завантаження ( враховує відношення робочої площі просипання до загальної,  $k_3 = 0.7 \dots 0.5$ ).

Швидкість просипання вантажу через отвір визначається по формулі [6]:

$$V_3 = \lambda \cdot \sqrt{3,2 \cdot g \cdot R}, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт просипання;  $R$  – гідравлічний радіус випускного отвору (відношення площі до периметру отвору);  $g$  - прискорення земного тяжіння.

Провівши відповідні перетворення, отримуємо залежність з якої можна визначити радіус отвору просипання [1]:

$$R = \sqrt[5]{\frac{\varphi^2 \cdot V_n^2 \cdot (D_{жс}^2 - d^2)}{25,6 \cdot k_3^2 \cdot n^2 \cdot \lambda^2 \cdot g}}. \quad (4)$$

Визначивши радіус отвору, можна через рівність площ визначити ширину прямокутного отвору з залежності [1]:

$$l = \frac{\pi}{a} \left[ \frac{\varphi^2 \cdot V_n^2 \cdot (D_{жс}^2 - d^2)}{25,6 \cdot k_3^2 \cdot n^2 \cdot \lambda^2 \cdot g} \right]^{2/5}. \quad (5)$$

Використовуючи дані залежності, можна забезпечити потрібні конструктивні розміри отворів просипання насадок і добитися максимальної продуктивності ГК з втягуючою магістраллю при дотриманні встановлених норм виконання технологічного процесу транспортування.

**Висновки.** Приведено конструкції гвинтових конвеєрів з бункерним завантаженням та гвинтових конвеєрів із завантаженням через насадки. Також приведена класифікація завантажувачів гвинтових транспортно-технологічних механізмів. Виведено аналітичні залежності для визначення конструктивних параметрів гвинтових завантажувачів.

1. Гевко І. Аналіз конструкцій і розрахунок завантажувальної здатності насадок гвинтових конвеєрів / І. Гевко // Збірник наукових праць НАУ. – 2000. – Т. 7, с. 160–163.
2. Гевко І.Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання / І. Б. Гевко. – Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 307 с.
3. А.с. 1710462 СССР, МКИ<sup>6</sup> В 65 G 33/16, 33/24. Гибкий винтовой конвейер / Р.Б. Гевко, И.Б. Гевко, Б.М. Гевко, Р.М. Рогатынский (СССР). – №1710462; заявл.20.12.1989; опубл.07.02.1992, Бюл. № 5.
4. А.с. 1645219 СССР, МКИ<sup>6</sup> В 65 G 33/24, 33/16. Гибкий винтовой конвейер / Р.Б. Гевко, И.Б. Гевко, Б.М. Гевко, Р.М. Рогатынский (СССР). – №1645219; заявл.20.02.1989; опубл.30.04.1991, Бюл.№16.
5. А.с. 1348268 СССР Гибкий винтовой конвейер / Б.М. Гевко, Р.Б. Гевко (СССР). – №1348268; – заявл.12.05.1988; опубл. 30.10.87, Бюл. №40.
6. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М. : Машиностроение, 1973. – 220 с.
7. Гевко Б. М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б. М. Гевко, Р. М. Рогатынский. – Львов : Вища школа, 1989. – 176 с.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.

УДК 621.717-112.6

**Н.С. Григор'єва**

Луцький національний технічний університет

**СТРУКТУРИЗАЦІЯ СКЛАДАЛЬНИХ МОДУЛІВ**

*Розглянуті загальні принципи формування складальних модулів, на основі яких можна структурувати конструкційні, технологічні та організаційні модулі модульної технології машинобудування. Головним блоком загальної моделі є процес перетворення вхідних параметрів у вихідні в створеному середовищі, на яке цілеспрямовані керувані інформаційні, матеріальні та енергетичні дії при технічному та кадровому забезпеченні.*

*Ключові слова:* модуль, модель, конструкція, технологія, організація, структура.

*Рис. 5. Літ. 3.*

**Н.С. Григорьева****СТРУКТУРИЗАЦИЯ СБОРОЧНЫХ МОДУЛЕЙ**

*Рассмотрены общие принципы формирования сборочных модулей, на основе которых можно структурировать конструкционные, технологические и организационные модули модульной технологии машиностроения. Главным блоком общей модели является процесс преобразования входных параметров в выходные в созданной среде, на которую целенаправлены управляемые информационные, материальные и энергетические действия при техническом и кадровом обеспечении.*

*Ключевые слова:* модуль, модель, конструкция, технология, организация, структура.

**N.S. Grigorieva****STRUCTURING OF ASSEMBLY MODULES**

*The general guidelines for the development of modules on which it is possible to structure construction, technological and organizational modules module the technology engineering. The main block of the general model is the process of converting the input parameters in the output in the generated environment that is focused on controlled information, material and energy of the technical and people ware ensuring.*

*Developed are also typical structures of the module systems, ways of providing their flexibility, methods of developing flexible technologic processes of automatic assemblage of the products and methods of drafting optimal compositions of adjustable module equipment and tooling. The flexibility in such systems is provided at construction, technological, algorithmic levels being estimated by the adjustment coefficient. The paper covers technological and construction modules as a basis of the flexible module assembling production, as well as methods of structure establishment. The securing of the basic indices of quality and competitive edge level is based on advance virtual estimation. The stages of the computer verification method include the virtual process of the flexible module assembling, virtual exploitation of the product and further improvement of both technology and construction following the results obtained. The experimental research of the major indices of the of the experimentally-industrial exponents of the adjustable module assembling equipment and tooling has confirmed its sufficiently high efficiency, correctness of the obtained theoretical and practical output. A method of engineering programmatic prognostication of the precision and reliability of the adjustable module assembling equipment has been developed.*

*Keywords:* module, model, design, technology, organization structure.

**Постановка проблеми.** Модульний принцип відомий давно і широко застосовується в промисловості, будівництві, електроніці та інших галузях господарства. Найбільш загальне поняття модуля було сформульовано Бор-Раменським – модуль це цілісність, спряжена з іншими елементами (об'єктами) структури так, що можлива її оперативна заміна на іншу цілісність того ж функціонального призначення. В машинобудуванні модульний принцип був представлений Васильєвим А.Л. і Базровим Б.М.. Васильєв А.Л. його визначив, як особливість побудови технічних систем, що полягає в підпорядкуванні їх розмірів проектним модулям і забезпеченні можливості комплектування різноманітних складних нестандартних технічних систем з великою різноманітністю характеристик з невеликої, економічно обґрунтованої кількості типів і типорозмірів однакових первинних загальних модуль-елементів. Базров Б.М. вважає, що таке визначення є неповним з точки зору його реалізації, можливостей, комплектування, тому під модульним принципом розуміється побудова різних технічних систем з різноманітними характеристиками компонуванням з типових модулів обмеженої номенклатури [1].

**Невирішені раніше частини загальної проблеми.** Не дивлячись на те, що модульне автоматизоване гнучке виробництво є принципово новим напрямком а машинобудуванні, його науково-технологічні основи ще не розроблені, що значно стримує його подальший розвиток. Важливою проблемою є формування модулів. Полягає вона в визначенні множини можливих порядків структур, відборі конкурентоспроможних варіантів і встановленні оптимального варіанту

за вибраним критерієм. Все це виконується на етапах розробки конструкції, технології чи організації.

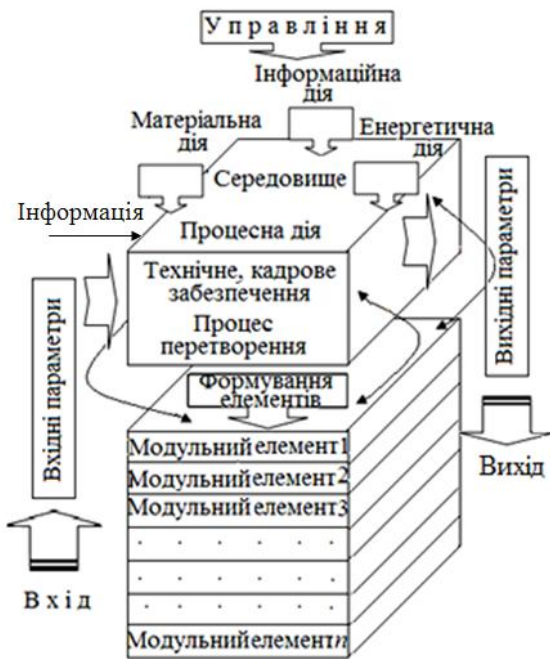


Рис. 1. Структурна схема загального модуля

**Основні результати дослідження.** Формування модулів в модульній технології є складним, комплексним і багатоваріантним завданням, рішення якого вимагає як теоретичної підготовки, так і доброї практики й майстерності [2]. Головним блоком загальної моделі (рис. 1) є процес перетворення вхідних параметрів  $p_{вх_i}$  у вихідні  $p_{вих_j}$  за рахунок технічного та кадрового забезпечення середовища, на яке цілеспрямовані керувані інформаційні, матеріальні та енергетичні дії. Залежність між вхідними і вихідними параметрами можна записати як  $p_{вх_i} = K_{ij} p_{вих_j}$ , де  $K_{ij}$  - коефіцієнт трансформації;  $i, j$  - кількість вхідних і вихідних параметрів. Очевидно, що кількість таких параметрів буде різною та обмеженою в залежності від виду модуля. Формування модулів проходить в першу чергу за конструкційно-технологічними ознаками і властивостями об'єкту виробництва та програмою його випуску.

В головному блоці здійснюється

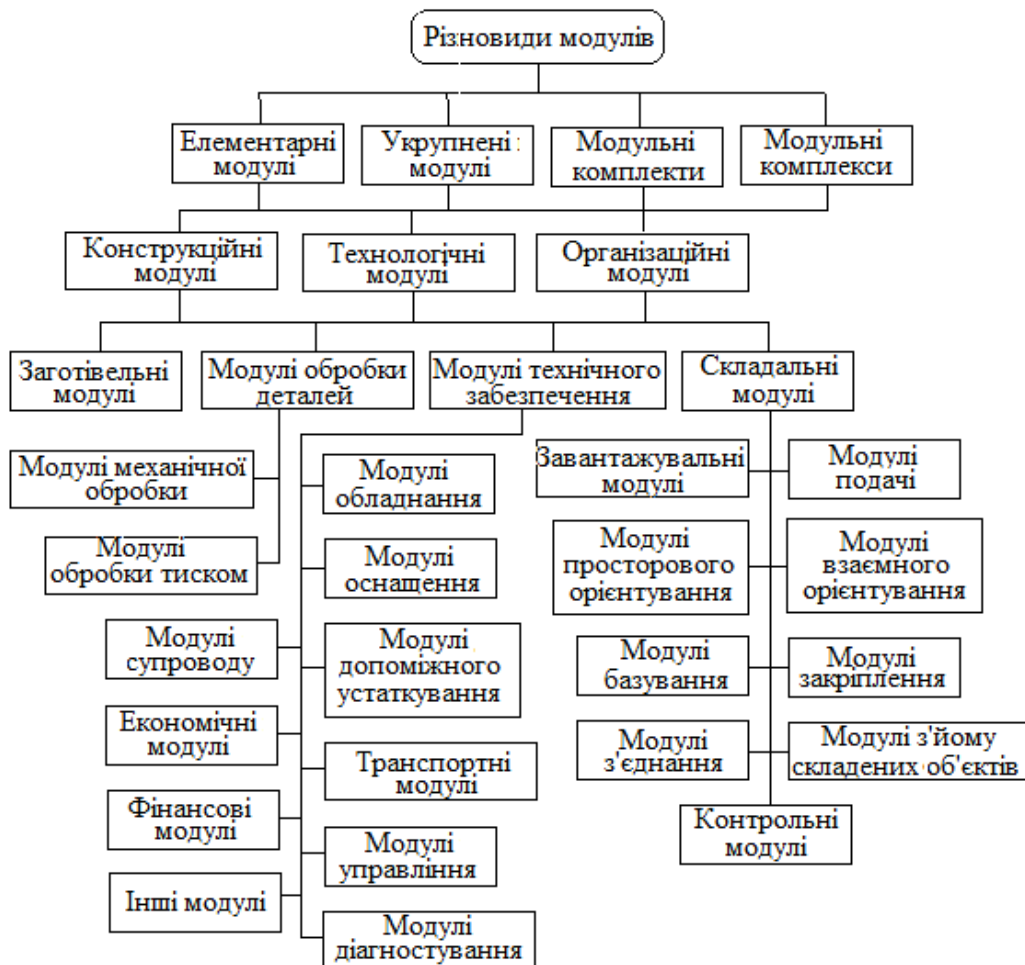


Рис. 3. Класифікація модулів машинобудування

інформаційна, енергетична та матеріальна дії, реалізуючи процес перетворень вхідних параметрів у вихідні. Ці перетворення мають зворотні зв'язки із забезпе-чучими системами, які використовуються для одержання та коректування інформації про якісні та кількісні зміни перетворень, що проходять, а також для забезпечення багаторазового використання засобів усіх дій при поточності та непереривності функціонування. Всі об'єкти системи перетворення проходять у просторі та часі й тому між ними є тісні просторово-часові відношення. Вхідна інформація, що надається, вказує різні дії на перетворення, котрі в свою чергу впливають на інші системи, в тому числі і на навколишнє середовище. Головними завданнями вхідної інформації та дій є забезпечення необхідної структури і потрібного функціонування об'єктів, відновлення потоків дії знарядь і засобів. Управління керує узагальненими діями інформаційного, енергетичного та матеріального типів. При цьому, вказані діяння можуть бути як позитивними, так і негативними, шкідливими, які можуть погано впливати на якісні показники об'єктів та навколишнє середовище. При цьому необхідне врахування всіх діючих вимог і обмежень, в тому числі і неявних, а також результатів спадковості та самоорганізації.

Алгоритми формування конструкції, технології чи організації відомі і тому закладаються в головний блок. За структурною схемою загального модуля при формуванні, наприклад, конструкційного модуля на підставі вказаної інформації та дій встановлюються модульні елементи: креслення деталей, з'єднань, підвузлів, вузлів, машини. При цьому корисною може бути методика проектування сучасних конструкцій машин. Елементи технологічного модуля: модульні установи, позиції, переходи, проходи, дії встановлюються на основі методики розробки прогресивних технологічних процесів з врахуванням їх модульності та результатів розчленування робіт, які виконуватимуться.

Найбільш складні комплексні модулі організації, що включають: планування, забезпечення та функціонування виробництва. Вказуються дані по розташуванню технологічного та допоміжного обладнання, організацію технологічних потоків, подачу деталей, переміщення, зняття та складування завершеного та незавершеного виробництва, тощо.

Стикування модулів проводиться за вхідними і вихідними параметрами, тобто в ланцюжку вихід попереднього модуля повинен відповідати входу наступного і т.д. Також кожний модуль має стикуватися як з модулями іншого ланцюжка, так і модулями управління. Вихід кожного модуля повинен однозначно відповідати входу наступного і т.д., а якщо розглядати вхід-вихід одного модуля то перетворення вхідних параметрів у вихідні представляє собою деяку їх трансформацію за заданими законами зміни. Умову стикування в загальному можна записати як

$$P_{вих_{i-1}} \Rightarrow P_{вх_i} \Rightarrow P_{вих_i} \Rightarrow P_{вх_{i+1}},$$

де  $P_i$  – вхідні чи вихідні параметри модуля.

Стикувальні елементи модулів також залежать від їх різновиду. Так для конструкційних модулів повинні бути передбачені установочні та фіксуючі елементи з іншими модулями, для технологічних і організаційних – відповідні елементи і параметри, які є необхідними для стикування.

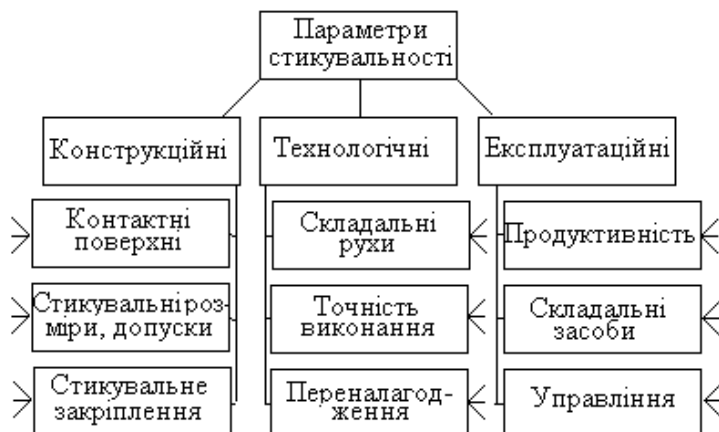


Рис. 2. Схема класифікації головних параметрів стикувальності складальних модулів

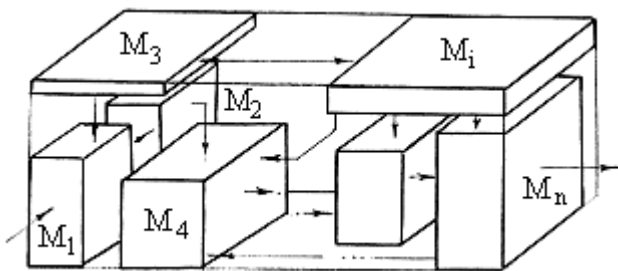
На підставі вказаних чинників можна сформулювати конкретні параметри стикувальності, наприклад, складальних модулів (рис. 2). При цьому, використовується принцип їх описання об'ємними матрицями з трьома напрямками деталізації. Головними конструкційними параметрами конструкційних модулів можна вважати контактні (базові) поверхні, якими вони стикуються з іншими модулями, стикувальні розміри: допуски та стикувальне закріплення. В свою чергу кожний з параметрів може

бути конкретизованим за рахунок вказаного розширення об'ємної матриці. Так, наприклад, контактні поверхні можуть бути уточненими за геометрією, розмірами і допусками, властивостями, кожне з яких при необхідності підлягає дальшому уточненню за вибраними критеріями і т.д. до повної бажаної конкретизації. Технологічні параметри стикувальності на початку охоплюють складальні рухи, точність їх виконання та переналагодження, експлуатаційні - роботу гнучкого складального виробництва. Передбачено подібне розкриття суті таких параметрів. Параметри стикувальності модулів можуть бути поділені на загальні та часткові. Загальні параметри найбільш повно описують стан модулів, а часткові - безпосередньо використовувемі параметри. Наприклад, остаточний підбір складальних модулів може проводитися лише по забезпечуючій точності складання, продуктивності, черговості складальних рухів, тощо.

Класифікацію модулів машинобудування краще проводити за їх функціональними особливостями (рис. 3). За обсягом модулі градуються від елементарних до комплексних, в які вкладаються прийняті визначення. Наприклад, елементарний модуль складається з одного-двох елементів, укрупнений - з більшої їх кількості згрупованими за функціональними особливостями. Основними модулями в машинобудуванні є конструкційні, технологічні та організаційні.

В залежності від типу виробництва модулі бувають заготовельними, обробними, складальними і технічного забезпечення. При цьому діє правило диференціації чи концентрації елементів, які їх утворюють. Далі може йти їх градація на модулі різних заготовок, обробні - на першому ієрархічному рівні: обробки механічної та тиском з можливістю дальшого підрозділення за їх різновидами. Складальні модулі в першу чергу відображають елементи складальної операції, а далі можуть їх конкретизувати. Модулі технічного забезпечення охоплюють усі модулі, необхідні для правильного функціонування, починаючи від технологічного обладнання, оснащення та закінчуючи модулями супроводу виробництва. Як видно з класифікації цінність модульного підходу в машинобудуванні полягає у тому, що весь виробничий процес можна представити модулями багатократного використання, а його розробку - підбором необхідних, що значно підвищує якість розробки при значному скороченні часу на виконання.

Проф. Михайловим О.М. [3] були розроблені теоретичні основи створення та проектування нових високоефективних технологічних систем неперервної дії, що отримали назву потоково-просторові технологічні системи механічної обробки деталей. Це вважається новим науковим напрямом з нетрадиційними принципами створення таких систем і нетрадиційними техніко-економічними показниками і можливостями. На підставі аналізу загальних принципів відомих технологічних систем були розпрацьовані нові принципи функціонування технологічних систем неперервної дії, досліджені їх властивості. Структури відрізняються від відомих тим, що вони призначені для прогресивних технологій нового покоління, нового технологічного обладнання потоково-просторового розташування, виконаних на базі нових науково-технологічних основ потоково-просторових технологічних систем неперервної дії. При певних обмеженнях і особливостях їх можна використати для автоматичного гнучкого модульного складання різноманітних виробів за умови великих серій складання, коли переналагодження потоково-



**Рис. 4. Формалізована об'ємно-просторова технологічна складальна система:  $M_1$  – підсистема вхідного контролю та завантаження;  $M_2$  – підсистема транспортування деталей;  $M_3$  – підсистема управління та діагностування;  $M_4$  – підсистема установки деталей;  $M_i$  – проміжні підсистеми;  $M_n$  – підсистема контролю якості та зняття складених вузлів**

просторового складального обладнання буде техніко-економічно узasadнено. Цим гнучке автоматичне складання можна наблизити до показників багатосерійного та масового виробництва, в якому технологічна собівартість автоматичного складання є найнижчою. Цей напрямок може також розглядатися як подальша комплексна автоматизація та інтенсифікація гнучких модульних складальних процесів.

Формалізована об'ємна технологічна складальна система (рис. 4) з максимальним використанням робочого простору складається з контрольних модулів, модулів переміщення складаних деталей на позицію складання, модулів установки і закріплення деталей, модулів взаємного орієнтування та спряження,



модулів фіксації деталей в спряженні, модулів знімання бракованих деталей та складених вузлів, модулів діагностування і управління. Вказаним модулям може бути притаманне лінійне, поверхневе чи об'ємне розміщення з різним числом позицій та потоків. Переналагодження модулів здійснюється за рахунок одного комплексного модуля переналагодження на складання іншого виробу чи окремих модулів переналагодження, що входять в склад вказаних складальних модулів. З метою забезпечення неперервності гнучкого складання процес переналагодження зводиться до простої заміни модулів налагодження. Просторове розташування модулів може бути різне, наприклад, лінійне, спіральне, гвинтове, тощо, в залежності від специфіки гнучкого складання.

Приклади просторового розміщення структурних моделей потоково-просторових технологічних модулів наведені на рис. 5. На вхід  $V_i$  можуть подаватися складані деталі, а складені вузли і вироби виводяться з системи виходом  $W_i$ , виконаної з радіусом початкового кола  $R$ , кроком просторової траєкторії  $t_i$  та довжиною осевого чи радіального переміщення складаних деталей. Можливі і інші варіанти просторового розміщення складальних модулів, наприклад з

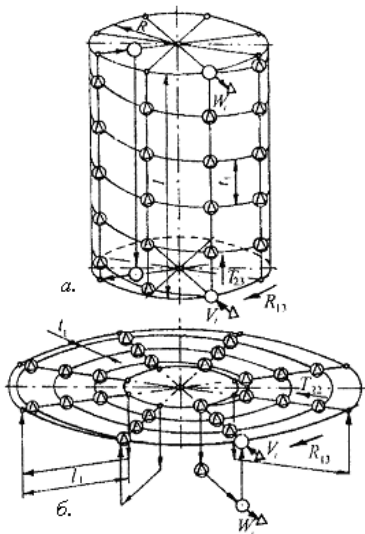


Рис. 5. Структурні моделі потоково-просторових гвинтових (а) і спіральних (б) технологічних модулів

циліндричною технологічною областю, тобто цілою множиною можливих варіантів, що залежать від способів автоматичного гнучкого складання, технологічного діяння складальних засобів, ступені диференціації та концентрації, особливостей складального обладнання та оснащення, виду міжмодульних зв'язків, тощо. Але головним вважається отримання оптимального варіанту гнучкого технологічного процесу складання.

Модулі машинобудівного виробництва творять модульні конструкції, технології, організації, тощо за рахунок їх набору та стикування. На підставі теорії структур проф. Чарнко О.В., а також проф. Гусева А.А. структура модульного процесу визначається поєднанням класів і груп структур. Під класом структур розуміється спосіб суміщення основних технологічних переходів і склад основного часу їх виконання. При першому класі послідовного виконання процесу основний час визначається сумою основного часу всіх переходів, при другому - сумою часів послідовно виконуваних основних переходів і тривалості найбільшого суміщеного основного переходу і при третьому - часу найбільшого основного

суміщеного переходу, котрі виконуються паралельно. Але, окрім основного часу в структурі процесу велике значення має і допоміжний час, що становить значну його частину. Способи суміщення допоміжних переходів, що характеризуються складом допоміжного часу, творять групи структур. Таке суміщення забезпечується їх перекриттям як за рахунок одночасного їх виконання з основними, так і допоміжними переходами. Якщо за способами виконання основних переходів нараховується три класи, то груп переходів може бути більш, а саме за кількістю допоміжних переходів.

У першій групі структур всі допоміжні переходи виконуються послідовно, без будь-якого суміщення і загальний час їх сумується. Проміжні групи характеризуються частковим наростаючим суміщенням, а остання група - повним суміщенням всіх допоміжних переходів, які виконуються під час основних. При накладанні класів структур на групи одержуються типові структури процесів. Так для однопозиційного одно потокового модульного складання одержано 24 типових структур технологічних модулів зі своєю величиною оперативного часу на їх виконання, тобто продуктивністю.

**Висновки.** Структуризація модулів в машинобудуванні може бути проведена за схемою загального модуля, яка передбачає наявність головного блоку, в якому на підставі інформації та енергетичних і матеріальних процесних дій за відповідними алгоритмами формуються модульні елементи. Для конструкційних модулів це – деталі, їх з'єднання, підвузли, вузли, машина, технологічних модулів – операції, установи, позиції, переходи, проходи, прийоми, організаційних модулів – планування обладнання та устаткування, забезпечення та функціонування виробництва. Головним при цьому є конструкційно-технологічні ознаки і властивості та програма випуску продукції. Класифікація модулів проведена за функціональними особливостями об'єктів



виробництва, може бути описаною об'ємною 3D- матрицею, котра допускає довільне розширення, допускаючи тим бажану деталізацію. Застосування нових високоефективних технологічних потоково-просторових технологічних систем неперервної дії дозволяє значно підвищити продуктивність модульного гнучкого складання виробів.

1. Базров Б.М. Технология сборки машин./ Б.М. Базров, О.В. Таратынов, В.В.Клепиков. – М: Изд. Дом «Спектр», 2011. – 368 с.: ил.
2. Григор'єва Н.С. Науково-технологічні основи гнучкого модульного автоматичного складання виробів: [монографія] / Наталія Сергіївна Григор'єва. - Луцьк: Надстир'я, – 2008. – 520 с.
3. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.

УДК 539.3

**О.В. Гуда***Луцький національний технічний університет***ВИВЕДЕННЯ РІВНЯНЬ РУХУ ТА РОЗРАХУНОК ВЛАСНИХ ЧАСТОТ ТРАНСТРОПНИХ ПЛАСТИН З УРАХУВАННЯМ ПОПЕРЕЧНОГО ЗСУВУ, ДЕФОРМАЦІЙ ПОПЕРЕЧНОГО ОБТИСНЕННЯ ТА ПОПЕРЕЧНОГО НОРМАЛЬНОГО НАПРУЖЕННЯ**

*У даній роботі за допомогою варіаційного принципу виведено рівняння руху, які враховують деформації поперечного зсуву та обтиснення. На основі отриманих рівнянь досліджено поперечні коливання круглої пластинки. Наведено аналіз розрахунків власних частот пластинки.*

*Ключові слова: ізотропні та транстропні пластини, поперечний зсув, поперечне обтиснення, згинальні моменти, поперечні сили, прогин, напруження, коливання.*

*Форм. 20. Табл. 4. Літ. 7.*

**О.В. Гуда****ВЫВОД УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ И РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ТРАНСТРОПНЫХ ПЛАСТИН С УЧЕТОМ ПОПЕРЕЧНОГО СДВИГА, ДЕФОРМАЦИЙ ПОПЕРЕЧНОГО ОБЖАТИЯ И ПОПЕРЕЧНОГО НОРМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

*В данной работе с помощью вариационного принципа выведены уравнения движения, которые учитывают деформации поперечного сдвига и обжатия. На основании полученных уравнений исследованы поперечные колебания круглой пластинки. Приведен анализ расчетов собственных частот пластинки.*

*Ключевые слова: изотропные и транстропные пластины, поперечный сдвиг, поперечное обжатие, сгибальные моменты, поперечные силы, изгиб, напряжение, колебания.*

**O.V. Guda****DISPLAY THE EQUATIONS OF MOTION AND THE CALCULATION OF NATURAL FREQUENCIES OF TRANSTROPIC PLATES, CONSIDERING TRANSVERSE SHEAR, DEFORMATIONS OF TRANSVERSE COMPRESSION AND TRANSVERSE NORMAL STRESS**

*In this work, using the variational principle, the equations of motion were derived. These equations take into account the deformations of transverse shear and compression. Based on the received equations the transverse vibrations of a circular plate were researched. The analysis of the calculation of natural frequencies of the plate is shown.*

*Keywords: isotropic and transtropic plates, transverse shear, transverse compression, bending moments, transverse forces, deflection, stress, vibrations.*

**Постановка проблеми.** Виробництво нових конструкцій, елементами яких є пластини, спонукає до поглиблення досліджень широкого кола наукових задач і науково-технічних проблем, що стосуються розрахунків конструкцій або їх елементів на коливання та міцність. Проектування і розрахунок сучасних тонкостінних елементів конструкцій, якими є композитні балки та пластини середньої товщини, потребує підвищеної точності розрахунків для забезпечення міцності, довговічності та надійності їх в експлуатації. За таких розрахунків забезпечення елементів конструкції достатньою контактною міцністю та тріщиностійкістю є актуальною науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У більшості випадків, в основу неklasичних (уточнених) моделей напружено-деформованого стану пластин середньої товщини, їх авторами покладаються кінетичні гіпотези для складових вектора переміщень, де тангенціальні складові переміщень змінюються лінійно (класична теорія тонких пластин, прикладні теорії типу С.П. Тимошенка, Е. Рейсснера) відносно поперечної координати або за законом кубічної параболи (теорії С.О. Амбарцумяна, В.З. Власова, Х.М. Муштарі, В.Г. Піскунова, О.О. Расказова, О.Ф. Рябова, Р. Крістенсена та ін.). Разом з тим, вплив поперечних деформацій у цих моделях (за виключенням В.Г. Піскунова) авторами враховувався частково. Пізніше вплив поперечного обтиснення почали враховувати в задачах про контактну взаємодію жорстких штампів із пластинками та оболонками. Впливу поперечного обтиснення на вищі частоти коливань пластин і оболонок присвячено значно менше робіт. У багатьох випадках такі дослідження проводились у постановках просторової задачі теорії пружності.

**Метою дослідження** є побудова нового варіанту моделі руху транстропних пластин середньої товщини, який враховує як ефекти поперечного зсуву, так і деформацію поперечного обтиснення, поперечне нормальне напруження та інерцію обертання поперечних перерізів.

© О.В. Гуда

**Основні результати дослідження.** Для виведення рівнянь руху та граничних умов у круглій плиті, скористаємося варіаційним принципом Лагранжа для повної енергії пружної системи [2, 5]

$$\delta \Pi = \delta A, \quad (1)$$

де

$$\delta \Pi = \iiint_{V_p} (\sigma_r \cdot \delta \varepsilon_r + \sigma_\theta \cdot \delta \varepsilon_\theta + \sigma_z \cdot \delta \varepsilon_z + \tau_{r\theta} \cdot \delta \gamma_{r\theta} + \tau_{rz} \cdot \delta \gamma_{rz} + \tau_{\theta z} \cdot \delta \gamma_{\theta z}) dV_p \quad - \quad \text{варіація}$$

потенціальної енергії деформації;  $dV_p = r dr d\theta dz$  – елемент об'єму плити;

$$\delta A = \iiint_{V_p} (F_r \delta U + F_\theta \delta V + F_z \delta W) dV_p + \iint_S (q^- \delta W^- - q^+ \delta W^+) dS \quad - \quad \text{варіація роботи об'ємних}$$

та поверхневих сил;  $dS = r d\theta dr$  – елемент поверхні плити;  $U, V, W$  – переміщення пластинки в напрямку осей координат  $r, \theta, z$   $W^\pm$  – компоненти вектора пружного переміщення на зовнішніх поверхнях  $z = \pm h$  плити;  $F_r = -\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$ ;  $F_\theta = -\rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$ ;  $F_z = -\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}$  – проекції сил інерції на відповідні координатні осі, віднесені до одиниці об'єму, які формально виконують роль об'ємних сил;  $\rho$  – густина.

Здійснюючи варіювання з урахуванням формул інтегрування частинами і співвідношень типу  $\delta \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} (\delta U)$  та використовуючи формули Коші для компонент деформації

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{U}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z},$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}, \quad \gamma_{\theta z} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial \theta},$$

варіація потенціальної енергії буде

$$\begin{aligned} \delta \Pi = & \iiint_{V_p} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (\sigma_r \delta U) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\sigma_\theta}{r} \delta V \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_z \delta W) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta U \right) + \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{r\theta} \delta V) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{rz} \delta U) + \frac{\partial}{\partial r} (\tau_{rz} \delta W) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{\theta z} \delta V) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\tau_{\theta z}}{r} \delta W \right) \right] dV_p - \\ & - \iiint_{V_p} \left( \frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta V - \frac{\sigma_\theta}{r} \delta U + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \delta U + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} \delta V + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \delta W + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} \delta U + \right. \\ & \left. + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} \delta V + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \delta U + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} \delta W + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \delta V + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} \delta W \right) dV_p = \\ & = \iint_{S_r} r \sigma_r \delta U d\theta dz + \iint_{S_\theta} \sigma_\theta \delta V dr dz + \iint_{S_z} r \sigma_z \delta W dr d\theta + \\ & + \iint_{S_\theta} \tau_{r\theta} \delta U dr dz + \iint_{S_r} r \tau_{r\theta} \delta V d\theta dz + \iint_{S_z} r \tau_{rz} \delta U dr d\theta + \iint_{S_r} r \tau_{rz} \delta W d\theta dz + \iint_{S_z} r \tau_{\theta z} \delta V dr d\theta + \\ & + \iint_{S_\theta} \tau_{\theta z} \delta W dr dz - \iiint_V \left( \frac{\sigma_r}{r} \delta U + \frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta V + \frac{\tau_{rz}}{r} \delta W + \frac{\tau_{r\theta}}{r} \delta V - \right. \\ & \left. - \frac{\sigma_\theta}{r} \delta U + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \delta U + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} \delta V + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \delta W + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} \delta U + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} \delta V + \right. \\ & \left. + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \delta U + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} \delta W + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \delta V + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} \delta W \right) dV_p, \end{aligned} \quad (2)$$

а варіація потенціалу зовнішніх сил

$$\delta A = -\rho \iiint_{V_p} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \delta U + \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \delta V + \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \delta W \right) dV_p + \iint_S q_2 \delta \tilde{W} ds. \quad (3)$$

Підставляючи рівності (2) і (3) у варіаційне рівняння (1) та прирівнюючи до нуля в потрібному інтегралі вирази біля незалежних варіацій  $\delta U$ ,  $\delta V$ ,  $\delta W$ , отримаємо диференціальні рівняння руху елемента об'єму пластини в циліндричних координатах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Скористаємося представленням напружень через внутрішні зусилля та моменти, щоб отримати рівняння рівноваги через зусилля і моменти, а також граничні умови на краях пластинки:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{N_r}{2h} + \frac{M_r z}{I} + \frac{(1-\alpha)\tilde{E}}{G'} f_0(z) \left( \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{v}{r} Q_r \right) + \\ &+ \frac{(1-\alpha)\tilde{E}h^2}{2E'} f_0(z) \left( \frac{\partial^2 q_2}{\partial r^2} + \frac{v}{r^2} \frac{\partial^2 q_2}{\partial \theta^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial q_2}{\partial r} \right) + A'(q_1 + q_2(f_0(z) - 1)) + zA'\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}; \\ \sigma_\theta &= \frac{N_\theta}{2h} + \frac{M_\theta z}{I} + \frac{(1-\alpha)\tilde{E}}{G'} f_0(z) \left( v \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} Q_r \right) + \\ &+ \frac{(1-\alpha)\tilde{E}h^2}{2E'} f_0(z) \left( v \frac{\partial^2 q_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 q_2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial q_2}{\partial r} \right) + A'(q_1 + q_2(f_0(z) - 1)) + zA'\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}; \\ \tau_{r\theta} &= \frac{N_{r\theta}}{2h} + \frac{H_{r\theta} z}{I} + \frac{(1-\alpha)\tilde{E}}{G'} f_0(z) \left( \frac{\partial Q_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r} Q_\theta \right) + \\ &+ \frac{(1-\alpha)\tilde{E}h^2}{2E'} f_0(z) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial q_2}{\partial \theta} + \frac{\partial q_2}{\partial r} \right); \\ \tau_{rz} &= \frac{G'}{K'} \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) Q_r; \quad \tau_{\theta z} = \frac{G'}{K'} \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) Q_\theta; \end{aligned} \quad (5)$$

де  $f_0(z) = \frac{z}{4h^3} (0,6h^2 - z^2)$ ,  $K' = \frac{4}{3} G'h$ ,  $A' = \frac{v''}{1-v}$ ,  $\tilde{E} = \frac{E}{1-v^2}$ .

Врахувавши розвинення переміщень пластинки  $U, V, W$  в напрямку осей координат  $r, \theta, z$  у вигляді притятих степеневих рядів за поперечною координатою  $z$ , запишемо вирази для компонент пружних переміщень, у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} U(r, \theta, z) &= u + \gamma_r z + \psi_r \left( \frac{z}{5} - \frac{z^3}{3h^2} \right); \\ V(r, \theta, z) &= v + \gamma_\theta z + \psi_\theta \left( \frac{z}{5} - \frac{z^3}{3h^2} \right); \\ W(r, \theta, z) &= w + \frac{2\alpha_0}{E'} q_1 z + \frac{3\alpha_0}{4hE'} \tilde{q}_2 z^2 \left( 1 - \frac{z^2}{6h^2} \right) - A' \left( z\theta_0 + \frac{z^2\theta_1}{2} - \frac{z^4\theta_3}{4h^2} \right) = \\ &= w + \frac{2\alpha_0}{E'} q_1 z + \frac{3\alpha_0}{4hE'} \tilde{q}_2 z^2 \left( 1 - \frac{z^2}{6h^2} \right) - A' z\theta_0 + \frac{1}{2} A' z^2 \theta_3 \left( 3h^2 + \frac{z^2}{2h^2} \right) + \frac{1}{2} A' z^2 \Delta w, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{Тут} \quad \theta_n = \frac{\partial u_n}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_n}{\partial \theta} + \frac{u_n}{r}, \quad (n=1,3); \quad \theta_0 = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r}, \quad \alpha_0 = \frac{1}{2} - \nu' A',$$

$\tilde{q}_2 = q_2 + 2h\rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}$ ,  $q_1 = 0.5(q^+ - q^-)$ ,  $q_2 = q^+ + q^-$ ,  $q^+, q^-$  – навантаження на зовнішніх поверхнях пластини ( $z = \pm h$ ), що направлені вниз, у напрямку осі  $Oz$ ;  $\gamma_r, \gamma_\theta$  – узагальнені кути повороту;  $\psi_r, \psi_\theta$  – деформації поперечного зсуву серединної поверхні пластинки.

Використовуючи формули (5-6), знаходимо вираз для варіації потенціальної енергії:

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \iint_S \int_{-h}^h (\sigma_r \cdot \delta\varepsilon_r + \sigma_\theta \cdot \delta\varepsilon_\theta + \sigma_z \cdot \delta\varepsilon_z + \tau_{r\theta} \cdot \delta\gamma_{r\theta} + \tau_{rz} \cdot \delta\gamma_{rz} + \tau_{\theta z} \cdot \delta\gamma_{\theta z}) dz dS = \\ &= \iint_S \left( N_r \delta \left( \frac{\partial u}{\partial r} \right) + M_r \delta \left( \frac{\partial \gamma_r}{\partial r} \right) + \frac{N_\theta}{r} \delta u + \frac{M_\theta}{r} \delta \gamma_r + N_\theta \delta \left( \frac{\partial v}{r \partial \theta} \right) + M_\theta \delta \left( \frac{\partial \gamma_\theta}{r \partial \theta} \right) + \right. \\ &+ N_{r\theta} \delta \left( \frac{\partial u}{r \partial \theta} \right) + H_{r\theta} \delta \left( \frac{\partial \gamma_r}{r \partial \theta} \right) + N_{r\theta} \delta \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right) + H_{r\theta} \delta \left( \frac{\partial \gamma_\theta}{\partial r} \right) - \frac{N_{r\theta}}{r} \delta v - \frac{H_{r\theta}}{r} \delta \gamma_\theta + \\ &\left. + Q_r \delta \gamma_r + Q_r \delta \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right) + Q_\theta \delta \gamma_\theta + Q_\theta \delta \left( \frac{\partial \tilde{w}}{r \partial \theta} \right) \right) dS. \end{aligned}$$

Використовуючи формули інтегрування частинами та варіювання за незалежними змінними  $u, v, \tilde{w}, \gamma_r, \gamma_\theta$ , отримаємо для  $\delta\Pi$  та  $\delta A$ :

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= - \iint_S \left[ \left( \frac{\partial N_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{N_r - N_\theta}{r} \right) \delta u + \left( \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{2N_{r\theta}}{r} \right) \delta v + \right. \\ &+ \left( \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{Q_r}{r} + q_2 \right) \delta \tilde{w} + \left( \frac{\partial M_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{M_r - M_\theta}{r} - Q_r \right) \delta \gamma_r + \\ &\left. + \left( \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r} H_{r\theta} - Q_\theta \right) \delta \gamma_\theta \right] dS + \int_L \left[ (N_r l + N_{r\theta} m) \delta u + \right. \\ &+ (N_{r\theta} l + N_\theta m) \delta v + (Q_r l + Q_\theta m) \delta \tilde{w} + (M_r l + H_{r\theta} m) \delta \gamma_r + (H_{r\theta} l + M_\theta m) \delta \gamma_\theta \left. \right] dL. \quad (7) \\ \delta A &= -2\rho h \iint_S \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \delta u + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \delta v + \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 \gamma_r}{\partial t^2} \delta \gamma_r + \frac{h^2}{3} \frac{\partial^2 \gamma_\theta}{\partial t^2} \delta \gamma_\theta \right) dS + \iint_S \tilde{q}_2 \delta \tilde{w} dS. \end{aligned}$$

Тут  $L$  – межа контуру області  $S$ ,  $l$  та  $m$  – напрямні косинуси нормалі до контуру пластини.

Якщо прирівняти вирази біля незалежних варіацій в (7), одержимо систему рівнянь руху через внутрішні сили та моменти:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{N_r - N_\theta}{r} &= 2\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial N_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_\theta}{\partial \theta} + \frac{2N_{r\theta}}{r} &= 2\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial M_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{M_r - M_\theta}{r} - Q_r &= \frac{2}{3} \rho h^3 \frac{\partial^2 \gamma_r}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial H_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r} H_{r\theta} - Q_\theta &= \frac{2}{3} \rho h^3 \frac{\partial^2 \gamma_\theta}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial Q_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + \frac{Q_r}{r} &= -q_2 + 2\rho h \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де 
$$\tilde{w} = w + \frac{1}{6} A' \Delta w h^2 + \frac{9\alpha_0 h A_2 q_2}{40 E'}; \quad \{N_r, N_\theta, N_{r\theta}, Q_r, Q_\theta\} = \int_{-h}^h \{\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}\} dz;$$

$$\{M_r, M_\theta, H_{r\theta}\} = \int_{-h}^h \{\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}\} z dz; \quad Q_r = K' \cdot \psi_r; \quad Q_\theta = K' \cdot \psi_\theta; \quad G' - \text{модуль поперечного зсуву}$$

матеріалу пластинки.

Також рівняння (8) можна отримати з системи (4), якщо, наслідуючи С.О.Амбарцумяна [1], помножити всі рівняння системи (4) на  $dz$ , а перших два ще і на  $zdz$  та проінтегрувати їх в межах від  $-h$  до  $h$ . Разом із тим, така методика не дозволяє отримати енергетично коректні граничні умови на краю пластинки.

Граничні умови отримуємо з контурного інтегралу, що входить у рівняння (7):

$$\begin{aligned} (N_r l + N_{r\theta} m) \delta u = 0; \quad (N_{r\theta} l + N_\theta m) \delta v = 0; \quad (Q_r l + Q_\theta m) \delta w = 0; \\ (M_r l + H_{r\theta} m) \delta \gamma_r = 0; \quad (H_{r\theta} l + M_\theta m) \delta \gamma_\theta = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Із системи рівнянь (9) можна отримати статичні або геометричні граничні умови, в залежності від того який множник прирівняти до нуля.

Якщо підставити в рівняння (4) замість внутрішніх сил та моментів їх вирази, отримуємо систему п'яти рівнянь руху в шуканих функціях  $u, v, w_\tau, \gamma_r, \gamma_\theta, \Omega$ :

$$\begin{aligned} \Delta u + \frac{1+\nu}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left( u + 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) &= -\frac{\nu''(1+\nu)}{E} \frac{\partial q_1}{\partial r} + 2\rho h \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \Delta v + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left( v - 2 \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) &= -\frac{2\nu''(1+\nu)}{E(1-\nu)} \frac{1}{r} \frac{\partial q_1}{\partial \theta} + 2\rho h \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ \Delta \gamma_r + \frac{1+\nu}{2r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \gamma_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \gamma_r}{\partial \theta} + \frac{\gamma_\theta}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left( \gamma_r + 2 \frac{\partial \gamma_\theta}{\partial \theta} \right) &= \\ = \frac{4\psi_r}{5\varepsilon_\tau} - \frac{3\nu''(1+\nu)}{5hE} \frac{\partial q_2}{\partial r} + \frac{\rho}{\tilde{E}} \frac{\partial^2 \gamma_r}{\partial t^2} - A' \frac{\rho}{\tilde{E}} \frac{\partial^3 \tilde{W}}{\partial r \partial t^2}; & \\ \Delta \gamma_\theta + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \gamma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \gamma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\gamma_r}{r} \right) - \frac{1}{r^2} \left( \gamma_\theta - 2 \frac{\partial \gamma_r}{\partial \theta} \right) &= \\ = \frac{8\psi_\theta}{5\varepsilon_\tau(1-\nu)} - \frac{6\nu''(1+\nu)}{5(1-\nu)hE'} \frac{1}{r} \frac{\partial q_2}{\partial r} + \frac{\rho}{\tilde{E}} \frac{\partial^2 \gamma_\theta}{\partial t^2} - A' \frac{\rho}{r\tilde{E}} \frac{\partial^3 \tilde{W}}{\partial \theta \partial t^2}; & \\ K' \Delta w_\tau = -q_2 + 2\rho h \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2}. & \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Тут } \psi_r = \frac{\partial w_\tau}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta}; \quad \psi_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial w_\tau}{\partial \theta} + \frac{\partial \Omega}{\partial r}; \quad \gamma_r = -\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} - \frac{4}{5} \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta}; \quad \gamma_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \frac{4}{5} \frac{\partial \Omega}{\partial r}; \\ \bar{w} = w - \frac{2.4 + \chi_0}{3 + \chi_0} w_\tau + \frac{q_2 h}{E_0}; \quad E_0 = \frac{40}{9} (3 + \chi_0) E'; \quad \chi_0 = \frac{3\nu''}{2G/G' - \nu''}; \end{aligned}$$

$$\hat{W} = w + 0.3 A' h^2 \Delta w + 0.43 \alpha_0 A_2 q_2 \frac{h}{E'}; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}.$$

До цих рівнянь мають бути приєднані граничні умови (9) та початкові умови при  $t = 0$ :

$$\begin{aligned} w = w_0(r, \theta), \quad \frac{\partial w}{\partial t} = w_1(r, \theta), \\ u = u_0(r, \theta), \quad \frac{\partial u}{\partial t} = u_1(r, \theta), \\ v = v_0(r, \theta), \quad \frac{\partial v}{\partial t} = v_1(r, \theta), \end{aligned} \quad (11)$$

де  $w_0, v_0, u_0, u_1, v_1, w_1$  – задані компоненти початкового переміщення і початкової швидкості від точки  $(r, \theta)$ .

Систему рівнянь рівноваги (10), можна звести до більш звичного вигляду, якщо замість величин  $\gamma_r, \gamma_\theta, \psi_r, \psi_\theta$  підставити їх вирази через функції  $w, w_\tau, \Omega$ :

$$D\Delta^2 w_q = \left(1 - \varepsilon_1 \Delta + \frac{\varepsilon' \rho h^4}{4G} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) q_2 - m(1 - \varepsilon_1 h^2 \Delta) \frac{\partial^2 \tilde{w}(r, t)}{\partial t^2} - m \varepsilon' \frac{\rho h^2}{4G} \frac{\partial^4 \tilde{w}}{\partial t^4};$$

$$K' \Delta w_\tau = -q_2 + m \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2}; \quad \Delta \Omega - k^2 \Omega = \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial t^2}, \quad (12)$$

де  $\varepsilon_1 = \frac{h^2}{10(1-\nu)} \left(8 \frac{G}{G'} - 3\nu''\right)$ ;  $D = \frac{2}{3} \frac{Eh^3}{1-\nu^2}$ ;  $m = 2\rho h$  – маса одиниці поверхні пластинки;

$$\varepsilon' = 0.1 \left(8 \frac{G}{G'} + \nu''\right); \quad w_q = w + \varepsilon_2 q_2 / D; \quad k^2 = \frac{5}{2} \frac{G'}{G} h^{-2}; \quad \varepsilon_2 = \frac{h^4}{20(1-\nu^2)} (1-\alpha) \left(\frac{E}{E'} + A' \frac{E}{G'}\right);$$

$$\alpha = \frac{\nu'' \cdot G'}{2G}.$$

Отримані рівняння (12) цілком співпадають за формою з відповідними умовами та рівняннями для пластин класичної теорії. Відмінність вносять лише коефіцієнти, що враховують поперечний зсув та обтиснення. Дані рівняння враховують додатково інерцію обертання поперечних перерізів пластини та вплив нормального напруження. Якщо покласти нулю параметри  $\varepsilon'$  та  $A'$ , а також  $\Delta' \equiv 1 - \varepsilon \Delta$ , то ці фактори в рівняннях (12) враховуватись не будуть. Неврахування інерції веде до втрати правої частини в рівнянні Гельмгольца.

Розглянемо вільні поперечні коливання трансверсально-ізотропної пластинки. Система диференціальних рівнянь вільних поперечних коливань трансверсально-ізотропної пластинки (12), у випадку  $q_2 = 0$  буде мати вигляд:

$$D\Delta^2 \tilde{w}(r, \theta, t) + m(1 - \varepsilon_1 \Delta) \frac{\partial^2 \tilde{w}(r, \theta, t)}{\partial t^2} + m \varepsilon' \frac{\rho}{4G} \frac{\partial^4 \tilde{w}(r, \theta, t)}{\partial t^4} = 0,$$

$$\Delta \Omega - k^2 \Omega = \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial t^2}, \quad (13)$$

$$\text{де } \Delta = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \right].$$

Записавши розв'язки системи рівнянь (13) для вільних коливань пластинки у вигляді:

$$w(r, \theta, t) = w(r) \cos n\theta \cos \omega_i t, \quad \Omega(r, \theta, t) = f(r) \sin n\theta \cos \omega_i t, \quad (14)$$

одержимо рівняння для власних форм коливань, знехтувавши в першому рівнянні (13) членом з четвертою похідною за змінною  $t$ , вважаючи його малим по відношенню до інших членів з похідними нижчого порядку, одержимо

$$D\Delta_n \Delta_n w(r) + m(1 + \varepsilon \Delta_n) \omega_i^2 w(r) = 0, \quad \Delta_n f(r) - k^2 f(r) = 0, \quad (15)$$

де  $\omega_i$  – кругова частота власних коливань пластинки,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – кількість хвиль серединної

площини пластинки в кільцевому напрямку,  $\Delta_n = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{n^2}{r^2}$ .

Загальний розв'язок системи (2.22) можна подати в вигляді:

$$w(r) = C_1 J_n(\alpha_i r) + C_2 Y_n(\alpha_i r) + C_3 I_n(\beta_i r) + C_4 K_n(\beta_i r),$$

$$f(r) = C_5 I_n(k_i r) + C_6 K_n(k_i r), \quad (16)$$

де  $J_n, Y_n, I_n, K_n$  – функції Бесселя дійсного та уявного аргументу,  $C_i$  – сталі, які знаходимо з початкових та граничних умов.

З характеристичного рівняння для першого диференціального рівняння (15) маємо:

$$\alpha_i = \left( \sqrt{\omega_i^2 \frac{m}{D} + \left( \frac{\varepsilon_1 \omega_i^2 m}{2D} \right)^2} + \varepsilon_1 \omega_i^2 \frac{m}{2D} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \beta_i = \left( \sqrt{\omega_i^2 \frac{m}{D} + \left( \frac{\varepsilon_1 \omega_i^2 m}{2D} \right)^2} - \varepsilon_1 \omega_i^2 \frac{m}{2D} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Використовуючи рівняння (17), отримаємо вираз для знаходження частоти власних коливань пластинки:

$$\omega_i = \alpha_i^2 \sqrt{\frac{D}{m}} (1 + \varepsilon_1 \alpha_i^2)^{-\frac{1}{2}}.$$

Якщо розглядається суцільна пластинка радіуса  $R$ , то в цьому випадку слід прийняти  $C_2 = C_4 = C_6 = 0$ . Тоді, врахувавши (14) та (16), отримаємо:

$$\begin{aligned} w(r, \theta, t) &= (C_1 J_n(\alpha_i r) + C_3 I_n(\beta_i r)) \cos n\theta \cos \omega_i t, \\ \Omega(r, \theta, t) &= C_5 I_n(k_i r) \sin n\theta \cos \omega_i t. \end{aligned} \quad (18)$$

У випадку шарнірного опертя по контуру  $r = R$  граничні умови запишемо наступним чином:

$$w(R, \theta, t) = 0, \quad M_r = 0, \quad Q_\theta = 0, \quad (19)$$

$$\text{де } M_r = -D \left( \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} + \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \theta^2} \right) - \varepsilon_0 h^2 q_2 + 0.8D(1-\nu) \frac{1}{r} \left( \frac{1}{r} \Omega - \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right),$$

$$Q_\theta = K' \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w_\tau}{\partial \theta} + \frac{\partial \Omega}{\partial r} \right) = -D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Delta \tilde{w}) - \frac{\varepsilon_1 h^2}{r} \frac{\partial q_2}{\partial \theta} + K' \frac{\partial \Omega}{\partial r},$$

$$q_2 = -m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \alpha_i^2 \beta_i^2 D (C_1 J_n(\alpha_i r) + C_3 I_n(\beta_i r)) \cos n\theta \cos \omega_i t,$$

$$\tilde{w} = w + \frac{\varepsilon_2 q_2 h^4}{D}, \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{20(1-\nu)} \left( 4 \frac{E}{G'} - \nu^*(7-\nu) \right), \quad \varepsilon_1 = \frac{2}{5} (1-0.75\nu^*) \frac{\tilde{E}}{G'}, \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{20} (1-\nu^*) \frac{\tilde{E}}{E'};$$

$$\tilde{E} = E / (1-\nu^2); \quad \nu^* = 0.5\nu^* G' / G; \quad w_\tau = -\frac{5}{4} \varepsilon_\tau h^2 \Delta w - \frac{\varepsilon_1 h^2}{r} q_2 - \frac{\varepsilon_2 h^4}{r} \Delta q_2, \quad \varepsilon_\tau = 0.4 \frac{\tilde{E}}{G'},$$

$$K' = \frac{4}{3} G' h, \quad k^2 = 2.5 h^{-2} G' / G, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \text{оператор Лапласа}, \quad D = \frac{2}{3} \frac{E h^3}{(1-\nu^2)}; \quad R \text{ і } 2h - \text{радіус і товщина пластинки.}$$

З граничних умов (19) отримуємо систему трьох однорідних рівнянь відносно сталих інтегрування  $C_1, C_3, C_5$ . Розв'язуючи дану систему, отримуємо наступне трансцендентне рівняння:

$$(\alpha_{0i}^2 + \beta_{0i}^2) \left( \frac{0.4n^2 E}{G'(1+\nu)} \left( \frac{h}{R} \right)^2 \left( 1 - \frac{1}{k_{0i} \frac{I_{n-1}(k_{0i})}{I_n(k_{0i})} - n} \right) - 1 \right) = (1-\nu) \left( \alpha_{0i} \frac{J_{n-1}(\alpha_{0i})}{J_n(\alpha_{0i})} - \beta_{0i} \frac{I_{n-1}(\beta_{0i})}{I_n(\beta_{0i})} \right). \quad (20)$$

Тут  $\alpha_{0i} = R\alpha_i, \beta_{0i} = R\beta_i, k_{0i} = Rk_i$ . Між коренями  $\alpha_i$  та  $\beta_i$  існує зв'язок:  $\beta_i = \frac{\alpha_i}{\sqrt{1 + \varepsilon \alpha_i^2}}$ .

На основі наведених вище формул та рівнянь знайдено корені рівняння (20) та відповідні їм частоти  $\tilde{\omega}_i = \sqrt{\frac{m}{D}} \omega_i$ . Отримані результати, залежно від відношень  $G/G'$  та товщини пластини, подані в таблицях 1-3:



Таблиця 1. Перші частоти вільних коливань пластинки за різних матеріалів  
( $h/R = 0.05$ )

n	$G/G', h/R = 0.05$							
	0		1		2		5	
	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$
0	2,262	5,102	2,2619	5,065	2,2618	5,029	2,2614	4,924
	5,4579	29,304	5,4577	28,165	5,4574	27,148	5,4567	24,654
	8,6126	71,278	8,6122	65,179	8,6118	60,418	8,6108	50,659
1	3,727	13,784	3,727	13,522	3,726	13,268	3,725	12,595
	6,9606	47,188	6,961	44,369	3,96	41,988	6,959	36,65
	10,1353	97,285	10,135	86,553	10,134	78,725	10,133	63,903
2	5,0596	25,241	5,0587	24,38	5,0578	23,602	5,055	21,645
	8,3715	67,486	8,3708	61,968	8,37	57,611	8,3677	48,565
	11,586	125,163	11,5852	108,378	11,5845	96,926	11,5823	76,606

Таблиця 2. Перші частоти вільних коливань пластинки за різних матеріалів ( $h/R = 0.1$ )

n	$G/G', h/R = 0.1$							
	0		1		2		5	
	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$
0	2,2603	5,052	2,2598	4,911	2,2594	4,782	2,258	4,448
	5,4544	27,948	5,4535	24,505	5,4526	22,083	5,4502	17,656
	8,6077	64,206	8,6065	50,19	8,6055	42,584	8,6027	31,385
1	3,724	13,457	3,722	12,54	3,720	11,788	3,716	10,15
	6,9563	43,871	6,955	36,365	6,953	31,73	6,946	24,206
	10,1297	84,942	10,1282	63,236	10,127	52,588	10,1229	37,89
2	5,0558	24,213	5,0521	21,256	5,0484	19,567	5,0364	15,844
	8,3664	61,079	8,3635	48,126	8,3606	40,972	8,3518	30,304
	11,5802	106,008	11,5777	75,742	11,5713	62,027	11,568	44,009

Таблиця 3. Перші частоти вільних коливань пластинки за різних матеріалів  
( $h/R = 0.2$ )

n	$G/G', h/R = 0.2$							
	0		1		2		5	
	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$
0	2,2538	4,863	2,2521	4,41	2,251	4,065	2,2457	3,367
	5,4434	23,951	5,4411	17,435	5,439	14,376	5,4336	10,262
	8,5963	48,483	8,5944	30,94	8,5927	24,513	8,5891	16,844
1	3,7136	12,35	3,707	10,038	3,701	8,667	3,684	6,511
	6,9441	35,325	6,939	23,887	6,936	19,228	6,925	13,394
	10,1188	60,829	10,116	37,341	10,113	29,302	10,106	19,963
2	5,0439	21,087	5,0282	15,654	5,0103	12,973	4,9258	9,184
	8,3544	46,534	8,3439	29,879	8,3322	23,687	8,2807	16,207
	11,5702	72,634	11,5623	43,362	11,5536	33,803	11,516	22,849

Якщо в рівнянні (20) покласти величини  $\frac{E}{G'} = 0$ ,  $\nu'' = 0$ , та виконати граничний перехід при  $k_{0i} \rightarrow \infty$ , то отримаємо відповідне трансцендентне рівняння класичної теорії тонких пластин:

$$I_{n-1}(\alpha_{0i})J_n(\alpha_{0i}) - I_n(\alpha_{0i})J_{n-1}(\alpha_{0i}) = \frac{2\alpha_{0i}}{I_n(\alpha_{0i})J_n(\alpha_{0i})},$$

розв'язки якого подані в наступній табл. 4:

Таблиця 4. Перші частоти вільних коливань пластинки в класичній теорії

$n = 0$		$n = 1$		$n = 2$	
$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$	$\alpha_i$	$\tilde{\omega}_i$
2,2215	4,9350	3,7280	13,898	5,0729	25,734
5,4516	29,7199	6,9627	48,479	8,3776	70,184
8,6114	74,1562	10,1377	102,773	11,59074	134,345

Розроблено за [1]

**Висновки.** Аналіз числових даних, наведених у таблицях 1–3, дозволяє зробити наступні висновки:

1. При збільшенні товщини пластинки від  $h/R = 0.05$  до  $h/R = 0.2$  усі перші три частоти мають стійку тенденцію до зниження порівняно з результатами класичної теорії тонких пластинок. Наприклад, для випадку  $n = 1$  (табл. 4) частоти  $\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2$  і  $\tilde{\omega}_3$ , пораховані за рівняннями теорії Кірхгофа-Лява, відповідно дорівнюють 13,9; 48,5 та 102,8. Тоді, як за уточненими рівняннями для ізотропної пластинки ( $G/G' = 1, \nu = 0.3$ ) відповідні результати (табл. 3,  $h/R = 0.2$ ) будуть: 10,0; 23,9 та 37,3. Для трансропної плити ( $G/G' = 5$ ) тієї ж самої товщини відповідні частоти зменшуються ще більше – до величин: 6,5; 13,4; 20,0, тобто перша частота зменшується більше ніж удвічі, друга в 3,6 рази, а третя – більше ніж у 5 раз порівняно із класичною теорією.

2. У випадку трансверсально-ізотропних пластин явище резонансу може виникнути значно швидше, ніж це передбачається класичною теорією Кірхгофа-Лява, яка фактично не може виявити першу частоту.

3. Тенденція завищення значень перших частот класичною теорією була підтверджена Г.Т. Грінченком [4] за допомогою тривимірних рівнянь теорії пружності.

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. Прочность, устойчивость и колебания / С.А. Амбарцумян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
2. Васильев В.В. Механика конструкций из композитных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
3. Гершунов Е.М. Расчет круглых и кольцевых пластинок на действие произвольной динамической загрузки / Е.М. Гершунов // Отделение математики, механики. Известия АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – №6. – С. 89–95.
4. Гринченко В.Т. Равновесие и установившиеся колебания упругих тел конечных размеров / В.Т. Гринченко. К.: Наукова думка, 1978. – 264 с.
5. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости / А.И. Лурье. – М.: Гостехиздат, 1955. – 491 с.
6. Мелконян А.П. О колебаниях трансверсально-изотропных круглых пластинок / А.П. Мелконян, А.А. Хачатрян // Известия АН Армянской ССР. Механика. – 1966. – Т. 19. – №3. – С. 26–34.
7. Швабюк В.И. Учет эффекта сжимаемости нормали в контактных задачах для трансверсально-изотропных плит / В.И. Швабюк // Прикладная механика. – 1980. – Т. 16. – №9. – С. 71–77.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.

УДК 620.1:628.16:669.1

Н.М. Гулієва

Луцький національний технічний університет

**ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНОГО МАТЕРІАЛУ – САПОНІТУ**

*У статті розглянуто дослідження природного матеріалу – сапоніту, його хімічний аналіз, фізичні властивості. Наведено результати рентгеноскопічного аналізу.*

*Ключові слова:* сапоніт, хімічний аналіз, фізичні властивості, природний матеріал.

*Рис. 4. Табл. 2. Літ. 8.*

Н.М. Гулієва

**ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИРОДНОГО МАТЕРИАЛА – САПОНИТА**

*У статті розглянуто дослідження природного матеріалу – сапоніта, його хімічний аналіз, фізичні властивості. Наведено результати рентгеноскопічного аналізу.*

*Ключевые слова:* сапонит, химический анализ, физические свойства, природный материал.

N.M. Gulieva

**CHEMICAL ANALYSIS AND PHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL MATERIAL – SAPONITE**

*The current state of technology and industry production in the field of material science is characterized by the search for new materials and technologies of their obtaining and processing. One of competitive and energy efficient area of modern materials is the use as starting materials of natural minerals, including saponite. Because it is used for cleaning of drinking water as a sorbent. It is known that some powders which were received from natural mineral are used to manufacture porous filter media.*

*Keywords:* saponite, chemical analysis, physical properties, natural material.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан технологічного та промислового виробництва у сфері матеріалознавства характеризується пошуком нових матеріалів, методів їх отримання та технологіями застосування. Перспективним в цьому напрямку є використання в якості вихідних матеріалів природних мінералів. Відомо, що деякі порошки, які отримані із природних мінералів в тому числі з сапонітів, застосовують для виготовлення пористих фільтруючих матеріалів (ПФМ) [3, 4] з метою очистки питної води [5]. Відомо, що за своїм хімічним складом природні матеріали можуть відрізнятися в залежності від природних умов їх утворення

Аналіз літератури щодо найбільш поширених методів очищення питної води показав, що основними технологічними напрямками вирішення цієї проблеми є різноманітні електрохімічні технології, зворотній осмос та ультрафільтрація, екстракція, хімічне осадження, коагуляційні та флокуляційні технології, флотация, мікробіологічні технології, сорбційні та іонообмінні технології. Дослідженню технологій водопідготовки присвячені роботи таких вчених як: І. Астреліна, І. Атаманюка [5], J.A. Mandarino, M.E. Васка [2], В.Д. Рудя [3, 4], Л.М. Самчук [4], В.В. Співак [5], Ю.І. Тарасевича [8], Н.М. Толстопалової [5] та ін.

**Метою даної роботи** є визначення хімічного складу та фізичних властивостей природного матеріалу – сапоніту Ташківського родовища Хмельницької області.

**Основні результати дослідження.** Сапоніт (англ. saponite) – мінерал, водний алюмосилікат магнію з підкласу шаруватих силікатів, групи монтморилоніту. Назва – від лат. sapo – мило було винайдено ще у 1840 році L.F. Svanbergom [3]. Існують інші назви: мило гірське, мильний камінь, каткінит, піотин, расуліт, таліт. Хімічний склад –  $\text{NaMg}_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . У вигляді ізоморфних домішок містить Fe, іноді Cr, а також Ni, Zn, Cu, Li та ін. Кристалізується в моноклітинній системі. Він є унікальним різновидом великого поняття «бентоніт», з високим вмістом магнію (до 12 %) і являє собою новий вид мінеральної сировини багатогалузевого використання.

Розрізняють: сапоніт алюмінієвий або алюмосапоніт (різновид сапоніту, який містить понад 10 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); сапоніт залізний або лембергіт, ферисапоніт (різновид сапоніту з незначною кількістю  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , який заміщає MgO); сапоніт калієвий або калійсапоніт (різновид сапоніту, який містить до 6,57 %  $\text{K}_2\text{O}$ ); сапоніт мідний або купросапоніт, медмонтит (суміш хризосоли та слюди); сапоніт нікелевий або нікельсапоніт (різновид сапоніту з незначною кількістю NiO, який заміщає MgO); сапоніт цинковий (те ж саме, що й монтморилоніт цинковий, який містить до 39,33 % ZnO); цебедасит (сапоніт з родовища Цебедассі, Італія).

Сапоніт зустрічається в зоні вивітрювання магнезійних порід, метасоматичних доломітизованих вапняках, кислих ґрунтах заповнюючи прогалини. Подібні мінерали: цеоліти, кальцит. Відкриті родовища сапонітових глин на Форерських островах в Данії, штаті Монтана – США, біля озера Верхне – Канада. Сапонітові родовища виявлені також в Україні, в північній частині Хмельницької області. Вони являють собою цілу провінцію бентонітової сировини з унікальними властивостями та складають 100 млн. т. Товщина продуктивного шару складає 10-40 м, а потужність порід – 10-20 м. Найбільш перспективними для промислового видобутку в Україні є Ташківське і Варварівське родовища сапонітових глин, які мають запаси близько 60 млн. т. Ці відклади являють собою глинисту строкату кору вивітрювання базальтових туфів. Останні належать до берестовецької світи волинської серії венду. Вони залягають на теригенних відкладах рифею – нижнього венду і перекриваються значно більш молодими морськими відкладами верхньої крейди, палеогену і неогену.

Серед відомих хімічних формул складу сапоніту є такі:

1. За Є. Лазаренком:  $Mg_3[(OH)_2Al_{0,33}Si_{3,67}O_{10}] \cdot nH_2O$  [1];
2. За К. Фреєм:  $(0,5Ca, Na)_{0,33}(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4 H_2O$  [8];
3. За J.A. Mandarino, M.E. Back:  $(Ca, Na)_{0,15}(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_{2,4}(H_2O)$  [2];

У зв'язку з цим виникла необхідність уточнити хімічний склад сапоніту Ташківського родовища Хмельницької області. Для хімічно-фізичного аналізу відбирали зразки із трьох пластів родовища (дивіться рис. 1, табл. 1) [5].



Рис. 1. Природні заклади сапоніту – (а) та досліджуваний зразок (б)

Таблиця 1. Хімічний склад сапоніту Ташківського родовища Хмельницької області

№ п/п	Хімічний елемент	Сапоніт із Ташківського родовища, %		
		I пласт	II пласт	III пласт
1.	SiO <sub>2</sub>	47,8	48,1	48,4
2.	MgO	13,71	13,84	13,98
3.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,43	12,48	12,53
4.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,7	13,1	13,4
5.	H <sub>2</sub> O	7,36	7,67	7,79
6.	CaO	1,68	1,74	1,87
7.	TO <sub>2</sub>	1,29	1,30	1,31
8.	FeO	1,1	1,2	1,3
9.	K <sub>2</sub> O	0,95	1,10	1,25
10.	CO <sub>2</sub>	0,56	0,66	0,74
11.	MnO	0,21	0,22	0,23
12.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,13	0,15
13.	Na <sub>2</sub> O	0,05	0,07	0,09
14.	Zr	0,012,	0,012,	0,012,
15.	Cr	0,0056	0,005	0,005
16.	S	0,002	0,003	0,004
17.	Ba	0,0015	0,0015	0,0015
18.	V	0,0015	0,0015	0,0015
19.	Ni	0,0015	0,0015	0,0015
20.	La	0,001	0,001	0,001
21.	Cu	0,001	0,001	0,001

За результатами аналізу встановлено, що хімічний склад в тій чи іншій мірі збігається із дослідженнями всіх наведених прикладів, але більш подібний до результатів досліджень В.В. Співак [5].

Фізико-хімічні властивості природного сапоніту – здатність до адсорбції різних хімічних елементів, а також його активованих і модифікованих форм було здійснено за наступною методикою: проведено термічну активацію сапоніту шляхом нагрівання при температурі 300 °С на протязі трьох годин і кислотну активацію 20 %-м розчином HCl (36 % від маси сапоніту) при температурі 95 °С на протязі шести годин. Катіонну модифікацію проводили 0,1 М розчинами солей багатовалентних металів – магнію, алюмінію і заліза при температурі 20 °С на протязі п'яти діб.

Досліджувалися також такі його властивості, як: густина, насипна маса, гранулометричний склад, диспергування та відмулювання, колоїдність, органічні домішки, пластичність, набування, вологість, кількість зв'язаної води, швидкість капілярного просочування, вогнетривкість, питому поверхню, середній радіус пор. Результати дослідження фізико-хімічних властивостей наведені у таблиці 2 [7].

Таблиця 2. Фізико – хімічні властивості сапоніту Ташківського родовища Хмельницької області

Показники	Насипна маса, кг/м <sup>3</sup>	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Пластичність	Гранулометричний склад, %	Питома поверхня (по воді), м <sup>2</sup> /г	Середній радіус пор, нм	Диспергування, %	Вологість, %	Набування, %	Колоїдність, %	Органічні домішки, %	Зв'язана вода, %	Швидкість капілярного просочування, см <sup>3</sup> /с	Вогнетривкість, °С
Значення	0,9 7	3,0 7- 3,1 3	28, 3	>2 мм – 5 1-2 мм – 32 0,5-1,0 мм – 9 0,25-0,5 мм – 14 0,1-0,25 мм – 11 < 0,1 мм – 9	120- 220	1,6 - 3,2	< 6	11- 12	5,5	11, 5- 12, 1	< 0,1 6	25, 8	0,16	1270 - 1310

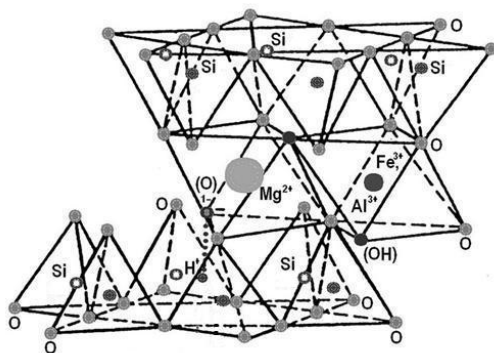


Рис. 2. Сапоніт: кристалічна решітка (а), загальний вигляд (б, в)

Мінерал сапоніт належить до групи триоктаедричних магнієвих смектитів, з відносно великою кристалічною будовою (рис. 2а). Має високий вміст магнію MgO, в якому алюміній Al<sup>3+</sup> майже повністю заміщений на магній Mg<sup>2+</sup>, а кремній Si<sup>4+</sup>, частково заміщений Al<sup>3+</sup>. Кристалічна структура сапоніту складається з двох шарів ненасичених форм: двох тетраедричних решіток SiO<sub>2</sub> і однієї октаедричної решітки, розташованої між ними і яка містить, в основному, Al, Mg, Fe за типом 2:1. Між цими трьома шарами кристалічної решітки може відбуватися ізоморфний обмін.

Завдяки цьому він володіє високими адсорбційними і іонообмінними властивостями та має катіонно-обмінну здатність 50-100 мг/екв. Ємність катіонного обміну сапоніту значно більша, ніж трепела і глауконіту і становить 0,68 мг/екв/г.

Рентгеноскопічний аналіз природного матеріалу – сапоніту було проведено за допомогою рентгенографічного методу на дифрактометрі ДРОН-4-13 з використанням  $K_{\alpha}$  випромінювання мідного аноду. Зразки досліджувались в інтервальному режимі зі швидкістю лічильника 1 – 2 градуси в хвилину та із швидкістю стрічки 720 мм в годину в інтервалі кутів  $2\theta$  від 20 до 100 градусів (рис. 3). Розшифрування проводилось за допомогою Міжнародної бази структурних даних.

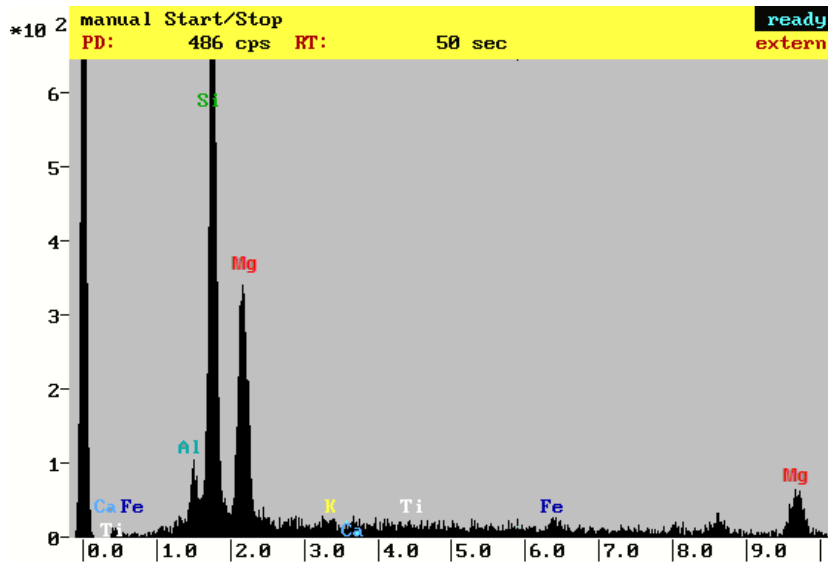


Рис. 3. Рентгеноскопічний аналіз сапоніту

Зразки для металографічних досліджень готувалися за стандартною методикою. Шліфи зразків досліджували за допомогою мікроскопу моделі ММР-4 при збільшенні  $\times 10000$  (рис. 4). З метою отримання чіткого зображення границь зерен шліфи протравлювали 4%  $H_2SO_4$ . Площинну пористість визначали по мікрофотографіях шліфів за допомогою програми PHOTOM та програми Smart-eye.

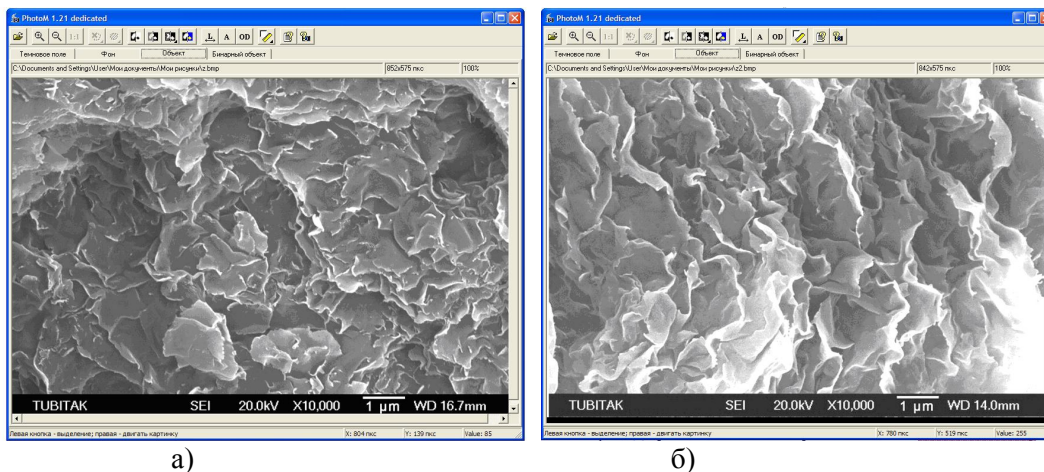


Рис. 4. Структура сапоніту  $NaMg_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2 \cdot 4H_2O$ : а) середнього шару при  $\times 10000$ ; б) нижнього шару при  $\times 10000$

**Висновок.** Аналіз сапонітів Ташківського родовища Хмельницької області дозволив встановити спів падання їх хімічного складу та фізико-механічних характеристик з сапонітами інших родовищ. Багаточисленні дослідження цих властивостей довели, що сапоніти можуть використовуватися в харчовій промисловості, будівництві, сільському господарстві, медицині та ін. Тому у подальших дослідженнях планується виготовлення пористих фільтрувальних матеріалів з даного родовища для водопідготовки питної води.

1. Лазаренко Є.К. Курс мінералогії. – К.: Вища школа, 1970. – 599 с.
2. Mandarino, J.A. & M.E. Back (2004). Fleischer's Glossary of Mineral Species 2004. Mineralogical Record, Tucson, Arizona, pp. 310.
3. Рудь В.Д., Гулієва Н.М. Використання порошкових композиційних матеріалів на основі природних мінералів для водопідготовки питної води. // Вода в харчовій промисловості. – Збірник тез доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів та студентів. – Одеса, 2013 – С. 53-54.
4. Рудь В.Д., Самчук Л.М., Гулієва Н.М. Использование СВС-процесса для получения композиционных материалов. // Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. – Сборник докладов 8-го Международного симпозиума. – Минск, 2013 – С. 496-500.
5. Spivak, V. Astrelin I., Tolstopalova N., Atamaniuk I. Ecological sorbent which is mainly consist of saponite mineral from Ukrainian clay-field // Chemistry & Chemical Technology. – 2012. – Vol. 6. – No.4. – P. 451-457.
6. Svanberg L.F., 1840. Vet. Akad. Stockholm Handl. – p. 153.
7. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессе очистки воды. Киев: Наукова думка, 1981. – 208 с.
8. Фрей К. Минералогическая энциклопедия / под ред К. Фрея. – Л.: Недра, 1985. – 239 с.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2014.



УДК 539.3

М.В. Делявський<sup>1</sup>, Н.В. Здолбіцька<sup>2</sup>, А.П. Здолбіцький<sup>2</sup><sup>1</sup>Технологічно-природничий університет, м. Бидгощ, Польща<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет, м. ЛуцькМАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
ТОНКИХ ОРТОТРОПНИХ ПЛИТ

Запропоновано спосіб моделювання роботи плитової конструкції довільної конфігурації за різних умов завантаження та закріплення. Моделювання полягає у записі крайових умов в різних точках контуру плити. Для цього побудовані координатні та силові функції переміщень, моментів і поперечних сил, а кожна з цих величин представлена як сума силової функції і координатної функції, помноженої на невідомі параметри розв'язку. Такий підхід дозволяє просто записувати крайові умови на криволінійному контурі плити і задовольняти їх за допомогою невідомих параметрів.

**Ключові слова:** ортотропна плита, математичне моделювання, напружено-деформований стан, крайові умови, вузлові точки.

Рис. 1. Форм. 24. Літ. 10.

М.В. Делявский, Н.В. Здолбицкая, А.П. Здолбицкий

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКИХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛИТ

Предложен способ моделирования работы плиточных конструкций произвольной конфигурации при различных условиях нагружения и заземления. Моделирование состоит в записи граничных условий в разных точках контура плиты. Построены координатные и силовые функции перемещений, моментов и поперечных сил. Каждая из этих величин представлена суммой силовой функции и ее координатной функции, умноженной на неизвестные параметры решения. Такой подход позволяет достаточно просто записывать граничные условия на криволинейном контуре плиты и удовлетворять их с помощью неизвестных параметров.

**Ключевые слова:** ортотропная плита, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, граничные условия, узловые точки.

M.V. Delyavskyy, N.V. Zdolbitska, A.P. Zdolbitsky

MATHEMATICAL SIMULATION OF STATE OF STRESS AND STRAIN IN THIN  
ORTHOTROPIC PLATES

The simulation of work of thin arbitrary configuration orthotropic plates under external loading and various boundary conditions has been suggested. The modeling consists in recording of boundary conditions in various points of plate contour. The coordinate and force functions of displacements, moments and transverse forces were constructed each of these magnitudes is represented as sum of force function and coordinate one multiplied by unknown parameters of solution. The suggested approach allows simply to record the boundary conditions at the curvelinear contour of the plate and to satisfy them with unknown parameters.

**Keywords:** orthotropic plate, mathematical modeling, stress-strained state, boundary conditions, the node points.

**Постановка проблеми.** Розглянемо тонку ортотропну плиту довільної конфігурації і віднесемо її до декартової системи координат  $Ox_1x_2x_3$  з початком у геометричному центрі плити. Вісь  $Ox_3$  направляємо вниз, а осі  $Ox_1$  і  $Ox_2$ , розміщаємо в серединній площині плити так, щоб утворена система координат була правою (рис. 1). На верхній основі плита завантажена довільно розподіленим навантаженням інтенсивності  $q(x_1, x_2)$ , а її нижня основа є вільна від навантажень.

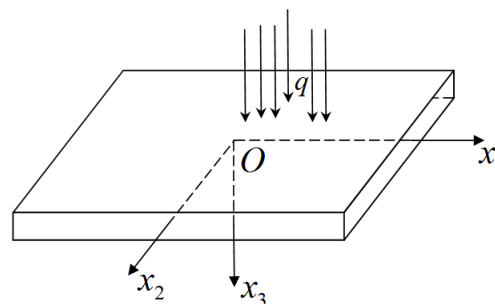


Рис. 1. Схема плити



Пружна рівновага такої плити описується диференціальним рівнянням в частинних похідних зі сталими коефіцієнтами:

$$L(x_1, x_2)w(x_1, x_2) = q(x_1, x_2), \quad (1)$$

де  $L(x_1, x_2)$  є диференціальним оператором четвертого порядку

$$L(x_1, x_2) = D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + 2D_{33} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4}. \quad (2)$$

Тут  $D_{11}$  і  $D_{22}$  – жорсткості на згин матеріалу в головних осях ортотропії;  $D_{33} = D_{12} + 2D_{66}$ , де  $D_{66}$  є жорсткість на кручення ортотропного матеріалу, а  $D_{12}$  – змішана жорсткість.

Розв'язок диференціального рівняння (1) вибираємо у вигляді суми двох розв'язків:

$$w = w_0 + w_* \quad (3)$$

загального розв'язку  $w_0$  однорідного рівняння

$$L(x_1, x_2)w(x_1, x_2) = 0 \quad (4)$$

і якогось часткового розв'язку  $w_*$  рівняння (1).

Частковий розв'язок  $w_*$  вибираємо у вигляді суми подвійних тригонометричних рядів

$$w_*(x_1, x_2) = C_{pqmn} T_{pm}^{[j]}(x_j) \cdot T_{qn}^{[3-j]}(x_{3-j}). \quad (5)$$

Тут  $C_{pqmn}$  – невідомі коефіцієнти, які визначаються з розв'язку диференціального рівняння (1). Для цього зовнішнє навантаження подаємо у вигляді подібному до (5):

$$q(x_1, x_2) = Q_{pqmn} T_{pm}^{[j]}(x_j) \cdot T_{qn}^{[3-j]}(x_{3-j}), \quad (6)$$

де  $Q_{pqmn}$  – коефіцієнти розкладу функції  $q(x_1, x_2)$  в подвійні тригонометричні ряди.

На коефіцієнти  $C_{pqmn}$  та відповідно і на коефіцієнти  $Q_{pqmn}$  накладаються обмеження, що  $C_{pqmn} = C_{qpmn}$ , якщо  $p = q$ .

Тут і далі використано правило сумування Ейштейна: в кожному доданку виконується сумування за індексом, який повторюється двічі:  $j = 1, 2$ ;  $p, q = 1 \div 4$ ;  $m, n = 1 \div \infty$ .

У формулах (5)-(6) прийнято позначення:

$$\begin{aligned} T_{1k}^{[j]}(x_j) &= \sin(\gamma_k^{[j]} x_j), & T_{2k}^{[j]}(x_j) &= \cos(\delta_k^{[j]} x_j), \\ T_{3k}^{[j]}(x_j) &= \sin(\delta_k^{[j]} x_j), & T_{4k}^{[j]}(x_j) &= \cos(\gamma_k^{[j]} x_j), \end{aligned} \quad (7)$$

де

$$\gamma_k^{[j]} = \frac{k\pi}{a_j}; \quad \delta_k^{[j]} = \frac{(2k-1)\pi}{a_j}; \quad k = 1 \div \infty. \quad (8)$$

Надалі введемо параметр

$$\kappa_{pk}^{[j]} = \begin{cases} \gamma_k^{[j]}, & p = 1, 4; \\ \delta_k^{[j]}, & p = 2, 3. \end{cases} \quad (9)$$

Що дасть змогу записати єдиним чином зв'язки між  $T_{pk}^{[j]}(x_j)$  та їх похідними.

$$\begin{aligned} T_{1k}^{[j]'}(x_j) &= \kappa_{1k}^{[j]} T_{4k}^{[j]}(x_j); & T_{2k}^{[j]'}(x_j) &= -\kappa_{2k}^{[j]} T_{3k}^{[j]}(x_j); \\ T_{3k}^{[j]'}(x_j) &= \kappa_{3k}^{[j]} T_{2k}^{[j]}(x_j); & T_{4k}^{[j]'}(x_j) &= -\kappa_{4k}^{[j]} T_{1k}^{[j]}(x_j); \\ T_{pk}^{[j]''}(x_j) &= -\kappa_{pk}^{[j]2} T_{pk}^{[j]}(x_j); \\ T_{1k}^{[j]'''}(x_j) &= -\kappa_{1k}^{[j]3} T_{4k}^{[j]}(x_j); & T_{2k}^{[j]'''}(x_j) &= \kappa_{2k}^{[j]3} T_{3k}^{[j]}(x_j); \\ T_{3k}^{[j]'''}(x_j) &= -\kappa_{3k}^{[j]3} T_{2k}^{[j]}(x_j); & T_{4k}^{[j]'''}(x_j) &= \kappa_{4k}^{[j]3} T_{1k}^{[j]}(x_j); \end{aligned}$$

$$T_{pk}^{[j](IV)}(x_j) = \kappa_{pk}^{[j]4} T_{pk}^{[j]}(x_j). \quad (10)$$

Загальний розв'язок  $w_0(x_1, x_2)$  однорідного рівняння (4) вибираємо у вигляді:

$$w_0(x_1, x_2) = f_{pk}^{[j]}(x_j) \cdot T_{pk}^{[3-j]}(x_{3-j}), \quad (11)$$

де  $f_{pk}^{[j]}(x_j)$  є невідомі функції, які визначаються в процесі розв'язку задачі.

Підставимо розв'язок (11) до рівняння (4). Отримаємо:

$$\begin{aligned} & D_{11} \left[ f_{pk}^{[1](IV)}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) + f_{pk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1](IV)}(x_1) \right] + \\ & + 2D_{33} \left[ f_{pk}^{[1]''}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]''}(x_2) + f_{pk}^{[2]''}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]''}(x_1) \right] + \\ & + D_{22} \left[ f_{pk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2](IV)}(x_2) + f_{pk}^{[2](IV)}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) \right] = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Залежності (10) дозволяють розділити змінні в рівнянні (12). В результаті приходимо до двох незв'язних систем звичайних однорідних диференціальних рівнянь відносно невідомих функцій  $f_{pk}^{[j]}(x_j)$ .

$$\begin{aligned} & D_{11} f_{pk}^{[1](IV)}(x_1) - 2D_{33} \kappa_{pk}^{[2]2} f_{pk}^{[1]''}(x_1) + D_{22} \kappa_{pk}^{[2]4} f_{pk}^{[1]}(x_1) = 0, \\ & D_{22} f_{pk}^{[2](IV)}(x_2) - 2D_{33} \kappa_{pk}^{[1]2} f_{pk}^{[2]''}(x_2) + D_{11} \kappa_{pk}^{[1]4} f_{pk}^{[2]}(x_2) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Кожна з цих систем містить два незалежні рівняння, що відповідають значенням параметра  $p = 1$  і  $p = 2$ . Рівняння для  $p = 1; 3$  і  $p = 2; 4$  такі ж самі.

Розв'язки цих рівнянь вибираємо у вигляді:

$$f_{pk}^{[j]}(x_j) = R_{pk}^{[j]} \exp(\lambda_{pk}^{[j]} x_j). \quad (14)$$

Очевидно, що:

$$\lambda_{1k}^{[j]} = \lambda_{4k}^{[j]}, \quad \lambda_{2k}^{[j]} = \lambda_{3k}^{[j]}.$$

У результаті приходимо до чотирьох лінійних алгебраїчних (так званих характеристичних) рівнянь відносно невідомих параметрів  $\lambda_{pk}^{[j]}$ :

$$\begin{aligned} & D_{11} \lambda_{pk}^{[1]4} - 2D_{33} \lambda_{pk}^{[1]2} \kappa_{pk}^{[2]2} + D_{22} \kappa_{pk}^{[2]4} = 0, \\ & D_{22} \lambda_{pk}^{[2]4} - 2D_{33} \lambda_{pk}^{[2]2} \kappa_{pk}^{[1]2} + D_{11} \kappa_{pk}^{[1]4} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Проведені дослідження показали, що для всіх реальних матеріалів корені цих рівнянь є комплексно-спряженими. Позначимо їх

$$\begin{aligned} & \lambda_{1k}^{[j]} = \alpha_{1k}^{[j]} + i \cdot \beta_{1k}^{[j]}, \quad \lambda_{2k}^{[j]} = -\lambda_{1k}^{[j]}, \\ & \lambda_{3k}^{[j]} = \bar{\lambda}_{1k}^{[j]}, \quad \lambda_{4k}^{[j]} = -\bar{\lambda}_{1k}^{[j]}. \end{aligned} \quad (16)$$

Використовуючи ці залежності записуємо загальні розв'язки рівнянь (15):

$$f_{pk}^{[j]}(x_j) = R_{vpk}^{[j]} E_{vpk}^{[j]}(x_j), \quad v = 1 \div 4. \quad (17)$$

Функції  $E_{vpk}^{[j]}(x_j)$ , які названо базовими функціями розв'язку визначаються так:

$$\begin{aligned} & E_{1pk}^{[j]}(x_j) = \frac{\cosh(\alpha_{pk}^{[j]} x_j) \cos(\beta_{pk}^{[j]} x_j)}{\exp(\alpha_{pk}^{[j]} a_j)}, \\ & E_{2pk}^{[j]}(x_j) = \frac{\cosh(\alpha_{pk}^{[j]} x_j) \sin(\beta_{pk}^{[j]} x_j)}{\exp(\alpha_{pk}^{[j]} a_j)}, \end{aligned}$$

$$E_{3pk}^{[j]}(x_j) = \frac{\sinh(\alpha_{pk}^{[j]} x_j) \cos(\beta_{pk}^{[j]} x_j)}{\exp(\alpha_{pk}^{[j]} a_j)};$$

$$E_{4pk}^{[j]}(x_j) = \frac{\sinh(\alpha_{pk}^{[j]} x_j) \sin(\beta_{pk}^{[j]} x_j)}{\exp(\alpha_{pk}^{[j]} a_j)}.$$
(18)

Враховуючи формули (3), (5), (11), (17) запишемо вираз на прогин тонкої ортотропної плити:

$$w(x_1, x_2) = R_{vpk}^{[j]} W_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) + W_*(x_1, x_2). \quad (19)$$

Функції  $W_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2)$  названо координатними, а  $W_*(x_1, x_2)$  – силовими функціями прогину плити. Останні є частковим розв'язком рівняння (1).

Координатні функції прогину плити запишемо згідно формул (11), (17):

$$W_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) = E_{vpk}^{[j]}(x_j) T_{pk}^{[3-j]}(x_{3-j}). \quad (20)$$

Маючи вираз на прогин плити за допомогою відомих в теорії плит співвідношень [5,9] визначаємо тангенціальні переміщення:

$$u_1(x_1, x_2) = -x_3 \frac{\partial w}{\partial x_1} = R_{vpk}^{[j]} \cdot U_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2, x_3) + U_*(x_1, x_2, x_3),$$

$$u_2(x_1, x_2) = -x_3 \frac{\partial w}{\partial x_2} = R_{vpk}^{[j]} \cdot V_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2, x_3) + V_*(x_1, x_2, x_3). \quad (21)$$

Моменти:

$$M_{11}(x_1, x_2) = -\left( D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) = R_{vpk}^{[j]} \cdot X_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) + X_*(x_1, x_2),$$

$$M_{22}(x_1, x_2) = -\left( D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) = R_{vpk}^{[j]} \cdot Y_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) + Y_*(x_1, x_2),$$

$$M_{12}(x_1, x_2) = -2D_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} = R_{vpk}^{[j]} \cdot Z_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) + Z_*(x_1, x_2), \quad (22)$$

і поперечні сили:

$$Q_1(x_1, x_2) = -\left( D_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x_1^3} + (D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x_1 \partial x_2^2} \right) = R_{vpk}^{[j]} \cdot T_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) + T_*(x_1, x_2),$$

$$Q_2(x_1, x_2) = -\left( D_{22} \frac{\partial^3 w}{\partial x_2^3} + (D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x_1^2 \partial x_2} \right) = R_{vpk}^{[j]} \cdot G_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2) + G_*(x_1, x_2), \quad (23)$$

у плиті.

Вирази для узагальнених поперечних сил отримуються із формул (23), в яких множник  $(D_{12} + 2D_{66})$  замінюється на  $(D_{12} + 4D_{66})$ .

Величини  $X_{vpk}^{[j]}(x_1, x_2)$  і т. д. названо координатними, а величини з «\*» – силовими функціями переміщень, моментів і поперечних сил.

Силкові функції визначаються зі співвідношень (21)–(23), в яких замість функції  $w_*(x_1, x_2)$  слід підставити функцію прогину  $W_*(x_1, x_2)$ .

Координатні функції теж визначаються з цих співвідношень і мають вигляд:

$$X_{vpk}^{[1]}(x_1, x_2) = -\left[ D_{11} E_{vpk}^{[1]^2}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) + D_{12} E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]^2}(x_2) \right],$$

$$X_{vpk}^{[2]}(x_1, x_2) = -\left[ D_{11} E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]^2}(x_1) + D_{12} E_{vpk}^{[2]^2}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) \right],$$

$$Y_{vpk}^{[1]}(x_1, x_2) = -\left[ D_{12} E_{vpk}^{[1]^2}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) + D_{22} E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]^2}(x_2) \right],$$

$$Y_{vpk}^{[2]}(x_1, x_2) = -\left[ D_{12} E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]^2}(x_1) + D_{22} E_{vpk}^{[2]^2}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) \right],$$

$$\begin{aligned}
Z_{vpk}^{[1]}(x_1, x_2) &= -2D_{66} \left[ E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) \right], \\
Z_{vpk}^{[2]}(x_1, x_2) &= -2D_{66} \left[ E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) \right], \\
T_{vpk}^{[1]}(x_1, x_2) &= - \left[ D_{11} E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) + (D_{12} + 2D_{66}) E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) \right], \\
T_{vpk}^{[2]}(x_1, x_2) &= - \left[ D_{11} E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) + (D_{12} + 2D_{66}) E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) \right], \\
G_{vpk}^{[1]}(x_1, x_2) &= - \left[ D_{22} E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) + (D_{12} + 2D_{66}) E_{vpk}^{[1]}(x_1) \cdot T_{pk}^{[2]}(x_2) \right], \\
G_{vpk}^{[2]}(x_1, x_2) &= - \left[ D_{22} E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) + (D_{12} + 2D_{66}) E_{vpk}^{[2]}(x_2) \cdot T_{pk}^{[1]}(x_1) \right].
\end{aligned} \tag{24}$$

Маючи координатні та силові функції на підставі співвідношень (19)-(24) отримуємо вирази переміщень, моментів і поперечних сил в плиті.

Далі моделюємо працю конструкції шляхом запису краєвих умов в окремих точках контуру, які названо вузловими точками. Вузлові точки обов'язково повинні бути пронумеровані, причому нумерація має бути неперервною і задані їх координати. Розбиття контуру плити зазвичай є рівномірним, якщо задані однорідні краєві умови або частково рівномірним (рівномірним на окремих сегментах), якщо на контурі задані змішані краєві умови. Краєві умови записуються в кожній вузловій точці тільки в криволінійній системі координат. Збільшення точності розв'язку досягається шляхом збільшення кількості вузлових точок на контурі плити та їх оптимального розміщення. Допускається запис однієї групи краєвих умов в різних вузлових точках (наприклад згинального моменту в вершині плити, а прогину – в її околі.

Можливі два способи розміщення вузлових точок на контурі плити:

1. вузлові точки розміщуються в кутових точках плити, а також в місцях прикладення зосереджених опор і в місцях розриву краєвих умов;

2. вузлові точки розміщуються в околі вказаних точок асимптотично наближаючись до них.

Кожен спосіб має свої переваги над іншим і недоліки.

На наш погляд оптимальним є змішаний спосіб, при якому вузлові точки розміщуються в кутових точках плити і в місцях дії зосереджених опор, а також в околі точок розриву краєвих умов.

1. Делявський М.В., Здолбіцька Н.В., Здолбіцький А.П. Метод конструкційних елементів у розрахунку плит складної конфігурації на пружній основі. Монографія. – Луцьк: ЛНТУ, 2012. – 102 с.
2. Здолбіцька Н. В. Моделювання напружено-деформованого стану плит на пружних основах методом конструкційних елементів / Н. В. Здолбіцька, М. В. Делявський // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань „Машинобудування та металообробка”, „Інженерна механіка”, „Металургія та матеріалознавство”). – Луцьк, 2010. – Вип. 27. – С. 105 – 109.
3. Здолбіцька Н.В. Матричний метод розрахунку плит на пружній основі Вінклера / Н. В. Здолбіцька, М. В. Делявський // Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст. Вип. 19. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2009. – 63-71 с.
4. Здолбіцька Н.В. Напружено-деформований стан тонкої ортотропної плити на трипараметричній пружній основі / Н.В. Здолбіцька, М.В. Делявський // Вісник Донецького національного університету. Сер. А: Природничі науки. – Донецьк. – 2009. – Вип. 1. – С. 134–140.
5. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер – М.: Гос. изд. физ.-мат. гиз, 1963. – 636 с.
6. Delyavskyy M., Olejniczak M., Zdolbicka N. Computational model of orthotropic slab reinforced with space truss // Bridges: Traditional and future. University of Technology and Life Sciences Press. – Bydgoszcz. – 2011. – С. 57-68.
7. Delyavskyy M. Model obliczeniowy płyty ortotropowej wzmocnionej kratownicą przestrzenną / Delyavskyy M., Olejniczak M., Zdolbicka N., Nitka J. // II Międzynarodowa konferencja mostowa im. Rudolfa Modrzejewskiego „Mosty. Tradycja i Nowoczesność”. Streszczenia. – Bydgoszcz. – 2010. – С. 21.
8. Delyavskyy M. Rozwiązanie płyty ortotropowej na podłożu sprężystym typu Pasternaka / M. Delyavskyy, N. Zdolbicka, A. Zdolbicki // Матеріали VI Польсько-Українського Наукового Симпозіуму “Актуальні Задачі Механіки Неоднорідних Середовищ”. – Варшава. – 2005. – С. 35–36.
9. Huber M.T. Die Grundlagen einer rationellen Berechnung der Eisenbetonplatten / M.T. Huber Zeitschr. Der Österr. Ing. u. Archit. Vereins, 1914. – 557 с.
10. Mykhaylo Delyavskyy, Nina Zdolbicka. Nowe podejście do rozwiązywania konstrukcji Płytowych // IV konferencja inżynierskie i przestrzenne aspekty zabudowy obszarów niezurbanizowanych. – Warszawa. – 2010. – С. 23.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2014.

УДК 621.81.004.67

**В.Ю. Денисюк, В.Ю. Заблоцький, Ю.С. Лапченко**  
**ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ ПРИШВИДШЕНОГО НАЛАГОДЖЕННЯ**  
**БАГАТОШПИНДЕЛЬНИХ ТОКАРНИХ АВТОМАТІВ В УМОВАХ**  
**БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПІДШИПНИКОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Розглянуто конструкції допоміжного та різального інструменту для пришвидшеного виконання переналагоджувальних операцій, високопродуктивні методи виконання переналагоджень багатошпindelних токарних автоматів, а також налаштування різального інструменту поза верстатом з використанням індуктивних перетворювачів в комплекті з приладом реєстрації, які дозволили підвищити якість геометричної структури оброблюваної поверхні кілець підшипників, підвищити ефективність токарно-автоматних операцій в умовах в умовах багатомініклатурного підшипникового виробництва.*

*Ключові слова:* багатошпindelний токарний автомат, налагодження, переналагодження, механічне оброблення, різець, державка, точність.

*Рис. 6. Форм. 2. Літ. 4.*

**В.Ю. Денисюк, В.Ю. Заблоцький, Ю.С. Лапченко**  
**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ УСКОРЕННОГО НАЛАЖИВАНИЯ**  
**МНОГОШПИНДЕЛЬНЫХ ТОКАРНЫХ АВТОМАТОВ В УСЛОВИЯХ**  
**МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПОДШИПНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Рассмотрены конструкции вспомогательного и режущего инструмента для ускоренного выполнения переналаживаемых операций, высокопроизводительные методы выполнения переналадок многошпindelных токарных автоматов, а также настройки режущего инструмента вне станка с использованием индуктивных преобразователей в комплекте с прибором регистрации, которые позволили повысить качество геометрической структуры обрабатываемой поверхности колец подшипников, повысить эффективность токарно-автоматных операций в условиях в условиях многономенклатурного подшипникового производства.*

*Ключевые слова:* мноошпindelный токарный автомат, наладка, переналадка, механическая обработка, резец, державка, точность.

**V.Y. Denysiuk, V.Y. Zablotsky, Y.S. Lapchenko**  
**PRACTICAL IMPLEMENTATION OF STREAMLINED COMMUNICATION**  
**TECHNIQUES POLY-LATHE MACHINE IN TERMS MANY CLASSIFICATION BEARING**  
**PRODUCTION**

*The design of auxiliary and cutting tool for accelerated implementation over-adjusting operations, high-performance methods over-adjusting poly-lathe machine and cutting tool configuration outside the machine using inductive transducers supplied with the device registration, which allowed to increase the quality of the geometric structure of the treated surface bearing rings, to improve screw-automaton operations in terms of conditions many classification bearing production.*

*Key words:* poly-spindle lathe automat, adjusting, over-adjusting, mechanical treatment, cutter, holder, precision.

**Вступ.** У зв'язку з переводом національного господарства на ринкові відносини з'явилась необхідність перебудови машино- та приладобудівного виробництва з масового і багатосерійного на гнучкопереналагоджувальне середньо- і дрібносерійне з високим рівнем технологічної гнучкості, підвищеними вимогами до якості виробів і до забезпечення їх належної конкурентоспроможності.

Основною причиною стримування ефективності використання багатоінструментальних багатошпindelних токарних автоматів для формоутворення поверхонь тіл обертання в умовах серійного виробництва є відсутність на сьогоднішній день відпрацьованих, науково підтверджених методик технологічної підготовки верстатів-автоматів, проектування операцій та інструментальних налагоджень, а також відсутність прогресивних способів виконання переналагоджувальних операцій. У зв'язку з цим набуває актуальності задача підвищення технологічної гнучкості і циклової продуктивності на основі вдосконалення систем технологічної підготовки багатошпindelних токарних автоматів.

**Постановка питання.** Продуктивність праці та ефективність оброблення кілець підшипників на багатошпindelних токарних автоматах 1Б265П-6К в умовах серійного та дрібносерійного виробництва в значній мірі залежить від часу налагодження та переналагодження верстату, від стану технічного рівня різального інструменту та оснащення. Використання прогресивних методів налагодження сприяє більш повному використанню технологічних можливостей верстатів, різального і допоміжного інструменту.

Від рівня уніфікації елементів технологічної системи в значній мірі залежить реалізація

технологічних можливостей верстату, а також технологічна продуктивність механічного оброблення. Основними напрямками уніфікації на дільниці багатшпиндельних токарних автоматів є:

1. Уніфікація деталей, які обробляються; уніфікація елементарних оброблюваних поверхонь.
2. Уніфікація допоміжного інструменту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час у вітчизняній та зарубіжній практиці для механічного оброблення деталей на верстатах з ЧПК і на верстатах-автоматах широке застосування знаходять інструменти з механічним кріпленням пластин твердого сплаву. Такі різці володіють цілими рядом переваг порівняно з напайним інструментом. Це, в першу чергу, скорочення витрат часу і засобів, пов'язаних з переточуванням інструменту, економія матеріалу на виготовлення корпусів різців, широка область застосування, зниження трудомісткості виготовлення інструменту.

Кожен різець з напаяною пластиною твердого сплаву, може переточуватися від 4-х до 10-ти разів після чого викидається в металобрухт. Корпус різця з механічним кріпленням пластини твердого сплаву може використовуватися впродовж декількох місяців роботи.

Проведені дослідження показали, що для багатьох переходів і операцій оброблення деталей на багатшпиндельних токарних автоматах можуть успішно застосовуватися різці з механічним кріпленням пластин твердого сплаву, в тому числі і для оброблення робочих поверхонь кілець підшипників. Виключенням є відрізні, канавочні, галтельні і спеціальні різці що вимагають спеціального заточування профілю різального леза.

**Виклад основного матеріалу.** Для розроблення конструкцій різців використовують також принцип згідно якого інструмент повинен мати взаємозамінні елементи і налагоджуватись на певний розмір поза верстатом. Причому всі різці забезпечено регульовальним гвинтом. Конструкцію такого різця показано на рис. 1.

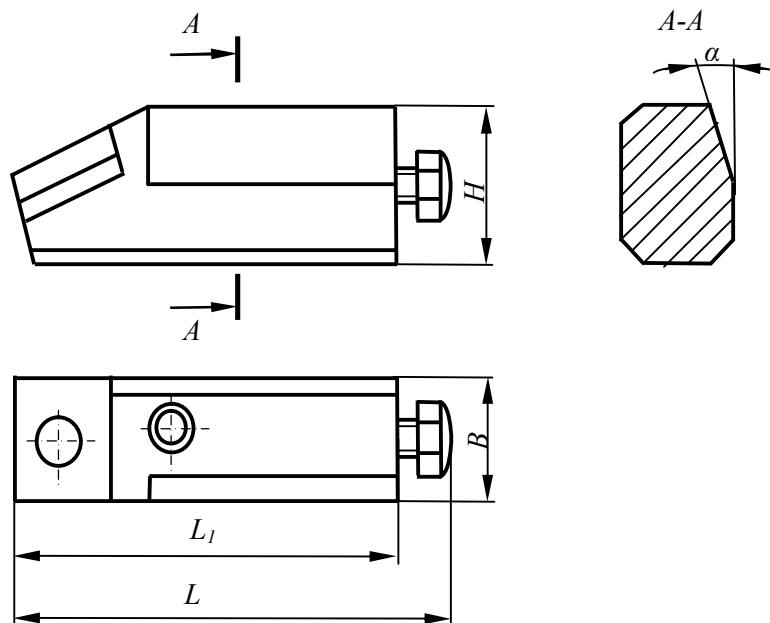


Рис. 1. Різець з регульовальним гвинтом

Затиск різця в державці здійснюється за допомогою двох сухарів і диференціальних гвинтів за рахунок перекосу корпусу різця виконаного під кутом  $\alpha=15^\circ$ .

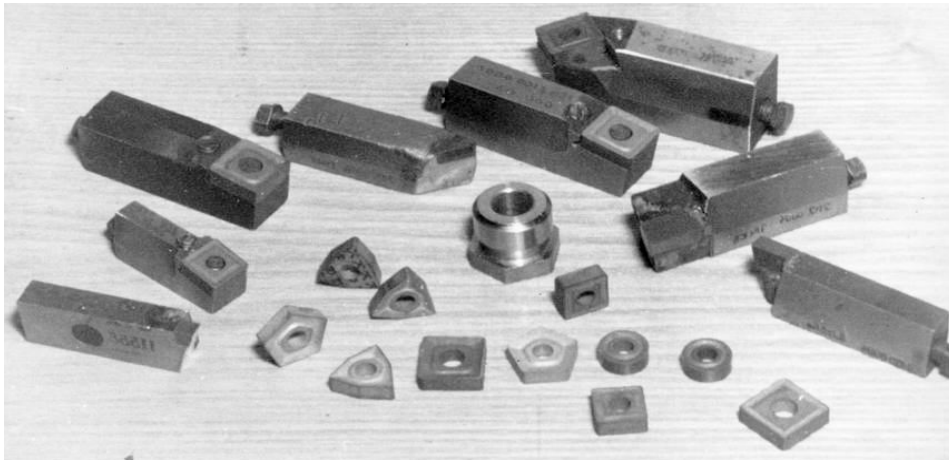
Форми і розміри корпусів запропонованих різців з напайними пластинами аналогічні. Вага різця в два рази менше ваги різців, які використовуються на багатшпиндельних токарних автоматах.

Форми дослідних зразків різців запропонованих для впровадження і непереточуваних змінних пластин твердого сплаву показано на рис. 2.

Використання методу налагодження інструменту поза верстатом дозволяє скоротити час на зміну і перезаточування різців в 3 рази, що дозволило отримати значний економічний ефект [1, 3, 4].

Важливу роль у підвищенні ефективності оброблення відіграє і допоміжний інструмент,

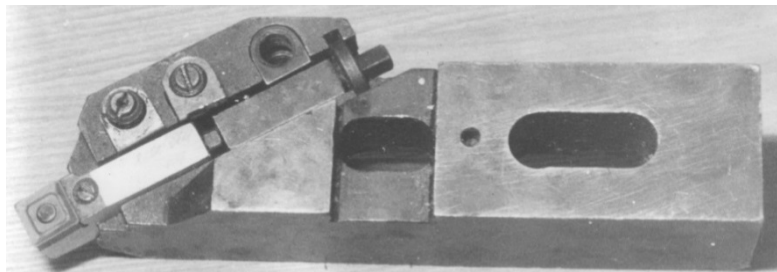
зокрема – державки різців (різцетримачі). Для закріплення різального інструменту в робочому просторі верстату, а також для реалізації методики налагодження інструменту поза верстатом за координатами його розташування на супортах і позиціях багатопиндельних токарних автоматах, визначених згідно спроектованих схем інструментальних налагоджень, розроблені та виготовлені зразки спеціальних різцевих державок (рис. 3 – 5).



**Рис. 2. Конструкції різців з непереточуваними змінними пластинами твердого сплаву**

Для розмірного настроювання інструменту поза верстатом використовуються спеціальні установочні державки, розміри та форма паза для встановлення різця співпадають з формою та розмірами пазів робочих державок. На рис. 3 показано конструкцію однієї з таких державок, призначеної для налагодження прохідного різця на розмір за допомогою мікрометра. Кріплення державок до супорта верстату і грубе налагодження їх положення в робочому просторі здійснюють за допомогою уніфікованих болтів М16 та сухарів, що входять в пази супорта.

Державки поздовжнього супорта кріпляться за допомогою притискних планок кріплення типу «ластівчин хвіст».



**Рис. 3. Інструментальна державка поперечного супорта багатопиндельного токарного автомата**

Спроектвані державки задовольняють наступні вимоги:

1. Забезпечення жорсткості кріплення інструменту.
2. Забезпечення необхідної точності встановлення інструменту на верстаті.
3. Забезпечення швидкої зміни і налагодження інструменту після переточування або для заміни пластин твердого сплаву.
4. Забезпечення вільності холостих рухів інструменту в процесі здійснення робочого циклу оброблення деталі.

Усім перерахованим вимогам відповідають запропоновані конструкції державок, застосування яких підвищує рівень технологічної підготовки багатопиндельних токарних автоматів в умовах багатомоноклатурного виробництва.

Як показав досвід експлуатації автоматизованих верстатів у серійному виробництві, використання методів налаштування інструменту поза верстатом на спеціальних пристосуваннях супроводжується економічним ефектом. Ці пристосування (одно- або багатомісні) використовуються для певних інструментів. Вони прості у виготовленні та експлуатації. Їх конструкції повинні відповідати ряду вимог. Необхідно, щоб базові поверхні пристосувань

відповідали формі та розмірам посадочних місць верстата або робочих державок, контакт різальної частини інструмента з вимірювальним вузлом в пристосуванні був таким, яким він буде між деталлю, яка обробляється, і різальним інструментом, твердість контактних поверхонь пристосування була б не нижча твердості інструмента, під час налагодження не відбувалось викришування різальних лез інструмента (вимірювальне зусилля не повинно перевищувати 0,2 Н).

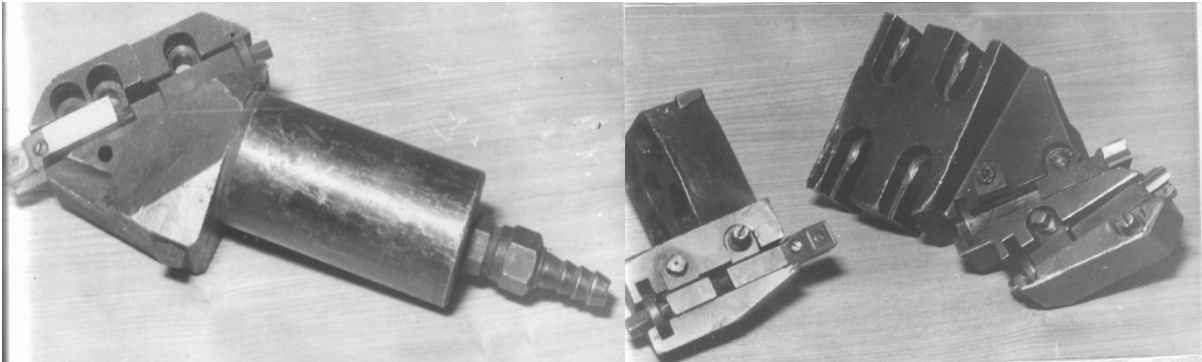


Рис. 4. Інструментальні державки поздовжнього супорта

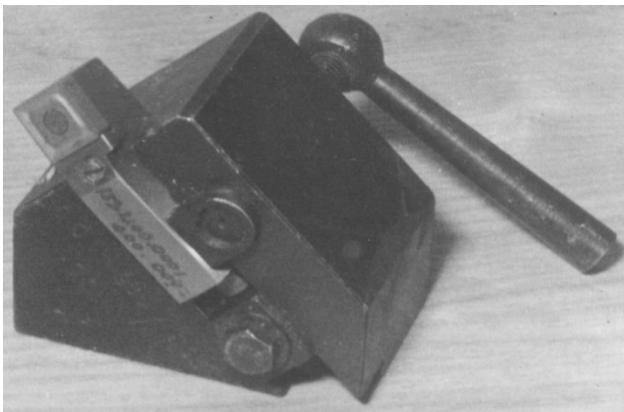


Рис. 5. Державка для налагодження прохідного різця на розмір поза верстатом

Вибираючи точність пристосування для налаштування, слід виходити з того, що вимірювальні засоби типу скоб або шаблонів забезпечують точність в межах 0,3 мм, пристосування, відлік вимірювань у яких ведеться за допомогою індикатора – 0,015...0,03 мм.

Прохідні, відрізні, канавочні, галтельні різці налаштовуються тільки по довжині з допуском  $\delta_i$ . Для здійснення налаштування цих різців за довжиною використані спеціальні підставки в комбінації з універсальною індикаторною стійкою (рис. 6). Базові поверхні підставок копіюють посадочні місця різцетримачів верстата (робочих державок).

Попереднє налаштування різця на потрібний розмір здійснюється безпосередньо на верстаті за допомогою регулюючого гвинта супорта або державки. За отриманим значенням потрібного розміру від вершини різця до опорної площини регулюючого гвинта визначається положення рухомого кронштейна індикаторної стійки. В цьому випадку перший різець, який налаштований на верстаті, є еталоном для виставлення положення мікрокара на індикаторній стійці з урахуванням розміру підставки.

Похибку налаштування  $\Delta_i$  інструмента орієнтовно можна прийняти рівною різниці між граничними значеннями установочного розміру, який залежить від точності показів мікрокара. В загальному випадку  $\Delta_i$  залежить від похибки регулювання  $\Delta_p$  положення інструмента і похибки вимірювання розміру деталі  $\Delta_{вим}$ . Для поверхонь обертання з врахуванням того, що  $\Delta_i$  і  $\Delta_p$  відносяться до радіуса, а  $\Delta_{вим}$  – до діаметра, отримаємо:

$$\Delta_i = \sqrt{(k_p \Delta_p)^2 + \left(\frac{k_i \Delta_{вим}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

Коефіцієнти  $k_p=1,14...1,73$  і  $k_i=1$  враховують відхилення закону розподілення елементарних величин  $\Delta_p$  і  $\Delta_{вим}$  від нормального закону розподілення.

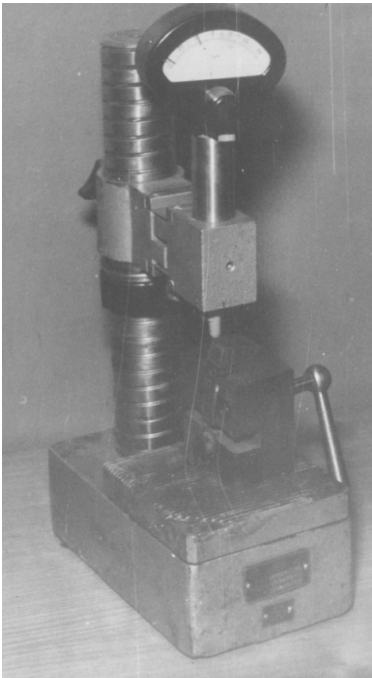
Похибка регулювання різця  $\Delta_p$  під час налагодження на розмір складає 20 ... 30 мкм.

Якщо поверхня, яка оброблена цим різцем, вимірюється штангенциркулем, то похибка вимірювання складає 0,2 мм.

Тоді для різця довжиною  $L = 80$  мм похибка налагодження складає



$$\Delta_i = \sqrt{(1,14 \cdot 0,03)^2 + (1 \cdot 0,2/2)^2} = 0,11 \text{ мм} \quad (2)$$



**Рис. 6. Пристосування для налагодження різального інструменту**

Якщо коливання розмірів пластини  $l_n$ , яка не переточується, вкладається в допуск на загальну довжину  $L$ , то для відновлення розміру налагодження  $A_p$  і різальних властивостей різця достатньо поворотом пластини ввести в роботу її нову грань без регулювання загальної довжини різця.

Налагодження інструментів, які взаємозаміняються, забезпечує точність розмірів деталі, яка обробляється, до 7...9 квалітетів точності зі значним скороченням часу. Якщо налагодження за пробними проходами продовжується 5 ... 6 хв. на кожний різець (для налагодження 10...12 інструментів 50 ... 60 хв.), то під час налаштування поза верстатом з використанням інструментів і державок вона триває 1...1,5 хв. Під час взаємозамінного налаштування різців, які встановлюються в швидкозмінних державках, на заміну інструмента потрібно всього 10 ... 15 сек. Крім цього інструмент замінюють як правило, до повного спрацювання його задньої поверхні, що дозволяє збільшити кількість можливих переточувань, скоротити їх трудомісткість і виключити можливість браку.

Нами розроблено пристрій для налаштування токарних різців за двома лінійними розмірами поза верстатом з підвищеною точністю завдяки використанню для вимірювання індуктивних перетворювачів [2], який відрізняється можливістю застосування в широкому діапазоні довжин різців, що встановлюються на напрямній з плунжерним притискачем, та механізмами грубого і точного налаштування на розмір, перший з яких виконаний у

виді гвинтової пари, а другий включає індуктивні перетворювачі, встановлені в двох взаємноперпендикулярних площинах, та регулюючого гвинта на державці різця (рис. 7).

Пристрій для налаштування поза верстатом токарних різців містить розміщений під кронштейном 1 корпус 2, упорну плиту 3, що встановлена з можливістю контакту з бічною планкою 4 кронштейна 1 та індуктивні датчики 5, перший з яких розміщено співвісно довжині різця 6, а другий – у перпендикулярній площині. Обидва датчики 5 закріплені за допомогою цангових притискачів 7, що змонтовані у додатковому кронштейні 8. Крім зазначених конструктивних елементів пристрій містить систему підтискувачів, яка складається з плунжерного підтискувача 9 різця 6, гвинтів 10, 11: попереднього налаштування (гвинт 10) та регулюючого налаштування (гвинт 11), а також упора 12, що змонтований між гвинтами 10, 11. Для зручності попереднього регулювання (налаштування) на бічній поверхні кронштейна 1 розміщена лінійка 13, а для відтворення інформації, її зчитування пристрій споряджений вторинним приладом 14, що з'єднаний з датчиками 5. Вторинним приладом обраний будь-який загально вживаний прилад і сучасна комп'ютерна техніка.

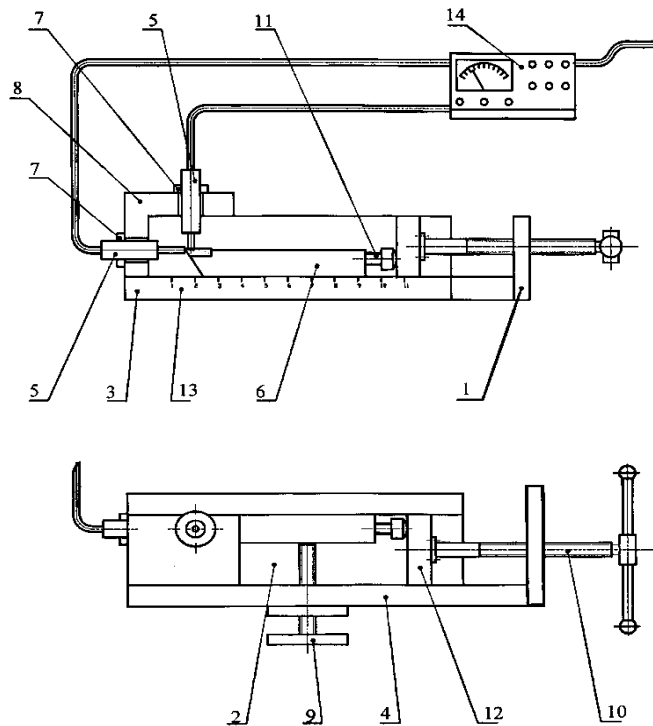
Пристрій для налаштування поза верстатом працює таким чином. Перед процесом налаштування проводять збірку пристрою. Для цього у кронштейні 1 корпуса 2 розміщують відповідний різець 6, до робочих крайок якого за допомогою додаткового кронштейна 8 та цангових притискачів 7 встановлюють індуктивні датчики 5 (один співвісно з довжиною різця 6, другий – у перпендикулярній площині).

Процес налаштування на необхідну довжину різця здійснюють у два етапи: попереднє – грубе регулювання за допомогою гвинта 10, з спостереженням по лінійці 13 за переміщенням різця 6, та більш точного регулювання за допомогою гвинта 11.

Налаштування бічних переміщень різця 6 здійснюють за допомогою плунжерного підтискувача 9.

Покази від індуктивних датчиків 5 відтворюють на вторинному приладі 14 (або безпосередньо на комп'ютері).

На відміну від аналогів розроблена модель відрізняється використанням для точного налаштування індуктивних перетворювачів в комплекті з реєструючим приладом. Це дає змогу



**Рис. 7. Пристосування для налаштування різців за двома лінійними розмірами з використанням індуктивних**

отримувати інформацію про зміну розміру у вигляді аналогового чи цифрового сигналу, що відкриває можливості застосування пристрою в автоматизованих системах технологічної підготовки дільниць токарних автоматів.

Новим у пристрої є те, що для підвищення точності налаштування використані індуктивні перетворювачі в комплекті з реєструючим приладом, що дає змогу отримувати інформацію про відхилення розміру в цифровій формі або передавати на плату АЦП комп'ютера. Це відкриває можливості застосування пристрою в автоматизованих системах технологічної підготовки дільниць токарних автоматів.

**Висновки.** Запропоновані конструкції допоміжного та різального інструменту для пришвидшеного виконання переналаджувальних операцій на багатошпindelних токарних автоматах, проведена уніфікація засобів технологічного оснащення дозволили підвищити продуктивність переналаджувальних операцій на 60% в порівнянні з попереднім варіантом. Створена і реалізована стратегія вдосконалення технологічної підготовки багатошпindelних токарних автоматів, яка охоплює методику автоматизованого проектування операцій та інструментальних налагоджень, а також вдосконалений процес виконання переналаджень, що дозволило підвищити вдвічі рівень технологічної гнучкості і технологічної продуктивності механічної обробки деталей підшипників в умовах багатонаменклатурного підшипникового виробництва.

1. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2-х т. Т. 2 Проектирование и использование технологической оснастки металлорежущих станков. – Л.: Машиностроение, 1983. – 376 с.
2. Декларативний патент на корисну модель №3290, Україна. Пристрій для налаштування поза верстатом токарних різців за лінійними розмірами. Марчук В.І., Денисюк В.Ю., Михалевич В.Т., Кайдик О.Л., Заявлено 30.12.2003. Опубл. 15.11.2004, Бюл. №11.
3. Любарский В.Я. Устройство и эксплуатация токарных автоматом: Учеб. пособие для технических училищ. – М.: Высш. школа, 1980. – 168с.
4. Настройка инструментов на металлорежущих станках / М.И. Лещенко, Г.Д. Василюк, Г.Э. Таурит, А.А. Оганян. – К.: Техника, 1983. – 111 с.

Стаття надійшла до редакції 17.01.2014.

© В.Ю. Денисюк, В.Ю. Заблоцький, Ю.С. Лапченко

УДК 621.314.58

**Л.Н. Добровольська, І.В. Грицюк, Д.С. Собчук**  
*Луцький національний технічний університет*  
**АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ  
 З ДВИГУНАМИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ**

*Проведений аналіз надійності автономна система електроживлення. Отримав подальший розвиток метод підвищення ефективності автономних електромеханічних комплексів з асинхронними машинами, відмінною рисою якого є забезпечення стабілізації напруги, струмів і електромагнітного моменту шляхом змішаного і додаткового внутрішнього ємнісного підмагнічування автономного асинхронного генератора та внутрішньої ємнісної компенсації реактивного струму асинхронного двигуна сумірної потужності при динамічно змінюваному навантаженні.*

*Ключові слова:* двигун внутрішнього згорання, асинхронний двигун, автономна електростанція, показники надійності, експонентний розподіл.

*Рис. 2. Табл. 1. Літ. 10.*

**Л.Н. Добровольская, И.В. Грицюк, Д.С. Собчук**  
**АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНЫХ  
 ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

*Проведенный анализ надежности АСЕ (автономная система электропитания). Получил дальнейшее развитие метод повышения эффективности автономных электромеханических комплексов с асинхронными машинами, отличительной чертой которого является обеспечение стабилизации напряжения, токов и электромагнитного момента путем смешанного и дополнительного внутреннего емкостного подмагничивания автономного асинхронного генератора и внутренней емкостной компенсации реактивного тока асинхронного двигателя соизмеримой мощности при динамично изменяющейся нагрузке.*

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, асинхронный двигатель, автономная электростанция, показатели надежности, экспоненциальное распределение.

**L.N. Dobrovolskaya, I.V. Gritsyuk, D.S. Sobchuk**  
**ANALYSIS EKSPLUATATSYONNOY RELIABILITY OF POWER PLANTS  
 AVTONOMNYH With THE ENGINE COMBUSTION VNUTRENNEHO**

*The analysis of the reliability of autonomous power system. Developed further method of increasing the efficiency of autonomous electromechanical systems with asynchronous machines, the hallmark of which is stabilizing the voltage, current and electromagnetic torque by mixed and additional internal capacitor bias autonomous asynchronous generator and internal capacitive reactive power compensation of induction motor power commensurate with dynamically changing load.*

*Keywords:* internal combustion engine, induction motor, independent power, reliability, exponential distribution.

Сучасний стан вітчизняної електроенергетики такий, що система централізованого електропостачання не може забезпечити вимоги високотехнологічного обладнання щодо надійності електропостачання та якості електричної енергії. Перерви в електропостачанні складають близько 10% від загального часу технологічних процесів протягом року (проти 0,1% у розвинених країнах). Відхилення напруги на затискачах електроприймачів у 3-4 рази перевищують допустимі значення [1,2,3]. Тривалість споживання неякісної електроенергії для сільських споживачів складає близько 45% від загального часу роботи.

Тому метою роботи є вирішення науково-прикладної проблеми – розробка науково-технічних передумов побудови автономних систем електроживлення сільськогосподарських споживачів та їх реалізації, які полягають у встановленні закономірностей функціонування структурно-алгоритмічних організацій різномірних джерел електроенергії (традиційних і поновлюваних). Впровадження результатів досліджень забезпечить комплексне розв'язання задач надійного автономного електроживлення сільськогосподарських споживачів, зменшить енергетичні і ресурсні витрати та підвищить якість електропостачання сільськогосподарських об'єктів [4,5].

Застосування різномірних джерел електроенергії дає змогу реалізувати задані функціональні властивості, а перспективність сумісного використання традиційних та поновлюваних джерел енергії для малої електроенергетики, [6,7] в тому числі і у сільськогосподарському виробництві, підтверджується світовим досвідом. Саме тому дослідження та науково-технічне обґрунтування автономних систем електроживлення сільськогосподарських споживачів вимагає розробки теоретичних, методологічних та практичних передумов побудови структурно-алгоритмічних поєднань різномірних джерел електроенергії із заданими функціональними властивостями шляхом урахування

електроспоживання та особливостей функціонування системи централізованого електропостачання на основі оцінювання показників надійності та економічної ефективності. Необхідно розробити математичні моделі функціонування автономних систем електроживлення, що базуються на закономірностях детермінованих організацій структур різнорідних джерел, стохастичного їх функціонування з системою централізованого електропостачання, електроспоживання споживачів; дослідити та провести аналіз комплексного впливу показників надійності автономних електростанцій з двигунами внутрішнього згорання, засобів їх автоматизації і вимог обраних споживачів на показники надійності автономних систем електроживлення.

За термін з 2007 по 2012р. проводились експлуатаційні спостереження за автономними електростанціями з двигунами внутрішнього згорання (АЕДВ), що змонтовані на 24 об'єктах. Вибір електростанцій, що спостерігалися, зроблено для однозначності тлумачення статистичних даних і уникнення помилок пов'язаних з різним цензуруванням виборок. В свою чергу, це пояснюється тим, що електростанції вводилися в експлуатацію в різний час, і тому виборки мають різне цензурування. В якості відмов прийняті всі порушення в роботі АЕДВ, які викликані системами управління і автоматизації. Умовно автономні електростанції поділені на три підгрупи: малої потужності – до 30кВт включно; середньої – понад 30 кВт до 75 кВт, великої – від 100 до 200кВт. Наведені дані[3,4]. свідчать, що частка електростанцій малої потужності у загальному об'ємі виборки складає 33%, середньої – 12%, великої – 55%. Катастрофічні відмови, що призвели не тільки до простою технологічного обладнання, а і спричинили вихід з ладу та складні ремонти самих АЕДВ та їх систем мали місце у 5 випадках. Час відновлення працездатності електростанцій при системі обслуговування «за викликом» складає від 8 до 72 год. Середній наробіток автономної електростанції за рік складає 342 год.

Частка автономних електростанцій, параметри яких потребували узгодження з режимами роботи наявних на об'єктах асинхронних двигунів сумірної потужності, склала понад 62% з усього масиву спостережень, а 27% електростанцій [4,5] були встановлені на об'єктах виключно для роботи у складі автономних електромеханічних комплексів: «автономний електрогенератор - асинхронний двигун». Кількість енергооб'єктів, де використання АЕДВ передбачалось разом зі статичними перетворювачами, склала понад 14% з усієї кількості спостережень.

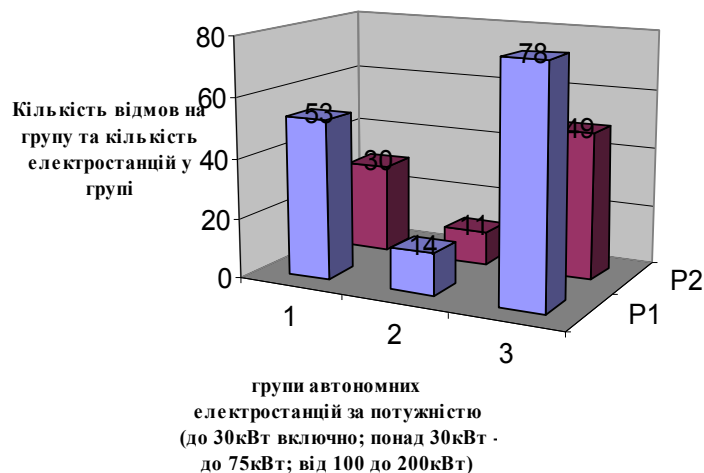


Рис. 1. Співвідношення чисельності груп автономних електростанцій та їх відмов

Для подальшого проведення аналізу надійності АСЕ, скористаємось методикою, що наведена в [9], при деяких припущеннях. Використовуючи статистичну інформацію щодо поведінки АЕДВ в умовах експлуатації, що є основними резервними джерелами АСЕ, проведемо ідентифікацію напрацювання на відмову  $T_o$  і тривалість відновлення  $T_e$  з однією з теоретичних функцій розподілу.

Будь яке прогнозування поведінки технічних засобів у часі можливе за умов виявлення закону розподілу і параметрів цього розподілу. Згідно [8,9] рішення цієї задачі може бути здійснено двома основними шляхами:

- параметричними методами;
- непараметричними методами.

Перший напрямок передбачає знання закону розподілу і відповідної функції розподілу, а також її параметрів [9]. Другий шлях, не пов'язаний з такими процедурами, і не потребує такої

вичерпної інформації. При неможливості застосування параметричних методів використовується безпосередньо емпіричні функції розподілу. При цьому будуються регресійні моделі, наявність яких дозволяє виконувати прогнозування потоку відмов, або закономірностей зміни у часі інших показників надійності. Згідно [9] для дослідження показників надійності передбачається ідентифікація процесу, що спостерігається, з одною із обов'язкових моделей

Проведемо ідентифікацію напрацювання на відмову  $T_o$  та тривалості відновлення  $T_e$  шляхом висунення гіпотези щодо наступних розподілів:

- експонентний розподіл;
- розподіл Вейбулла;
- логарифмічно нормальний розподіл;
- дифузійний монотонний розподіл (DM);
- дифузійний немонотонний розподіл (DN).

Перевірка гіпотези про закон розподілу проводиться за допомогою критеріїв відповідності з одною з «обов'язкових» моделей Колмогорова;

- $\omega^2$ ;
- Пірсона  $\chi^2$ .

Розгляд наведених статистичних даних щодо показника безвідмовності – напрацювання на відмову дозволяє зробити деякі попередні висновки:

- спостереження за окремими групами обладнання виконувалися на протязі різного часу;
- спостереження провадилися не з початку і не до моменту вилучення обладнання з експлуатації.

Ці обставини унеможливають користування параметричними методами для вивчення напрацювання на відмову  $T_o$ , виходячи з існуючого масиву статистичних даних. З цих же міркувань не можна будувати регресійну модель поведінки  $T_o$  у часі. Крім того, при необхідності, застосування процедур Байєсівських оцінок, коли статистичні дані є досить неупорядкованими (передусім з причин специфіки використання АЕДВ) їх обсягу не вистачає для можливості використання критеріями відповідності. Тому, у відповідності з [9], допускаємо експонентний розподіл напрацювання на відмову  $T_o$ . Коректність гіпотези про те, що ми маємо справу зі стаціонарною ділянкою життєвого циклу виробів, підтверджується якісною залежністю кількості відмов та тривалості спостережень від кількості та тривалості спостережень. Це є першою ознакою стаціонарності ділянки ( $\lambda = const$ ), яка добре описується експонентним розподілом і, при цьому, імовірність відмови залежить від тривалості спостережень. Ці міркування ніяким чином не торкаються показників відновлюваності - тривалості відновлення  $T_e$  [10]. У відповідності до спостережень, події, що пов'язані з цими процесами відбуваються незалежно від груп АЕДВ (автономна електростанція з двигуном внутрішнього згорання), рівнів автоматизації, кількості напрацювання та ін., для яких досліджуються ПН. В даному випадку встановлено, що щільність розподілу терміну відновлення  $T_e$  ідентифікується з одною з теоретичних (обов'язкових згідно [4]) за допомогою критерію Пірсона  $\chi^2$  як експонентний закон розподілу при цьому помилка першого роду (неприйняття вірної гіпотези) згідно [9] склала  $p_{n1p} = 0,05$ . Отже, для подальшого

використання у моделюванні поведінки АСЕ в умовах експлуатації, до якої АЕДВ входить як основне резервне джерело, вважаємо коректним прийняття припущення про експонентний розподіл  $T_o$  і  $T_e$ . Внаслідок аналізу статистичних даних, приходимо до висновку, що номер 37 реєстру, номер позиції з 43 по 64, мають 21 ідентичні реалізації. Ці статистичні данні, які відносяться до дизель-генераторів потужністю 100 та 140 кВт з двигунами ЯМЗ-238М2 та однотипними системами автоматизації, що експлуатуються на об'єктах одного призначення – на ПС 330кВ НЕК «Укренерго» для електроживлення власних потреб у аварійному режимі, спостереження за якими проводились з 2007 по 2012 роки. Результати експлуатаційних спостережень за згаданий період зведені у таблицю 1.

Таблиця 1. Результати експлуатаційних спостережень

Рік, протягом якого проводились спостереження	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Кількість відмов, виявлених за час спостережень	3	4	3	5	4	3

При вивченні діаграми потоку відмов виявилось, що на протязі 6 років інтенсивність потоку відмов візуально нагадує експонентний розподіл. Було побудовано регресійну модель (рис. 2), що є трендом параметру потоку відмов наведеній табл.1.

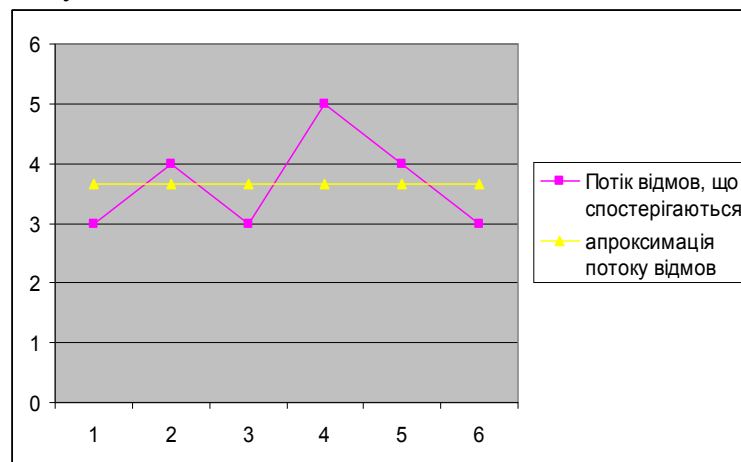


Рис. 2. Потік відмов, що спостерігаються, та його апроксимація експонентним розподілом на стаціонарній ділянці

**Висновок.** Виконана процедура щодо перевірки у відповідності з [10] закону розподілу потоку відмов може бути використана для прогнозування інтенсивності потоку відмов і можливості прогнозування за межами інтервалу спостережень. Отримав подальший розвиток метод підвищення ефективності автономних електромеханічних комплексів з асинхронними машинами, відмінною рисою якого є забезпечення стабілізації напруги, струмів і електромагнітного моменту шляхом змішаного і додаткового внутрішнього ємнісного підмагнічування автономного асинхронного генератора та внутрішньої ємнісної компенсації реактивного струму АДСП (асинхронний двигун сумірної з джерелом електроенергії потужності) при динамічно змінюваному навантаженні. Розроблені рекомендації щодо визначення питомого електроспоживання та критичної тривалості перерв електроживлення технологічних процесів а також рекомендації щодо оцінки показників надійності автономних систем електроживлення та методика техніко-економічного обґрунтування об'єму автоматизації автономних систем електроживлення дозволяють реалізувати принципи побудови автономних систем електроживлення при розв'язанні прикладних задач електрозабезпечення на етапі проектування

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. // – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. – 2011.
2. Якименко Ю.І., Сокол Є.І., Жуйков В.Я. і ін. Відновлювані джерела енергії у локальних об'єктах. // – К.: «Політехніка», 2001, – 112 с.
3. Яндутьський О.С., Щербина Ю.В., Блінцов В.С. і ін. Чинний в Україні стандарт якості електроенергії. // Промелектро. – 2002. – №4. – С. 9-12.
4. Лежнюк П.Д., Ковальчук А.А., Кулик В.В., Собчук Д.С. Оптимизация схем присоединения рассредоточенных источников энергии к электрическим сетям на основе анализа чувствительности. / Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов. 2013. – С. 102-105.
5. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Собчук Д.С. Аналіз впливу розосереджене генерування на режим розподільних електричних систем. / Вісник ВПІ. №6. 2013. – С. 45-47.
6. Lezhniuk P. D., Komar V. A., Sobchuk D. S. Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system. / Energy and Power Engineering. Vol.6 No.3. 2014. С. 12-17
7. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Собчук Д.С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 141. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України. Харків: ХНТУСГ, 2013. – С. 8-10.
8. ДСТУ 2862-94 Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования. – Введен в действие 08.12.94. – К.: Изд-во Госстандарта, 1994. – 35 с.
9. Корлат А.Н., Кузнецов В.Н., Новиков М.М., Турбин А.Ф. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания. Кишинев, Штиинца, 1991, – 276 с
10. Эффективное энергоиспользование и альтернативная энергетика / А.Н. Криволапов, И. Классен, З.П. Островский, В.Ф. Резцов, И.И. Стоянова / Под ред. А.К. Шидловского. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2009. – 302 с.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.

УДК 621.86

А.Є. Дячун., Ю.М.Тарасюк, В.М. Клендій, П.В. Босюк, І.М. Кучвара

<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя<sup>2</sup>Вінницький національний аграрний університет**МОРФОЛОГІЧНИЙ СИНТЕЗ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗАМІРУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКА**

*Проведено структурний синтез пристроїв для контролю конструктивних параметрів шнека методом морфологічного аналізу з покращеними техніко-економічними характеристиками і вибрано ряд конкурентоздатних конструкцій.*

*Запропоновано вдосконалений метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу шляхом поділу окремих груп на підгрупи.*

*Ключові слова: структурний синтез, конструктивні параметри, морфологічний аналіз.*

*Рис. 3. Форм. 3. Літ. 7.*

А.Е. Дячун, Ю.М. Тарасюк, В.Н. Клендий, П.В. Босюк, И.Н. Кучвара

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЗАМЕРОВ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКА**

*Проведен структурный синтез устройств для контроля конструктивных параметров шнека методом морфологического анализа с улучшенными технико - экономическими характеристиками и выбрано ряд конкурентоспособных конструкций.*

*Предложен усовершенствованный метод синтеза иерархических групп с помощью морфологического анализа путем разделения отдельных групп на подгруппы.*

*Ключевые слова: структурный синтез, конструктивные параметры, морфологический анализ.*

A.E. Dyachun, Y.M. Tarasyk, V.M. Klendiy, P.V. Bosyk, I.M. Kuchvara

**MORPHOLOGICAL SYNTHESIS OF DEVICES FOR AUGER DESIGN PARAMETERS MEASUREMENT**

*A structural synthesis of devices with improved technical and economic characteristics for auger design parameters control by morphological analysis was carried out and a number of competitive designs was chosen.*

*An improved method for the synthesis of hierarchical groups by morphological analysis by dividing the individual groups into subgroups was proposed.*

*Keywords: structural synthesis, design parameters, morphological analysis.*

Для пошуку нових ідей по створенню прогресивних конструкцій пристроїв для заміру конструктивних параметрів шнека доцільно використовувати відомий метод морфологічного аналізу [9], що дає можливість отримати повну кількість рішень (1), та його видозмінений варіант: метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу [10], який передбачає проведення генерації альтернатив на окремих ієрархічних рівнях, або й у межах окремих конструктивних елементів, починаючи з вищих рівнів, що забезпечує отримання найбільш раціональних конструктивних рішень при економії витрат зусиль та часу.

У результаті проведеного аналізу впливу різних факторів на процес вимірювання конструктивних параметрів шнека шляхом структурно-схемного синтезу із застосуванням морфологічного аналізу [10] було визначено обмежену кількість їх складових елементів та зв'язків між ними, які представляють конструктивні ознаки, на основні чого складено морфологічну матрицю у вигляді таблиці 1. Вона поділена на стовпці, в заголовках яких представлені морфологічні ознаки елементів і зв'язки між ними, а до їх складу внесено альтернативи кожної ознаки без критичного аналізу. Обрані наступні основні морфологічні ознаки: базуючі елементи, вимірювальний інструмент, контрольні параметри, розміщення шнека при контролі. Склад морфологічної таблиці може розширюватися за рахунок нових альтернатив кожної ознаки, а також за рахунок додаткових ознак. Проте даний варіант морфологічної моделі отримано внаслідок виділення функціонально важливих елементів з метою спрощення моделі, що дозволить мінімізувати кількість генерованих варіантів.



Таблиця 1. Морфологічна таблиця конструктивних елементів пристроїв для контролю параметрів шнека

1. Базуючі елементи	2. Вимірювальний інструмент	3. Контрольовані параметри
1.1. Кулачковий патрон 1.2. Призми 1.3. Лещата 1.4. Розтискні цанги 1.5. Затискні конуси	2.1. Штангенциркуль 2.2. Мікрометр 2.3. Щуп 2.4. Профілометр 2.5. Вимірювальна лінійка	3.1. Зовнішній діаметр шнека 3.2. Внутрішній діаметр шнека 3.3. Крок шнека 3.4. Ширина спіралі шнека 3.5. Шорсткість
4. Розміщення шнека при контролі	5. Види руху шнека при контролі	6. Механізм зчитування даних
4.1 Вертикальне 4.2 Горизонтальне 4.3 Під кутом	5.1. Нерухомий 5.2. Обертювий 5.3 Поступальний	6.1. Автоматично на ПК 6.2. Ручне

Морфологічну модель ГК (табл. 1) можна представити у вигляді морфологічної матриці, що утворена шляхом числового позначення відповідних альтернатив розміщених у стовпцях морфологічної таблиці:

$$N = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_j = \prod_{j=1}^n K_j, \quad (1)$$

$$N_{ГК} = \left| \begin{array}{c|ccc|} 1.1 & 2.1 & 3.1 & \\ \hline 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.1 & 5.1 \\ \hline 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.2 & 5.2 \\ \hline 1.4 & 2.4 & 3.4 & 4.3 & 5.3 \\ \hline 1.5 & 2.5 & 3.5 & & \\ \hline \end{array} \right| \cap \left| \begin{array}{c} 6.1 \\ 6.2 \end{array} \right|. \quad (2)$$

Загальна кількість варіантів конструктивних виконань пристрою для контролю параметрів шнека, яка входить в морфологічну матрицю (2), є дуже значною  $N = 2250$  і важко піддається повному перебору та вимагає багато часу для вибору найкращих рішень. В даному випадку можна скористатись комбінацією методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу. Сам метод базується на морфологічному аналізі та передбачає поділ механічної системи на певну кількість ієрархічних рівнів з віднесенням до кожного з окремих конструктивних елементів системи [12]. Даний метод передбачає розчленування загальної задачі на часткові та проведення пошуку раціонального рішення у часткових областях пошуку з подальшим їх компонуванням. До першого ієрархічного рівня слід віднести ті конструктивні елементи механічної систем, які безпосередньо впливають на якість і продуктивність виконання технологічного процесу (елементи першого порядку). До другого ієрархічного рівня слід віднести конструктивні елементи, що допомагають реалізовувати функції відповідної механічної системи і мають опосередкований вплив на виконання технологічного процесу (елементи другого порядку). До третього ієрархічного рівня слід віднести конструктивні елементи, які є необхідні для роботи механічної системи, але не мають впливу на реалізацію технологічного процесу (елементи третього порядку). Ці конструктивні елементи, при компонуванні механічної системи, слід вибирати в першу чергу виходячи із економічної доцільності (їх ціни та вартості експлуатації). Генерування альтернатив пропонуванним вдосконаленим методом передбачає проведення генерації альтернатив на окремих ієрархічних рівнях, або й у межах окремих конструктивних елементів, починаючи з вищих рівнів. На наступному етапі до вибраних на цих рівнях конструктивних рішень проводиться добір можливих альтернативних варіантів конструктивних елементів з нижчих рівнів, що забезпечує отримання найбільш раціональних конструктивних рішень при значно менших витратах зусиль та часу, ніж при використанні морфологічного аналізу. При використанні запропонованого методу



синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу кількість варіантів визначатиметься по формулі [2]:

$$N_{II} = (K_{11} \cdot K_{12} \cdot K_{13} \cdot K_{1i}) + (K_{21} \cdot K_{22} \cdot K_{23} \cdot K_{2i}) + \dots + (K_{z1} \cdot K_{z2} \cdot K_{z3} \cdot K_{zi}) = \sum_{z=1}^l \prod_{i=1}^m K_i, \quad (3)$$

Згідно запропонованого групування до першого ієрархічного рівня моделі механічної системи «Пристрій для контролю конструктивних параметрів шнека» (рис. 1) слід віднести такі конструктивні елементи: 2 – вимірювальний інструмент; 3 – контрольовані параметри, до другого ієрархічного рівня необхідно віднести наступні конструктивні елементи: 1 – базуючі елементи; 4 – розміщення шнека при контролі; до третього ієрархічного рівня: 5 – види руху шнека при контролі; 6 – Механізм зчитування даних.

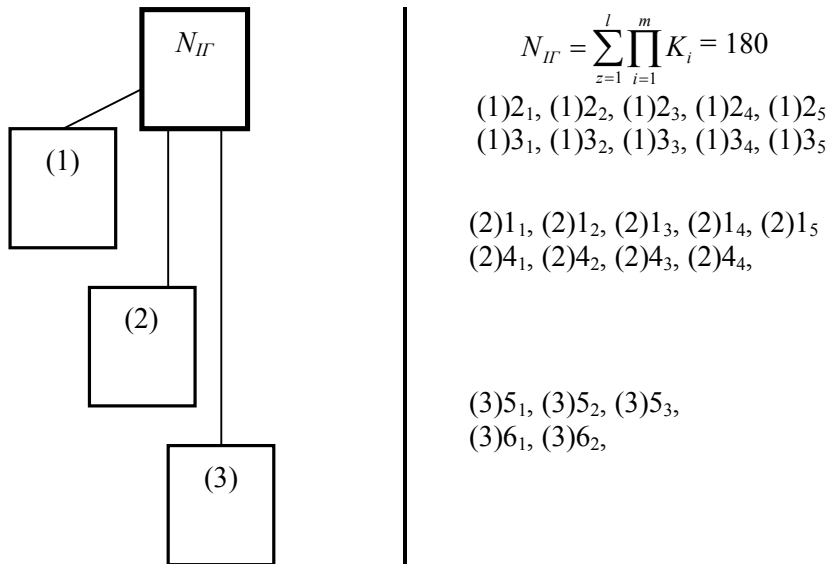


Рис. 1. Модель механічної системи « Пристрій для контролю конструктивних параметрів шнека »: 1) – перший ієрархічний рівень; 2)– другий ієрархічний рівень; 3)– третій ієрархічний рівень

Використаємо наступну схему кодів конструктивних елементів з використанням символу «і» (де «і» змінюється в межах від 1 до ∞): 1<sub>i</sub> – базуючі елементи; 2<sub>i</sub> – вимірювальний інструмент; 3<sub>i</sub> – контрольовані параметри; 4<sub>i</sub> – розміщення шнека при контролі; 5<sub>i</sub> – види руху шнека при контролі; 6<sub>i</sub> – механізм зчитування даних. Якщо в конструкції міститься декілька ідентичних конструктивних елементів, то їх кількість доцільно записати відповідним степенем, наприклад: два електродвигуни - (1<sub>1</sub>)<sup>2</sup>, а якщо міститься декілька різних конструктивних елементів одного виду, то їх доцільно записати наступним чином: два приводи різного виду - (4<sub>1</sub> ∪ 4<sub>3</sub>).

Якщо при синтезі альтернативних конструктивних варіантів ГК використовувати традиційний метод морфологічного аналізу, то кількість альтернатив становитиме:

$N = \prod_{j=1}^n K_j = 2250$  варіанти. Проведемо підрахунок генерованих альтернатив для першого ієрархічного рівня. Для цього побудуємо морфологічну матрицю

$$N_1 = \begin{vmatrix} 2_1 & 3_1 \\ 2_2 & 3_2 \\ 2_3 & 3_3 \\ 2_4 & 3_4 \\ 2_5 & 3_5 \end{vmatrix}$$

Кількість альтернатив для першого ієрархічного рівня становить  $N_{II(1)} = \sum_{r=1}^l t_r \cdot K_i = 5 \cdot 5 = 25$ .

Для другого ієрархічного рівня кількість альтернатив становитиме:

$$N_2 = \begin{vmatrix} 1_1 & 5_1 \\ 1_2 & 5_2 \\ 1_3 & 5_3 \\ 1_4 & 5_4 \\ 1_5 & \end{vmatrix}$$

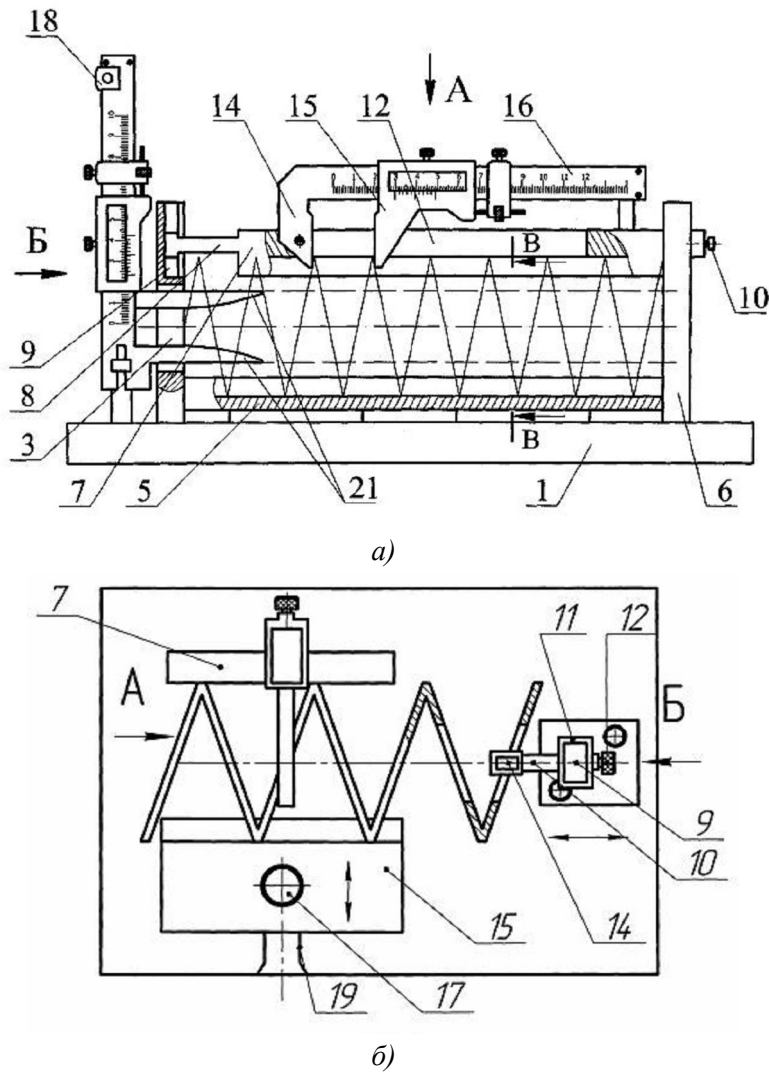
$$N_{(2)} = 5 \cdot 4 = 20,$$

а для третього:

$$N_3 = \begin{vmatrix} 5_1 & \\ 5_2 & 6_1 \\ 5_3 & 6_2 \end{vmatrix}$$

$N_{(3)} = 3 \cdot 2 = 12$ . Загальна кількість варіантів при використанні запропонованого методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу становитиме:  $N_{ir} = \sum_{z=1}^l \prod_{i=1}^m K_i = 25 + 20 + 12 = 57$ , що майже у 40 разів є менше, ніж при використанні класичного методу синтезу допомогою морфологічного аналізу.

Провівши аналіз конструктивних рішень по згенерованих варіантах отримано 4 працездатних конструкцій, на які подано заявки на винаходи (рис. 3).



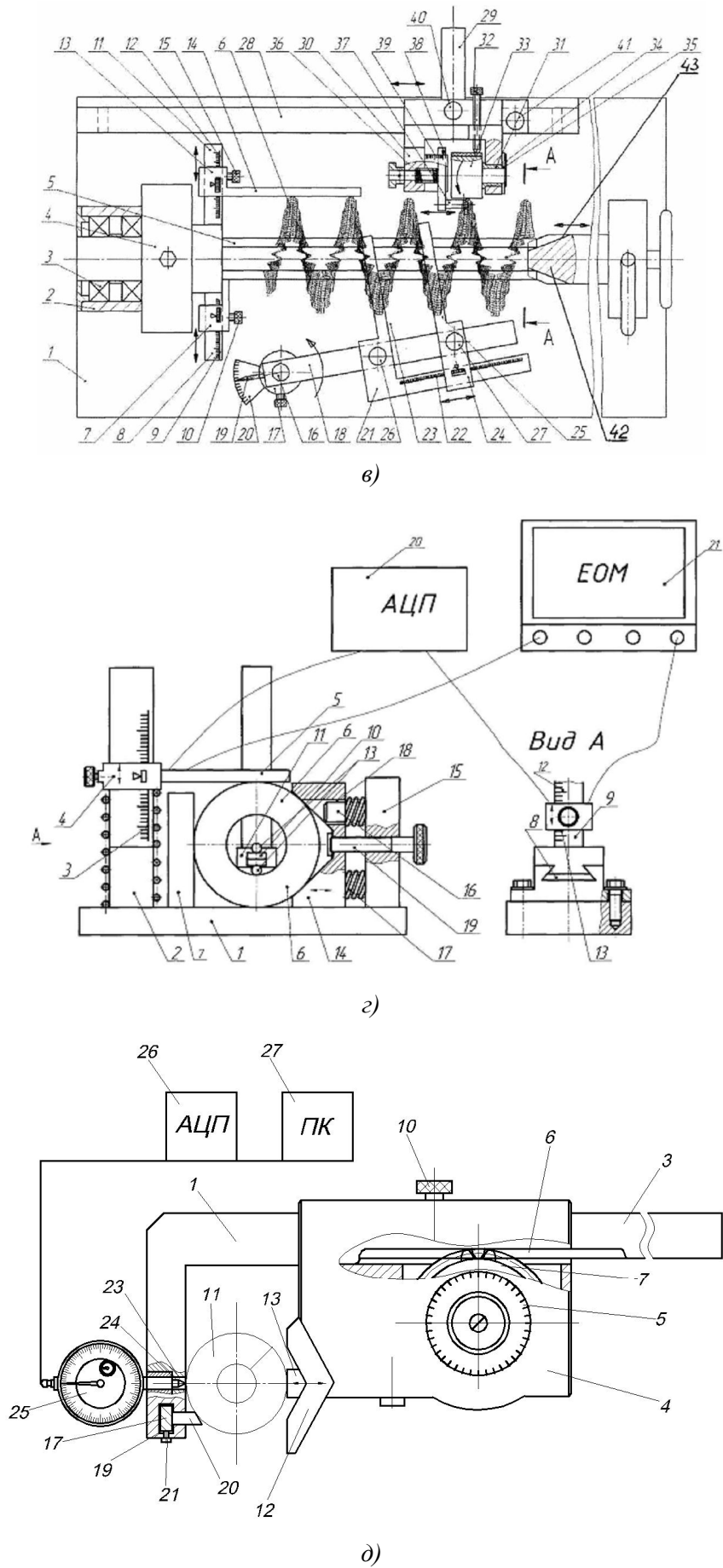


Рис. 3. Синтезовані пристрої для контролю конструктивних параметрів шнека

**Висновки:**

1. Проведено структурний синтез пристроїв для контролю конструктивних параметрів шнека методом морфологічного аналізу з покращеними техніко-економічними характеристиками і вибрано ряд конкурентоздатних конструкцій.

2. Запропоновано вдосконалений метод синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу шляхом поділу окремих груп на підгрупи.

1. Герман Х. Шнековые механизмы в технологии ФРГ. Перев. с нем. / Х. Герман. – Л.: Химия, 1975. – 230 с.
2. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры / А.М. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
3. Гевко Б.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б.М. Гевко, Р.М. Рогатинський. – Львов: Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 256 с.
4. Рогатинський Р.М. Механіко-технологічні основи взаємодії шнекових робочих органів із сировиною сільськогосподарського виробництва: дис. док. техн. наук: 05.20.01, 05.05.05 / Рогатинський Роман Михайлович – К., 1997. – 502 с.
5. Кузнецов Ю.М. Теорія технічних систем / Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, С.А. Дубиняк – Київ-Тернопіль, 1997 – 310 с.
6. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособие для студентов вузов. / А.И. Половинкин – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
7. Одрин В.М. Морфологический анализ систем: Построение морфологических матриц / В.М. Одрин, С.С. Картавов – К.: Наукова думка, 1977. – 183 с.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.

УДК 624.012.25:539.431

**О.В. Заболотний, Д.О. Воінков***Луцький національний технічний університет***РОЗРОБКА ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ОРИГІНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ АВТОМОБІЛЬНИХ ДИСКІВ**

*Наведено розробку технології проектування і отримання оригінальних дизайнерських конструкцій автомобільних дисків в САD-системі PowerSHAPE, на прикладі символу Державного Герба України, який відповідає конструкторським і технічним вимогам та проектування прес-форм для їх виготовлення.*

*Ключові слова: автомобільні диски, оригінальні дизайнерські конструкції, проектування прес-форм, PowerSHAPE, PowerMILL.*

*Рис. 13. Табл. 1. Літ. 2.*

**О.В. Заболотний, Д.О. Воинков****РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОРИГИНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИСКОВ**

*Приведена разработка технологии проектирования и получения оригинальных дизайнерских конструкций автомобильных дисков в САD-системе PowerSHAPE, на примере символа Государственного Герба Украины, соответствующий конструкторским и техническим требованиям и проектирование пресс-форм для их изготовления.*

*Ключевые слова: автомобильные диски, оригинальные дизайнерские конструкции, проектирование пресс-форм, PowerSHAPE, PowerMILL.*

**O.V. Zabolotnyi, D.O. Voinkov****DEVELOPMENT AND MANUFACTURING OF ORIGINAL DESIGNS RIMS**

*Shows the development of the technology of designing and producing original design designs automotive wheels in the САD-system PowerSHAPE, for example, the symbol of the State Emblem of Ukraine, the corresponding engineering and technical requirements and design of molds to manufacture them.*

*Keywords: rims, original design structure, design of molds, PowerSHAPE, PowerMILL.*

**Вступ.** Метод лиття – один з основних методів технологічного процесу виготовлення легкосплавних дисків (приблизно 95 %). Головна перевага методу лиття полягає в легкості сплаву, високому коефіцієнті використання матеріалу, що знижує собівартість виробництва і є визначальним фактором при формуванні ціни. Через легкість, при русі по нерівностях дороги, на кузов впливають менші ударні навантаження, а отже, поліпшується така експлуатаційна властивість автомобіля, як плавність ходу. При цьому також поліпшуються умови роботи підвіски: пружні і демпфуючі елементи сприймають менші навантаження, тим самим збільшується термін їх служби. Полегшені колеса швидше відновлюють контакт з поверхнею дороги при наїзді на перешкоду, що підвищує стійкість і керованість автомобіля на великих швидкостях. Зменшення маси колеса позитивно позначається на динаміці автомобіля, тому що для розгону і гальмування менш інерційного колеса потрібні менші зусилля, що в кінцевому підсумку призводить до збільшення терміну служби двигуна, трансмісії і гальмівної системи, а також до зменшення витрати палива. Загалом, мала вага – серйозна перевага литих алюмінієвих дисків, але не єдина. Істотним плюсом таких дисків також є їх приваблива зовнішність і різноманіття варіантів виконання. Деякі компанії представляють сьогодні на ринку сотні дизайнерів литих дисків для будь-якого типу автомобілів.

**Технологія виробництва литих дисків.** Розплавлений сплав заливають у спеціальні форми, де він остигає, потім отримані заготовки проходять термічну обробку. Вона включає нагрів виливки вище температури фазового перетворення (500-550 °С), витримку при цій температурі з наступним досить швидким охолодженням у водному середовищі. У результаті загартування отримують структурно нестійкий стан сплаву. Для наближення сплаву до структурної рівноваги виливки проходять штучний процес старіння, що полягає в їх нагріванні нижче температури фазового перетворення (150-220 °С) і витримці при цій температурі протягом деякого часу (3-9 годин) з подальшим охолодженням на повітрі. На наступному етапі виробництва виливки проходять механічну обробку, потім нанесення захисних покриттів. Міцність ливарних сплавів, так само як їх пластичність, після такої обробки менша, ніж у звичайної конструкційної сталі. Причому, якщо міцність нижча на 30-40 %, то пластичність нижча в 4-5 рази.

**Розробка дизайну диска і його 3D -моделі.** Основні етапи створення оригінального дизайну автомобільного диска і розробки його 3D-моделі показані на рисунках 1-5, які виконувалися в програмі PowerSHAPE .

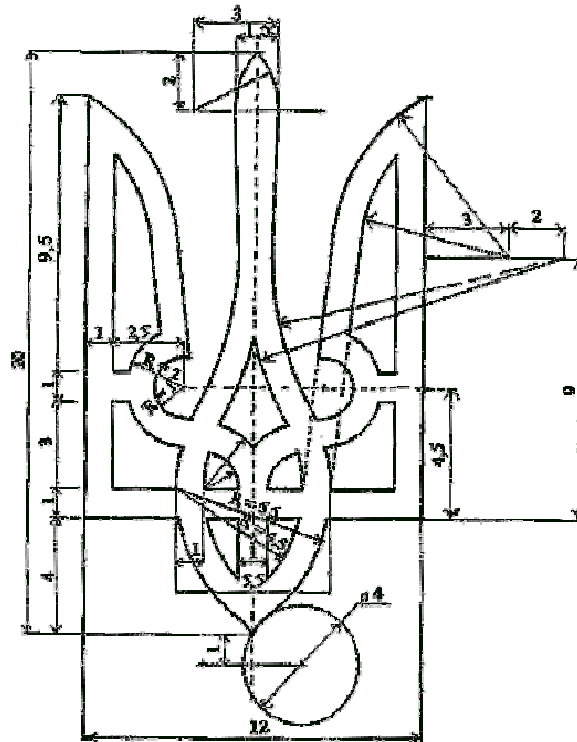


Рис. 1. Креслення Державного Герба України

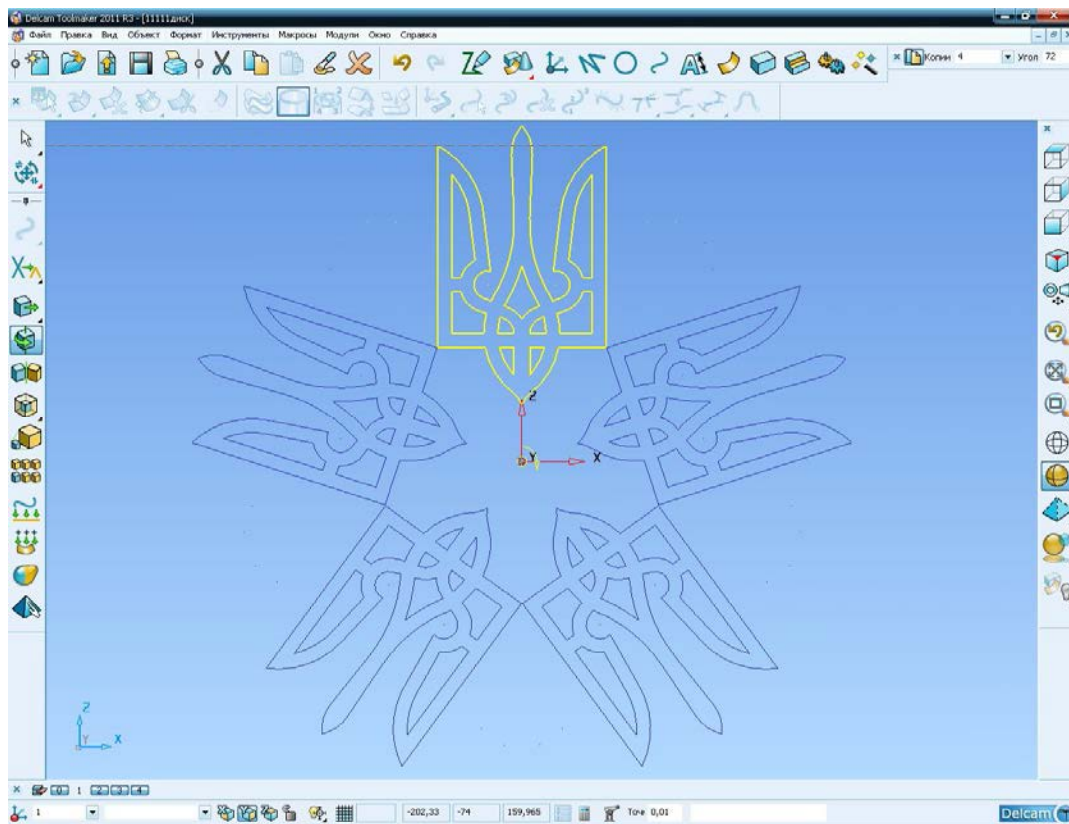


Рис. 2. Побудова спиць у вигляді герба

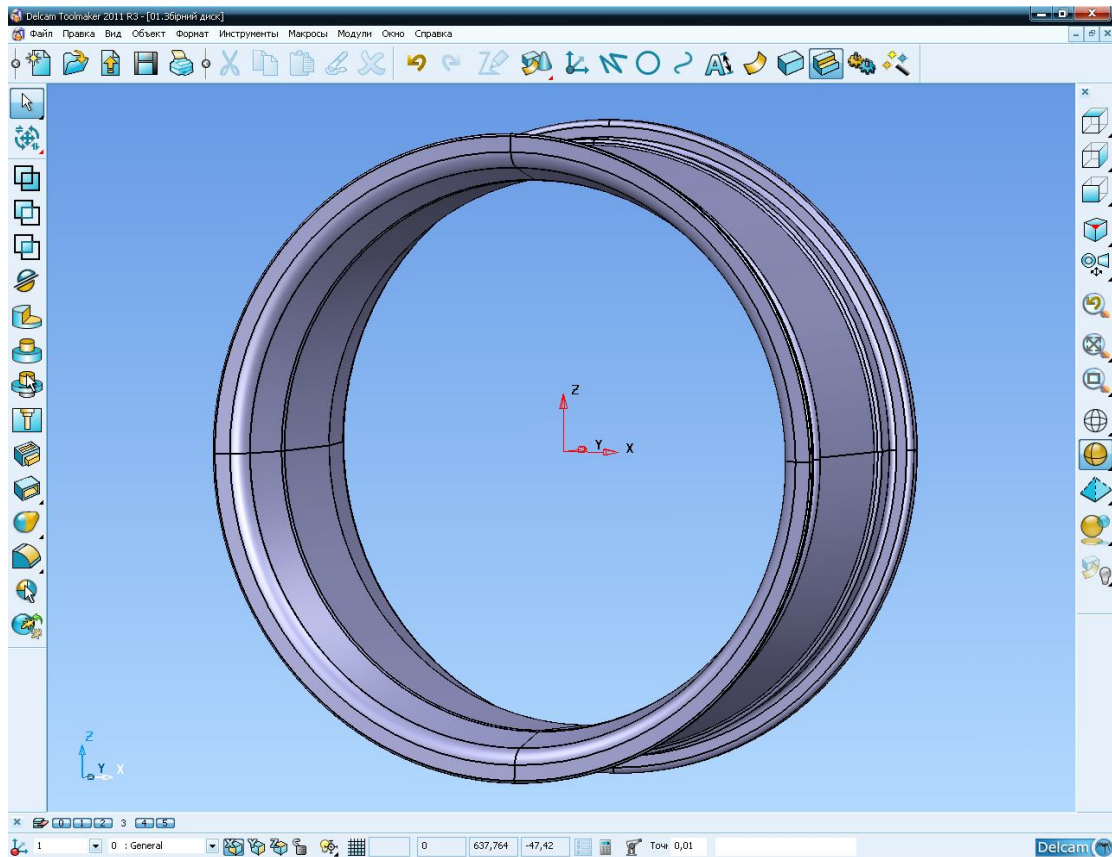


Рис. 3. Розробка обода литого диска

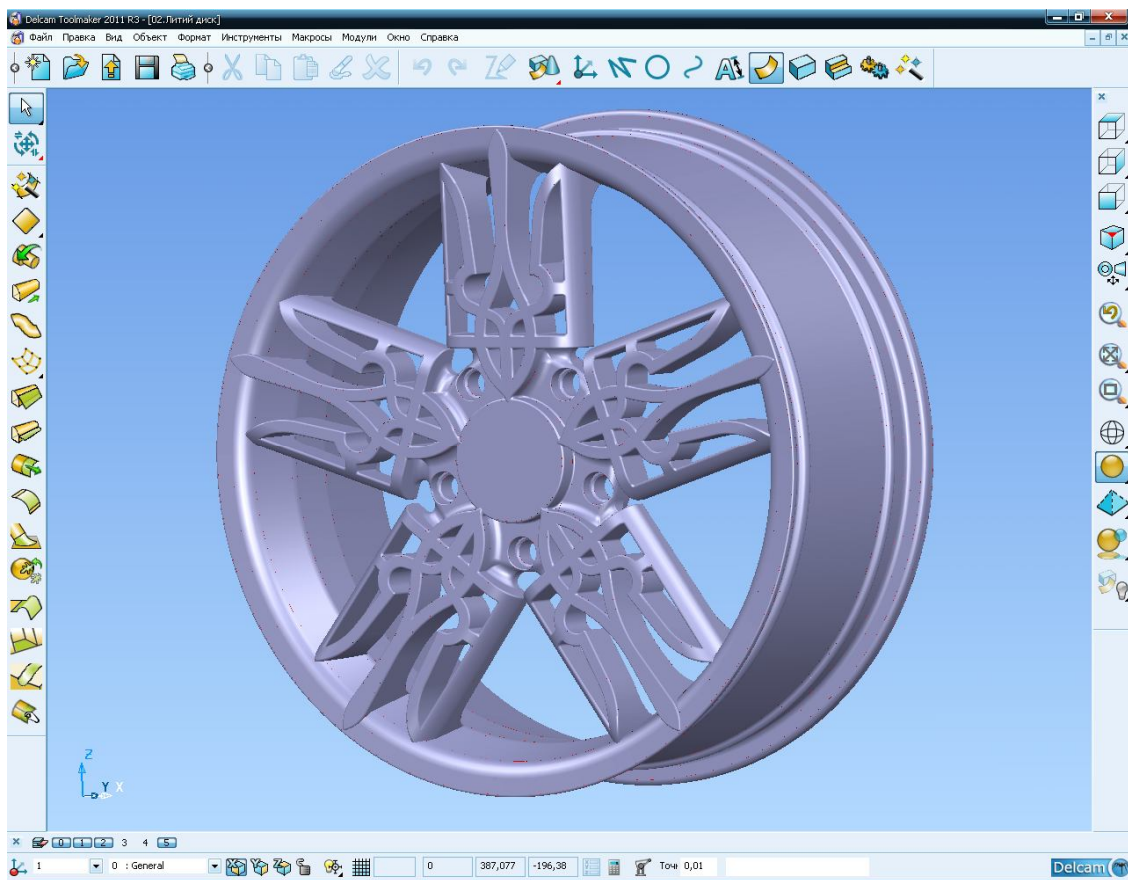


Рис. 4. Кінцева форма заготовки



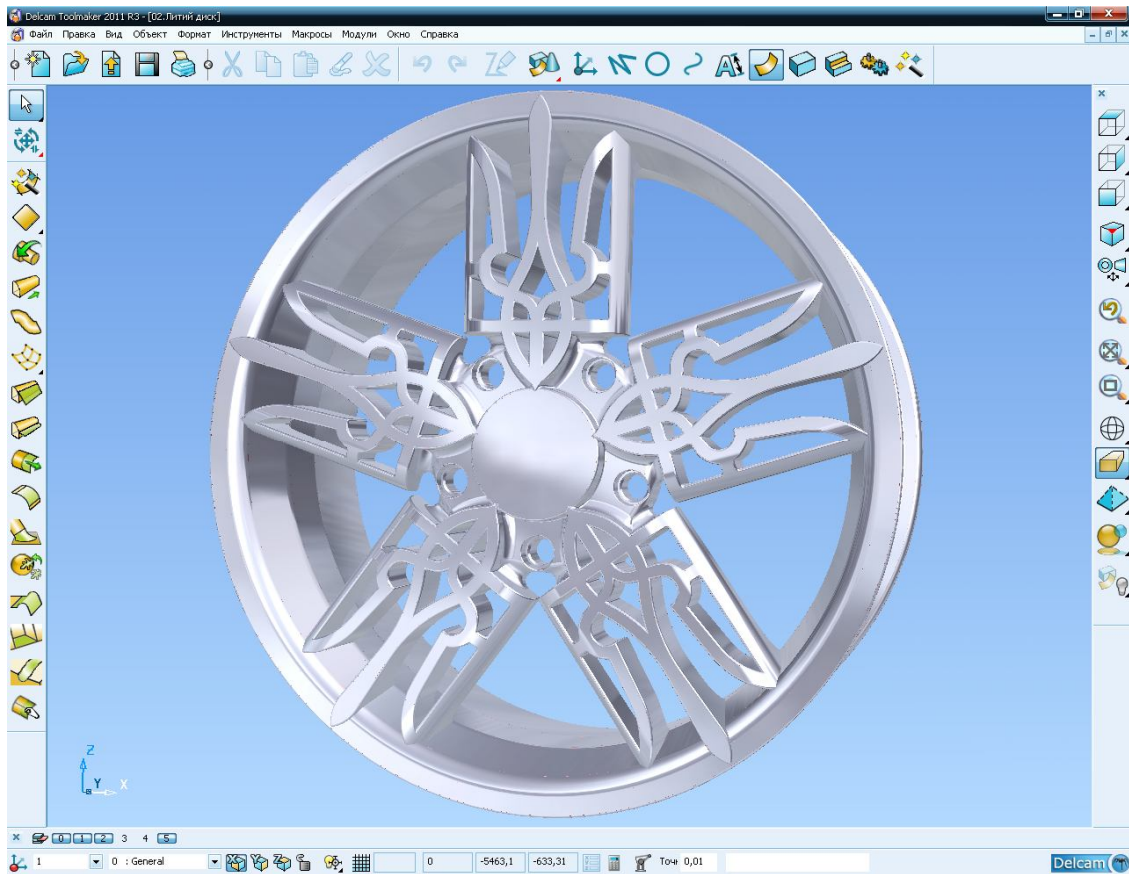


Рис. 5. 3-D модель готового виробу

**Конструювання прес-форми для лиття.** Наступний етап у виготовленні виробу методом лиття є проектування прес-форми. Прес-форма являє собою виріб, що складається з 4 деталей побудованих в системі PowerSHAPE.

Прес-форми для лиття під тиском високотемпературних сплавів швидше виходять з ладу, тому вибір стійких матеріалів для вкладишів, а також вибір найбільш оптимального режиму експлуатації прес-форм слід передбачати ще при їх проектуванні. Важливим питанням при литті є визначення виконавчих розмірів елементів прес-форм внаслідок нестабільності лінійної усадки.

Коливання усадки залежать від застосовуваної марки сплаву, зміни хімічного складу сплаву в процесі розливу, ступеня насичення рідкого металу газами в процесі його плавлення і розливу; температури металу, що надходить в робочу порожнину, температури підігріву прес-форм, способу ведення процесу (звичайний, вакуумний, кисневий), ступеня утруднення усадки з боку робочої порожнини та ін. В даний час майже всі машини для лиття під тиском працюють в напівавтоматичному циклі.

Хімічний склад сплаву, вміст газів, температура підігріву прес-форм і металу, що надходить в робочу порожнину, при цьому процесі не контролюються. Отже, змінити коливання усадки від зазначених вище факторів дуже важко, а в залежності від ступеня утруднення усадки – взагалі неможливо.

У зв'язку з цим розміри робочої порожнини задаються з урахуванням наступного доказу, що іноді займає багато часу. Розрахунок виконавчих розмірів робочої порожнини прес-форм наведено в багатьох роботах. Однак необхідно відзначити, що без накопичень відповідними фахівцями досвіду по доведенню прес-форм можуть виникати помилки, які викликають великий обсяг додаткової роботи.

Слід зазначити, що не кожна прес-форма проектується «з нуля». Навпаки, виготовлення прес-форм часто ведеться за допомогою так званих нормалізованих деталей. Це ті елементи, які не відповідають безпосередньо за формування виробу (зрозуміло, що ця частина повинна бути унікальною), але відіграють важливу роль у процесі виробництва. До них відносяться плити прес-форм, різні напрямні й фіксуєчі елементи, ливникові системи та інше.



Основні етапи створення прес-форми для отримання автомобільного диска виконувалися в програмі PowerSHAPE і показані на рисунках 6-9.

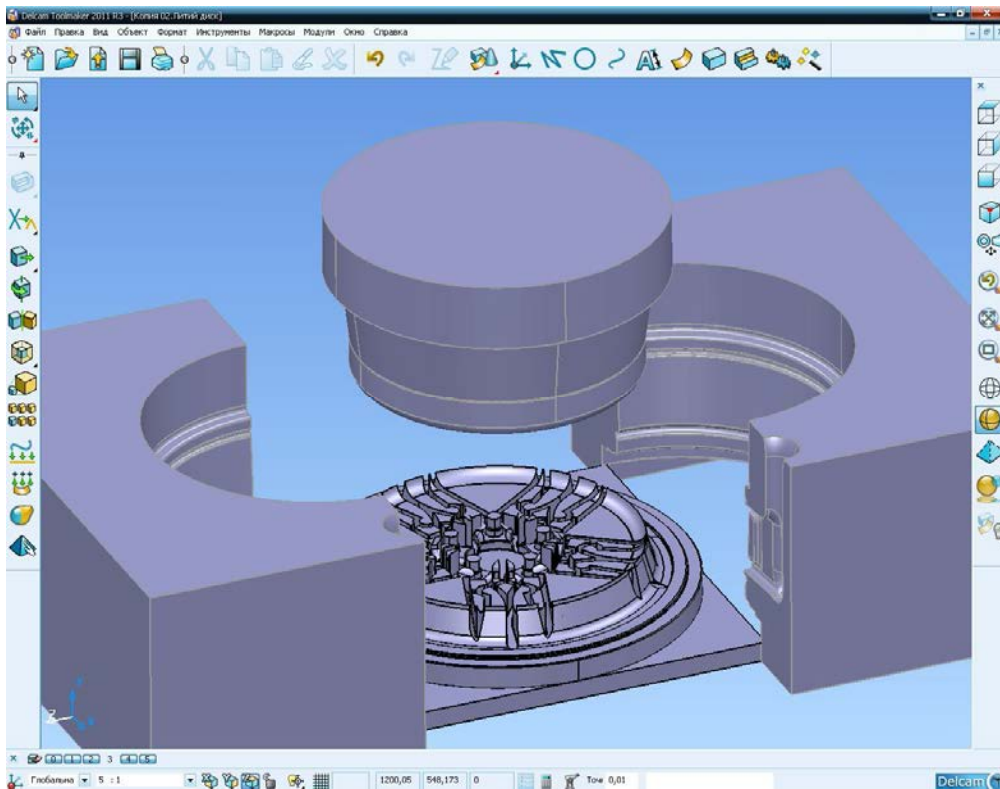


Рис. 6. Прес-форма для лиття

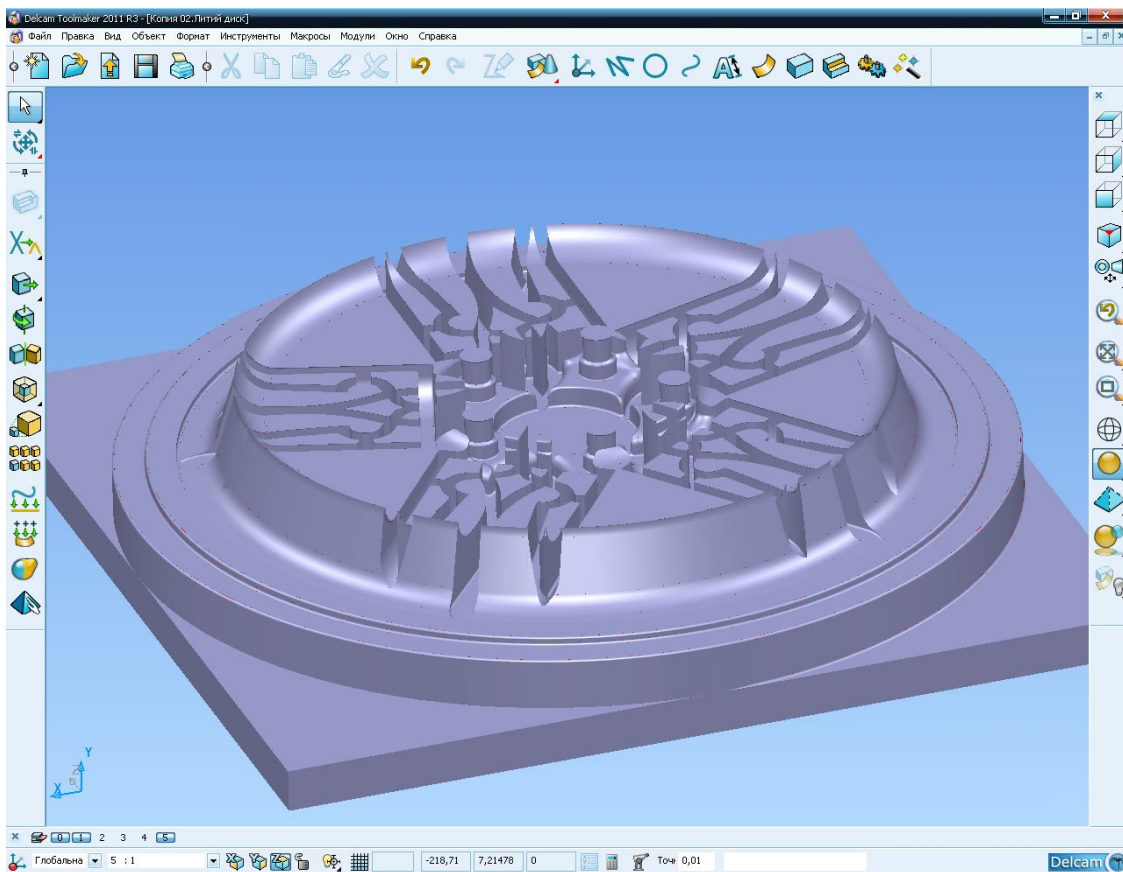


Рис. 7. Модель вставки пуансона

© О.В. Заболотний, Д.О. Воїнков

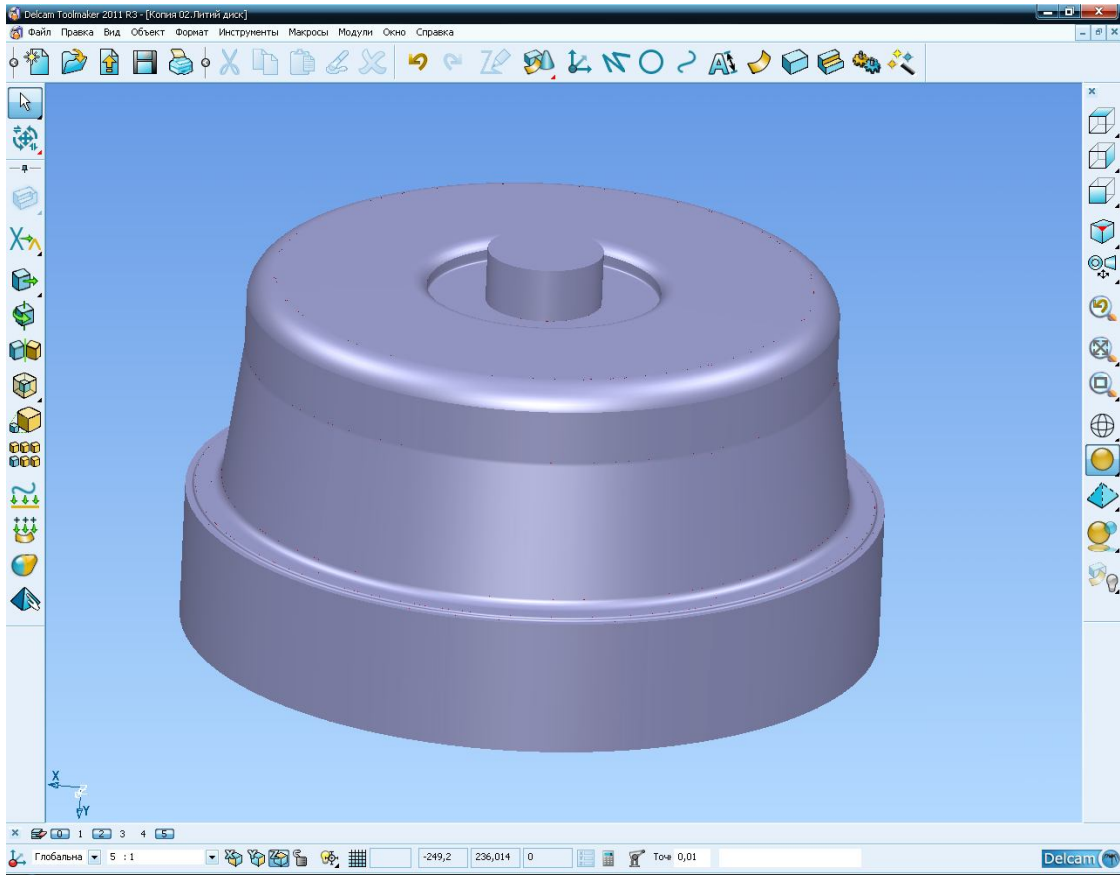


Рис. 8. Модель матриці

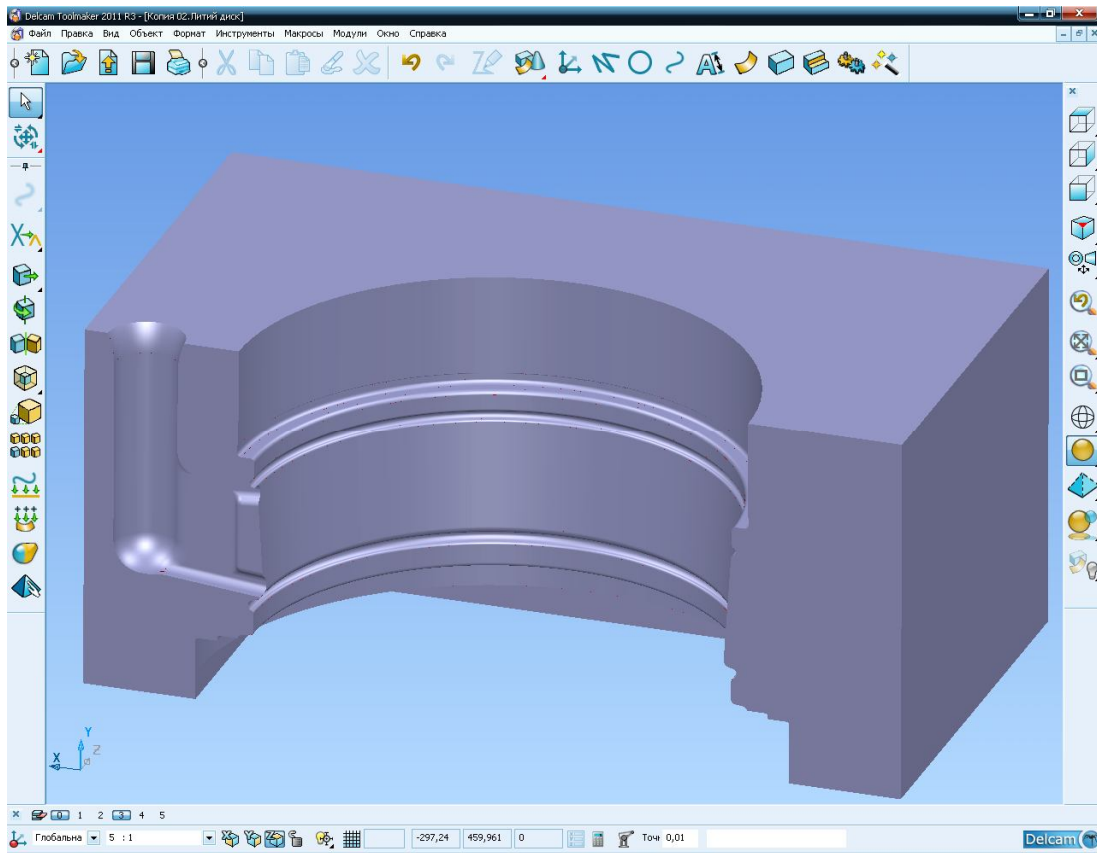


Рис. 9 Бокове кріплення прес-форми

© О.В. Заболотний, Д.О. Воїнков

**Розробка керуючих програм для фрезерної обробки деталей прес-форми.** Наступним кроком роботи є розробка керуючих програм для фрезерної обробки деталей прес-форми (у нашій роботі представлена на прикладі складної деталі - вставки пуансона див. Рис.10) за допомогою програм PowerMILL і FeatureCAM. Прогресивні методи обробки формоутворюючих поверхонь дають можливість виготовляти прес-форми з високою точністю і мінімальними термінами.

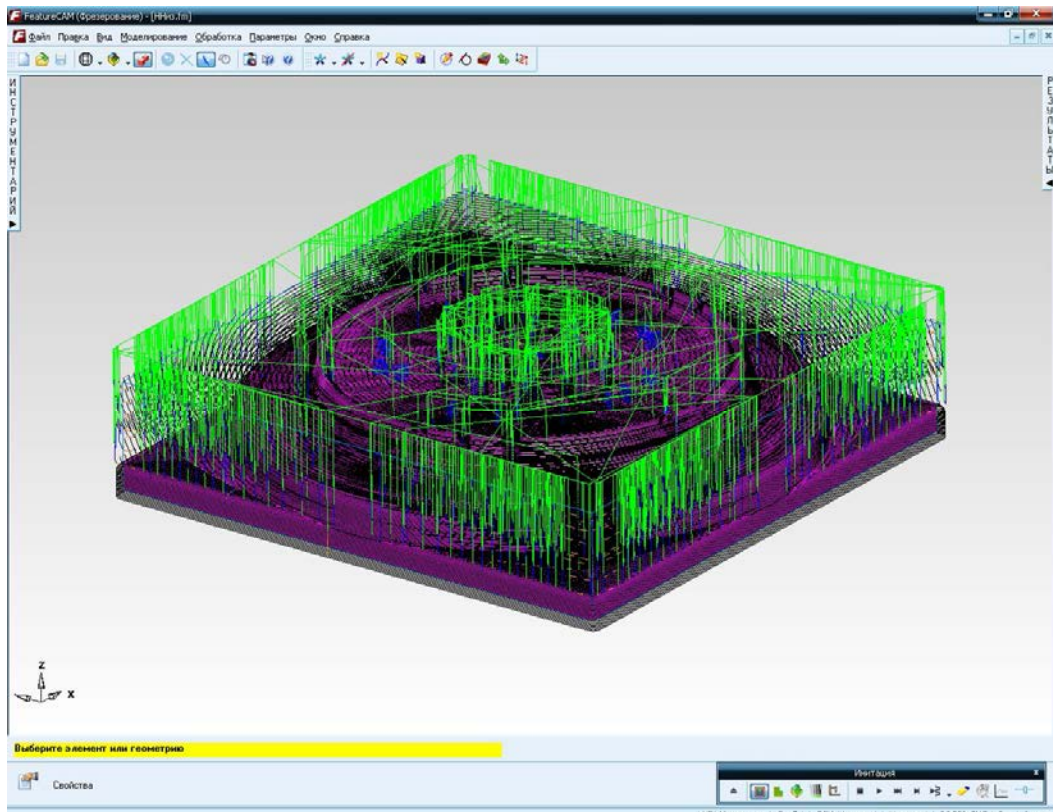


Рис. 10. Траєкторія переміщення ріжучого інструменту

Для кожної операції обробки була розрахована траєкторія обробки, підібрані режими різання і відповідний різальний інструмент (див. Таблицю 1). Фрагмент отриманого коду керуючої програми показаний на Рис. 11.

Таблиця 1. Специфікація інструменту для обробки

Название инстр.:	конц.фрезаM1200:reg
1	2
№ паза инстр.:	1
Корр. инстр. №:	1
№ смещения инстр.:	1
Материал инстр.:	БЫСТРОРЕЖ_СТАЛЬ
Покрытие инстр.:	ПОЛИРОВ
Кон. инстр.:	SINGLE
Тип резания:	ЦЕНТР
Угол кромки:	СТАНДАРТНЫЙ
Номер кромки:	2
Диаметр:	12.000 мм
Диам. хвостовика:	12.700 мм
Длина:	25.400 мм
Установ. длина:	37.400 мм
Общая длина:	82.550 мм
Радиус кромки:	0.000 мм

Продовження табл. 1

1	2
<b>Имя инстр.:</b>	<b>конц.фрезаВМ1200:4reg</b>
№ паза инстр.:	2
Корр. инстр. №:	2
№ смещения инстр.:	2
Материал инстр.:	БЫСТРОРЕЖ СТАЛЬ
Покрытие инстр.:	ПОЛИРОВ
Кон. инстр.:	SINGLE
Тип резания:	ЦЕНТР
Угол кромки:	СТАНДАРТНЫЙ
Номер кромки:	4
Диаметр:	12.000 мм
Диам. хвостовика:	12.000 мм
Длина:	25.000 мм
Установ. длина:	37.000 мм
Общая длина:	75.000 мм
Радиус кромки:	6.000 мм

**Список операций обработки:**

Деталь: ННиз  
 Загот.: L 411.000 мм x W 411.000 мм x T 83.456 мм  
 Мат.: АЛЮМИНИЙ, 111.00 по Бринеллю, 0.82 кН/мм<sup>2</sup>  
 Установ: Установ1  
 Зажим: 1  
 Начало: X 205.500 мм, Y 0.000 мм, Z 0.000 мм

**Оп.: 1** **пврх\_фрез1** (черн.1, слой z ), Крепёж 1  
 П/С: 5200 об/мин, 1248 мм/мин (0.120 мм/зуб.)  
 Инстр: #1 (конц.фрезаМ1200:reg, 12.000 мм)  
 Глубина: 12.000 мм  
 Другое: Шаг: 3.996 мм  
 Припуск: 1.250 мм, Допуск: 0.100 мм  
 Время: 3:10:49.7

**Оп.: 2** **пврх\_фрез1** (чист.3, спирал3d), Крепёж 1  
 П/С: 5200 об/мин, 1498 мм/мин (0.072 мм/зуб.)  
 Инстр: #2 (конц.фрезаВМ1200:4reg, 12.000 мм)  
 Другое: Шаг: 1.250 мм  
 Припуск: 0.000 мм, Допуск: 0.025 мм  
 Время: 1:46:46.3

**Оп.: 3** **пврх\_фрез1** (чист.4, слой z ), Крепёж 1  
 П/С: 5200 об/мин, 1498 мм/мин (0.072 мм/зуб.)  
 Инстр: #2 (конц.фрезаВМ1200:4reg, 12.000 мм)  
 Другое: Шаг: Адаптивн.  
 Припуск: 0.000 мм, Допуск: 0.025 мм  
 Время: 4:00:04.8

```

N471150X-2.4068Y5.9979Z0.2347
N471155X-2.4203Y5.9815Z0.2474
N471160X-2.4336Y5.9652Z0.2611
N471165X-2.4382Y5.9488Z0.2765
N471170X-2.4386Y5.9324Z0.2924
N471175X-2.4418Y5.9278Z0.294
N471180X-2.4582Y5.935Z0.2762
N471185X-2.4746Y5.9391Z0.2631
N471190X-2.4909Y5.9386Z0.2546
N471195X-2.5073Y5.9377Z0.2472
N471200X-2.5237Y5.9379Z0.2421
N471205X-2.5565Y5.9362Z0.2338
N471210X-2.5932Y5.9324Z0.2224
N471215X-2.6057Y5.9289Z0.2207
N471220X-2.622Y5.9229Z0.2199
N471225X-2.7204Y5.8785Z0.2197
N471230X-2.7859Y5.8477Z0.2201
N471235X-2.8515Y5.8159Z0.2197
N471240X-2.917Y5.7832Z0.2201
N471245X-3.0481Y5.7153
N471250X-3.1607Y5.6538
N471255X-3.2448Y5.606Z0.2198
N471260X-3.3577Y5.5391Z0.2199
N471265X-3.4112Y5.5063Z0.2201

```

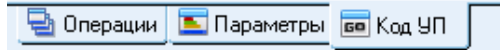


Рис. 11. Фрагмент коду управляючої програми

На наступному етапі виробництва виливки проходять механічну обробку, потім нанесення захисних покриттів. В остаточному підсумку, готовий виріб буде мати вигляд представлений на Рис.12.



Рис. 12. Модель готового виробу

Розроблену нами технологію проектування і отримання литих автомобільних дисків можна успішно застосовувати і для проектування оригінальних дизайнерських конструкцій збірних



автомобільних дисків, як це показано на Рис.13. Елементом дизайну можуть виступати не тільки Герб, а й будь-які інші знаки, букви, символи і т.п.

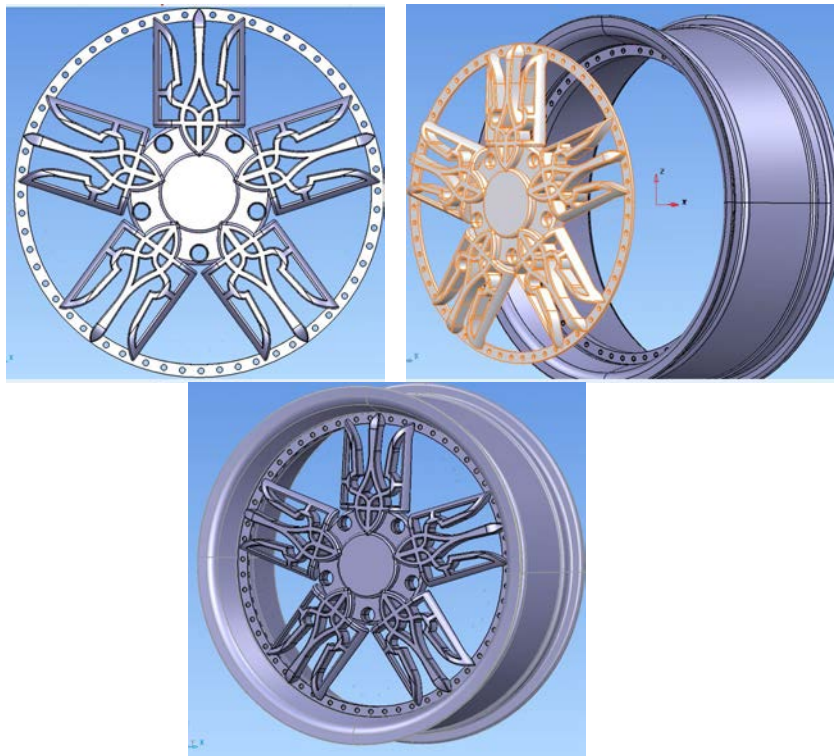


Рис. 13. Збірний диск

**Висновок.** У даній роботі розроблена технологія проектування і отримання оригінальних дизайнерських конструкцій литих і збірних автомобільних дисків, а також прес-форм для їх виготовлення з використанням CAD/CAM програмного забезпечення фірми Delcam plc, зокрема PowerSHAPE, PowerMILL і FeatureCAM.

1. Технологическая информация о литых дисках [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.kolesa-spb.ru/articledisk.php?id=2>.
2. Технология производства литых дисков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://www.krym4x4.com/?page=article/13\\_6](http://www.krym4x4.com/?page=article/13_6).

Стаття надійшла до редакції 24.04.2014.

УДК 621.798

**О.М. Залета***Луцький національний технічний університет***АНАЛІЗ СИСТЕМИ ПОДАЧІ СТРІЧКОВИХ МАТЕРІАЛІВ В МАШИНАХ ДЛЯ ПАКУВАННЯ В М'ЯКУ ТАРУ ТА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЇЇ РОБОТИ**

*Представлено результати досліджень конструкції і принципу роботи пристроїв подачі стрічкових пакувальних матеріалів в машинах для пакування в м'яку споживчу тару, описано методіку розрахунку параметрів їх функціонування при сталому режимі руху плівки. Визначено формулу для визначення натягу стрічки матеріалу при сталому режимі її руху.*

*Ключові слова: пристрій, стрічковий матеріал, рулон, розрахунок.*

*Рис. 3. Табл. 1. Форм. 19. Літ. 5.*

**О.М. Залета****АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ЛЕНТОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНАХ ДЛЯ УПАКОВКИ В МЯГКУЮ ТАРУ И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАБОТЫ**

*Представлены результаты исследований конструкции и принципа работы устройств подачи ленточных упаковочных материалов в машинах для упаковки в мягкую потребительскую тару, описана методика расчета параметров их функционирования при установившемся режиме движения пленки. Определена формула для определения натяжения ленточного материала при установившемся режиме его движения.*

*Ключевые слова: устройство, ленточный материал, рулон, расчет.*

**O.M. Zaleta****ANALYSIS OF SUPPLY SYSTEM OF TAPE MATERIAL IN THE MACHINES TO PACK IT IN THE SOFT PACKAGING AND TO CALCULATE THE PARAMETERS OF ITS WORK**

*The results of construction research and principle of the appliances operation of supply of tape packing materials in the machines to pack it in the soft consumer packaging were represented and methodology of parameters calculation of its operation at the state motion of film was described. The formula for determining of the strip tension at the steady state of motion was defined.*

*Keywords: appliance, tape material, roll, calculation.*

**Постановка проблеми.** Пристрої подачі стрічкових пакувальних матеріалів призначені для розмотування стрічки з рулону і подачі її в технологічну секцію пакувальної машини з постійним натягом. Правильне налагодження системи подачі пакувального матеріалу і забезпечення стабільності роботи пристроїв даного призначення є важливою складовою ефективності функціонування машини в цілому. Тому актуальною є задача знаходження значень параметрів роботи цих пристроїв за умов використання пакувальних матеріалів з різними фізико-механічними властивостями та при різних режимах виконання технологічної операції, зокрема на початку і наприкінці періоду використання рулону.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо конструктивні особливості розглянутих пристроїв. Для можливості обертання рулону в процесі розмотування з нього стрічки він встановлюється на валах. Знайшли застосування два види валів: вал, що проходить всередині втулки рулону, на якому розміщено два конуса, що входять у втулку рулону з торців [1, 5], або два консольних вала 1 з аналогічними конусами (рис. 1. а, б), розміщених на поворотних важелях 2, що дозволяють за допомогою електродвигуна 3 через механічні передачі переміщати рулон в робоче положення і повертати його у вихідне положення (для встановлення нового рулону). Пристрої для встановлення рулону другого типу виконуються одно-, дво- і трипроменевими і дозволяють оперативно встановлювати рулони як в призупиненій машині, так і в її робочому стані. В установках першого типу – з одним валом всередині втулки – для встановлення рулону потрібно більше операцій. Крім того, довгий вал має великий момент інерції щодо осі обертання. Останнє спричиняє деякі труднощі в забезпеченні сталості натягу стрічки в кінці процесу розмотування (при малому радіусі рулону), якщо швидкість стрічки висока. З цієї причини пристрої першого типу не застосовуються у високошвидкісних пакувальних автоматах. Головна їх перевага – компактність. Тому вони часто використовуються в машинах малих та середніх габаритів. Їх встановлення в пакувальних машинах дає можливість одночасної працювати з декількома рулонами [2, 4].

**Процес розмотування рулону при сталому режимі.** Щоб зрозуміти принцип функціонування тих чи інших пристроїв подачі стрічкових матеріалів, необхідно виявити фізичну сутність процесу розмотування рухомої стрічки [4]. Спочатку розглянемо рух стрічки з постійною

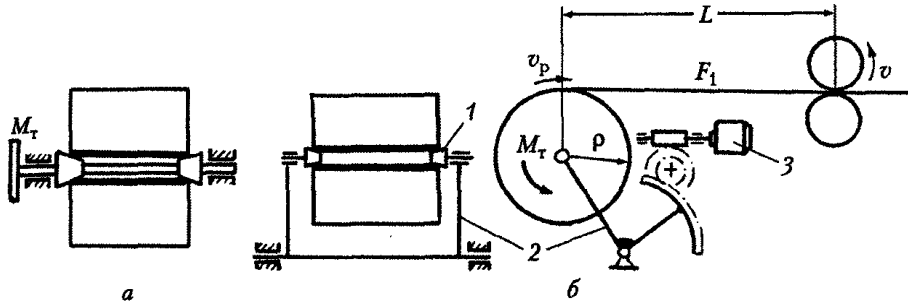


Рис. 1. Схеми механізмів кріплення рулону

швидкістю  $v$  стрічкоподаючих валків (рис. 1, б), при якому кутова швидкість рулону повинна бути постійною. Для визначеності будемо вважати, що релаксаційні процеси в рулоні закінчилися і натяг плівки в ньому дорівнює нулю. При сталому режимі руху плівки на ділянці  $L$  за одиницю часу  $\Delta t$  з рулону відмотається стрічка довжиною

$$l_0 = v_p \cdot \Delta t, \quad (1)$$

яка відразу ж при виході на ділянку  $L$  одержить приріст на величину

$$\Delta l = (v - v_p) \cdot \Delta t, \quad (2)$$

внаслідок різниці швидкостей стрічкоподаючих валків і рулону. Відносне видовження стрічки  $\varepsilon$ , на ділянці  $L$  буде мати величину

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(v - v_p) \Delta t}{v_p \cdot \Delta t} = \frac{v - v_p}{v_p}. \quad (3)$$

Так як зв'язок між напруженням в стрічці і її відносним видовженням виражається рівнянням

$$\sigma^m = E \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

де  $m$  – показник нелінійності матеріалу стрічки;

$E$  – модуль пружності матеріалу, МПа;

то її натяг  $F_1$  на ділянці  $L$  буде рівний:

$$F_1 = \sigma \cdot b \cdot \delta = b \cdot \delta \cdot m \cdot E \cdot \frac{v - v_p}{v_p}. \quad (5)$$

Ідеальний рулон характеризується такими параметрами як: товщина  $\delta$ , ширина  $b$  плівки і модуль пружності  $E$  матеріалу;  $\rho$ ,  $\rho_n$ ,  $\rho_k$  – поточний, початковий і кінцевий радіуси рулону.

Вимірювання радіуса рулону у функції кута  $\varphi$  його поточного повороту при розмотуванні може бути представлено рівнянням спіралі:

$$\rho(\varphi) = \rho_0 - \frac{\delta}{2\pi} \cdot \varphi. \quad (6)$$

Закономірність зміни радіуса рулону і частоти його обертання знайдемо, диференціюючи попередній вираз за часом

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\delta}{2\pi} \cdot \omega_p = -\frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{v_p}{\rho} \quad (7)$$

і розв'язуючи отримане диференціальне рівняння, розділяючи в ньому змінні і враховуючи початкову умову  $\rho = \rho_0$  при  $t = 0$  отримаємо

$$\rho = \sqrt{\rho_0^2 - \frac{v_p \cdot \delta}{\pi} \cdot t}. \quad (8)$$

Зі зменшенням радіусу рулону частота обертання рулону зростає:



$$\omega_p = \frac{v_p}{\rho} = \frac{v_p}{\sqrt{\rho_0^2 - \frac{v_p \cdot \delta}{\pi} \cdot t}}, \quad (9)$$

а момент інерції зменшиться

$$J_p \cong \frac{m\rho^2}{2} - \frac{m_k\rho_k^2}{2} = \pi\rho^2 b\gamma\rho^2 - \pi\rho_k^2 b\gamma\rho_k^2 = \pi b\gamma(\rho^4 - \rho_k^4), \quad (10)$$

де  $\rho_k$  – внутрішній діаметр втулки рулону;

$\gamma$  – питома маса стрічки;

$m = \pi b\gamma(\rho^2 - \rho_k^2)$  – маса рулону.

Довідкові дані про властивості полімерних матеріалів наведені в табл. 1 [3].

Таблиця 1. Властивості полімерних пакувальних матеріалів

Матеріал	Густина (питома маса) $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль пружності E, МПа	Відносне видовження $\epsilon$ , %
Поліетилен низької густини (ПЕНГ)	920	200	500
Поліетилен високої густини (ПЕВГ)	960	1000	700
Поліпропілен (ПП)	910	1400	600
Іономери	930-970	180-240	350-400
Поліамід (ПА)	1130	1800	180
М'який полівінілхлорид (ПВХ)	1300	40	230

Використовуючи принцип Даламбера, складемо рівняння моментів щодо осі обертання рулону:

$$F_1\rho = (J_p - J_0)\frac{d\omega_p}{dt} + M_T, \quad (11)$$

де  $J_0$  – момент інерції валів, на яких встановлений рулон.

Кутове прискорення рулону в сталому режимі руху стрічки знайдемо, диференціюючи вираз  $\omega_p = v_p / \rho$  з урахуванням виразу (8) для визначення  $\rho$ :

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{d\left(\frac{v_p}{\rho}\right)}{dt} = \frac{v_p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} = \frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{v_p^2}{\rho^3}. \quad (12)$$

Після підстановки отриманих виразів у рівняння моментів отримуємо розгорнуту формулу для визначення натягу стрічки при сталому режимі її руху:

$$F_1 = (J_p + J_0) \frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{v_p^2}{\rho^4} + \frac{M_T}{\rho}. \quad (13)$$

Для виконання всього комплексу технологічних операцій стрічка при її русі в машині повинна бути натягнутою, причому величина натягу повинна бути постійною. Регулятор натягу стрічки зображений на рис. 2. Якщо прибрати важіль 9 із пружиною 10, і створити важелем 11 деяке постійне гальмівне зусилля, закріпивши його жорстко, то гальмівний момент на валу рулону буде постійним, а в міру розмотування стрічки 14 з рулону її натяг буде поступово збільшуватися (обернено пропорційно радіусу рулону), досягаючи 8–10-кратного значення початкового значення при повному рулоні. Валик на важелі 13, жорстко зв'язаний з важелем 7, в сукупності з пружиною розтягування 6 і демпфером 5 утворюють коливну систему з одним ступенем свободи. Створюючи крутний момент, пружина 6 прагне повернути важіль 13 вправо і весь час натягує стрічку. Таким чином, валик на важелі 13 має можливість вимушено коливатися і компенсувати биття рулону, в міру розмотування рулону і зростання середнього натягу стрічки поступово в «середньому» переміщатися вліво, розтягуючи пружину 6. Звернемо увагу, що при цьому важіль 8 також в «середньому» повертається вліво.

Тепер замкнемо систему регулювання, зв'язавши важелі 8 і 12 тягами 9 і через пружину стиснення 10. Тоді при збільшенні натягу стрічки і повороті важеля 8 вліво зусилля пружини 10 зменшуватиметься, що спричинить зменшення тиску колодок 3 на гальмівний шків 4 і, як наслідок, зменшення натягу стрічки, який почав зростати.

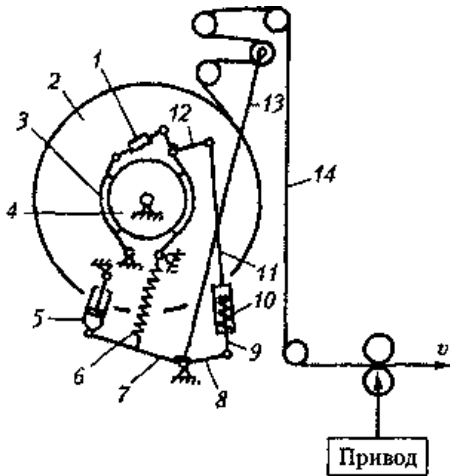


Рис. 2. Схема регулятора натягу стрічки

Внаслідок неминучих коливань важеля 13 через биття рулону при кожному його обороті і коливань пов'язаного з ним важеля 8 зусилля, що передається пружиною 10 на гальмівний шків, також буде коливальним щодо деякої середньої лінії, що має тенденцію до зниження. Отже, у міру розмотування рулону гальмівне зусилля «в середньому» буде зменшуватись, а велике відхилення натягу стрічки від заданого середнього рівня буде виключено. Необхідний рівень натягу стрічки задається зміною довжини регульованих тяг 1 і 9, тобто зміною попереднього стиску пружини 10.

**Процес подачі стрічки при змінному режимі її руху.** Розглянемо загальну схему руху стрічки (рис. 3). На ній прийняті наступні позначення:

$v_{i-1} = v_{i-1}(t), v_i = v_i(t)$  – швидкості першої та другої стрічкоподаючих пар валків (функції часу):

$L_i = L_i(t)$  – шлях стрічки між першою і другою парами

валків;

$F_{i-1}(t) = \varepsilon_{i-1}(t)$  – натяг і відповідне йому відносне подовження стрічки на вході в першу пару;

$F_i(t) = \varepsilon_i(t)$  – натяг і відносне видовження стрічки на вході у другу стрічкоподаючу пару [4].

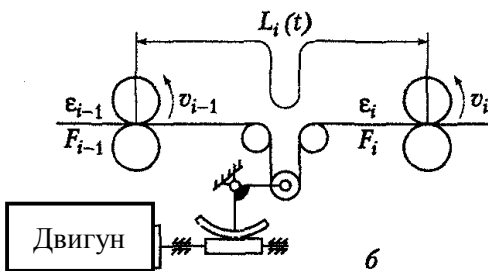


Рис. 3. Схема стрічкоподаючої системи

Виявимо функціональний зв'язок між цими величинами, які в загальному випадку всі є деякими функціями часу. Для визначеності шуканої величиною прийемо відносне видовження стрічки  $\varepsilon_i$  на ділянці  $L_i$ , а інші функції – заданими.

При виведенні функціональної залежності будемо користуватися поняттям кількості стрічки, під яким при постійній її товщині розуміється її початкова довжина. Наприклад, з визначення відносного видовження стрічки як

відношення різниці наступної  $l$  і попередньої  $l_0$  довжин матеріалу стрічки до її попередньої (початкової, ненапруженої) довжини  $\varepsilon_i = \frac{l_0 - l}{l_0}$  можна визначити її кількість  $l_0$ , якщо відомі

довжина натягнутої стрічки  $l$  та її відносне видовження  $l_0 = \frac{l}{l + \varepsilon}$ .

В деякий момент часу  $t$  кількість стрічки на ділянці  $L_i$  між секціями стрічкоподаючих валків буде:

$$L_{i0} = \frac{L_i}{l + \varepsilon} \tag{14}$$

Визначимо зміни  $\Delta L_{i0}$  кількість стрічки на ділянці між ротаційними парами за проміжок часу  $\Delta t$ . За цей час в другу ділянку ввійде кількість стрічки, рівна  $v_{i-1}\Delta t / (1 + \varepsilon_{i-1})$ , вийде –  $v_i\Delta t / (1 + \varepsilon_i)$ . Зміна  $\Delta L_{i0}$  кількості стрічки на ділянці  $L_i$  буде рівною  $\Delta L_{i0} = \frac{v_i\Delta t}{1 + \varepsilon_{i-1}} - \frac{v_i\Delta t}{1 + \varepsilon_i}$ .

Розділимо обидві частини останнього рівняння на  $\Delta t$  і перейдемо до границі  $\Delta t \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L_{i0}}{\Delta t} = \frac{dL_{i0}}{dt} = \frac{V_{i-1}}{1 + \varepsilon_{i-1}} - \frac{V_i}{1 + \varepsilon_i} \tag{15}$$

Якщо продиференціювати обидві частини даного виразу (14) по часу, підставити результат в (15), то після ряду спрощень та перетворень отримаємо рівняння:

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} + A_i(t) \cdot \varepsilon_i = B_i(t), \quad (16)$$

де  $A_i$  та  $B_i$  – змінні коефіцієнти.

Розв'язок (16) має вигляд

$$\varepsilon_i = e^{-\int A_i dt} \left[ C_i + \int B_i(t) \cdot e^{\int A_i dt} dt \right], \quad (17)$$

де  $C_i$  – постійна інтегрування.

Це рівняння справедливе і для визначення приросту деформації стрічки відносно деякого постійного значення  $\varepsilon'$ .

$$\Delta\varepsilon_i(t) = e^{-\int A_i dt} \left[ C_i + \int B_i(t) \cdot e^{\int A_i dt} dt \right],$$

де  $\Delta\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i(t) - \varepsilon'$ ,  $\Delta\varepsilon_{i-1}(t) = \varepsilon_{i-1}(t) - \varepsilon'$ .

$$B_i(t) = \frac{1}{L_i} \left( v_i - v_{i-1} + v_i \Delta\varepsilon_{i-1} + \frac{dL_i}{dt} \right) \cdot A_i(t) = \frac{1}{L_i} \left( v_{i-1} - \frac{dL_i}{dt} \right). \quad (18)$$

Приведені рівняння виражені в рекурентній формі та дозволяють послідовно знайти зміну деформованого стану рухомої стрічки (приймавши, що  $i = 1, 2, \dots, m$ ) в стрікоподаючій системі з  $m$  стрікоподаючими парами валків.

При сталому режимі руху будемо мати:

$$\varepsilon_i^{cm} = \frac{B_i^{cm}}{A_i^{cm}} = \frac{v_i - v_{i-1}}{v_{i-1}} + \frac{v_{i-1}}{v_{i+1}} \varepsilon_{i-1}^{cm}. \quad (19)$$

Зокрема, при  $v_i = v$ ,  $v_{i-1} = v$ ,  $\varepsilon_{i-1} = 0$  отримаємо рівняння (3).

#### Висновки:

1) відповідно до (5) натяг стрічки може бути створений за рахунок різниці швидкостей стрікоподаючих валків і рулону, яка в свою чергу може бути забезпечена або прикладанням до рулону гальмівного моменту, або примусовим обертанням рулону із заданою швидкістю  $v_p$  від приводу;

2) оскільки в виразі (13) величини  $\rho$  і  $J_p$  є змінними, зокрема спадаючими, то сталість натягу стрічки в процесі розмотування рулону може бути досягнута лише відповідним зменшенням гальмівного моменту  $M_T$ ;

3) інерційні сили рулону в сталому режимі пропорційні товщині стрічки і квадрату кутової швидкості рулону;

4) так як в знаменнику першого доданка в (13) радіус в четвертому степені, то при високій швидкості стрічки і малому радіусі рулону (наприкінці процесу розмотування) сила інерції може настільки збільшитися, що для забезпечення умови  $F = \text{const}$  необхідно буде змінити знак перед членом  $M_T / \rho$ , тобто замість гальмівного моменту прикласти до рулону додатковий обертовий момент. Проте останнє відноситься лише до високошвидкісних машин зі швидкістю стрічки більше 5 м/с. При менших швидкостях цим прискоренням рулону при сталому русі при  $v_p = \text{const}$  можна знехтувати.

5) рівняння, що записані в рекурентній формі (18), (19), дозволяють послідовно знайти зміну деформованого стану рухомої стрічки (приймавши, що  $i = 1, 2, \dots, m$ ) в стрікоподаючій системі з  $m$  стрікоподаючими парами валків.

1. Гавва О.М. Пакувальне обладнання в 3 кн. – 1 кн. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару / О.М. Гавва, А.П. Безпалько, А.І. Волчко [За ред. О.М. Гавви]. – Київ: ІАЦ «Упаковка», 2008. – 436 с.
2. Гавва О.М. Пристрої подачі рулонного пакувального матеріалу / О.М. Гавва, М.А. Масло, В.Л. Яровий // Упаковка. – 2006. – № 2. – С. 34–28.
3. Мікульюнок І.О. Полімери в пакуванні / І.О. Мікульюнок, Г.Л. Рязцев // Упаковка. – 2001. – № 3. – С. 18–20.
4. Митрофанов В.П. Технологическое оборудование и оснастка упаковочного производства: учеб. пособ. / В.П. Митрофанов, В.И. Бобров. – М.: МГУП, 2003. – 204 с.
5. Пальчевский Б.О. Розрахунок функціональних пристроїв пакувальних машин: навч. посіб. / Б.О. Пальчевский, О.А. Крестьянполь, Д.В. Бондарчук [За ред. Б.О. Пальчевського] – Луцьк.: РВВ ЛНТУ, 20011. – 295 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

УДК 621.906

**Н.Т. Зубовецька**

Луцький національний технічний університет

**ВИСОКОПРОДУКТИВНА ТА ВИСОКОШВИДКІСНА ОБРОБКА НА ВЕРСТАТАХ**

В статті розглянуто особливості технології високошвидкісної і високопродуктивної обробки на верстатах. Проведено короткий огляд публікацій на цю тему. Наведено основні вимоги до підшипників шпинделів верстатів.

*Ключові слова:* високопродуктивна обробка (ВПО), високошвидкісна обробка (ВШО), аналіз, верстати, шпиндельні опори, підшипники.

Форм. 5. Літ. 11.

**Н.Т. Зубовецкая****ВИСОКОПРОДУКТИВНАЯ И ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ОБРАБОТКА НА СТАНКАХ**

В статье рассмотрены особенности технологии высокоскоростной и высокопроизводительной обработки на станках. Проведен краткий обзор публикаций на эту тему. Приведены основные требования к подшипникам шпинделей станков.

*Ключевые слова:* высокопродуктивная обработка (ВПО), высокоскоростная обработка (ВСО), анализ, станки, шпиндельные опоры, подшипники.

**N.T. Zubovetska****HIGHLY PRODUCTIVE AND HIGH-SPEED PROCESSING ON MACHINES**

The article describes the technology features of high-speed and high-performance processing on machine-tools. A brief overview of publications on this subject was conducted. And the basic requirements for bearings of spindles of machine tools were considered.

*Keywords:* high-performance processing (HPP), high-speed processing (HSP), analysis, machines, shpindelny support, bearings.

**Постановка проблеми.** Технологія високошвидкісної обробки і високопродуктивної обробки у даний час є об'єктом пильного вивчення науковців і виробників багатьох розвинутих машинобудівних країн світу. З березня 2003 р. по червень 2004 р. в провідних спеціалізованих виданнях світу зафіксовано понад 100 публікацій, присвячених технології ВШО і ВПО. За період з 2001 по 2004 р.р. проведено близько 20 міжнародних конференцій, колоквиумів і виставок з ВПО і ВШО. Усе це свідчить про надзвичайно високий інтерес верстатобудівників і технологів-машинобудівників щодо перспектив технології ВПО і ВШО.

Підшипникові опори є однією з найвідповідальніших складових, які значною мірою визначають експлуатаційні характеристики верстатів таких як: точність, надійність, продуктивність, економічність. Повна реалізація можливостей нових інструментальних матеріалів та переваг технологій високошвидкісної та високопродуктивної обробки може бути використана на умовах одночасного використання переваг шпиндельних опор різних типів. Тому розвиток технологій високошвидкісної та високопродуктивної обробки є актуальною задачею, яка потребує розробки нових конструкцій як шпиндельних вузлів так і їх опор.

**Основний зміст дослідження.** Основна ідея, яка покладена в роботу, полягає у тому щоб провести короткий огляд публікацій спрямованих на розробку універсальних і спеціалізованих верстатів для реалізації технології ВШО і ВПО та розглянути основні вимоги, що ставляться до підшипників шпинделів верстатів.

Сучасний розвиток технологій високошвидкісної обробки (ВШО) і високопродуктивної обробки (ВПО) на верстатах зумовлений наступним:

1) необхідністю високопродуктивної і прецизійної обробки деталей з кольорових сплавів, алюмінію, графіту, пластмас та ін., високоміцних легованих і загартованих сталей і сплавів, сплавів з нікелю, титану, керамічних матеріалів, які важко обробляються, та ін.

2) необхідністю високопродуктивної і прецизійної обробки деталей малих розмірів для високотехнологічних машин і приладів (так звана мікрообробка);

3) появою нових інструментальних матеріалів (кермети, кубічний нітрид бору, полікристалічний алмаз, кераміка на базі нітриду кремнію та ін.), стійких до зносу, високих температур та окислення;

4) появою нових конструкцій інструментів з універсальними та спеціалізованими багатощаровими PVD- і PVS- покриттями, а також інструментів з високою міцністю їх корпусів на

згин і розрив, високою стійкістю до дії відцентрових сил, параметри яких оптимізовані до умов ВШО і ВПО.

Сьогодні у виробництві розмежують високошвидкісну і високопродуктивну обробку. Це прогресивні методи, які дозволяють не лише скоротити час виробництва і збільшити точність, а також це є певна стратегія для підвищення продуктивності. За високошвидкісної обробки збільшення швидкості обробки зняття металу з оброблюваного матеріалу відбувається в основному тільки за рахунок підвищення швидкості різання; за високопродуктивної обробки – в основному за рахунок підвищення подачі і (або) глибини різання. В тематичній відбірці журналу *Werkzeuge*, 2002, Nr. 1 “Високопродуктивна обробка” наводяться результати опитування шістьох ведучих германських експертів в області різання і спеціалістів авіаційної промисловості відносно конкуренції ВШО і ВПО. Експерти відмічають, що ВПО (обробка зі значно більш високими подачами і глибинами різання) має значно більший потенціал щодо економії часу обробки. Але, не дивлячись на різницю між ВПО і ВШО, вони все ж мають і спільні підвищені вимоги так званих учасників процесу [1]: системи CAD/CAM, ЧПУ і верифікації його коду, верстата і його шпинделя, затискних механізмів, ріжучих інструментів і інструментальних патронів, змащувальні – охолоджуючої рідини (ЗОР), техніці безпеки і кваліфікації операторів.

У сучасному світі технології ВШО та ВПО знайшли застосування при:

- 1) високошвидкісному зовнішньому і внутрішньому шліфуванні вузьким кругами складних поверхонь прицевійних ріжучих інструментів;
- 2) високошвидкісному фрезеруванні прес-форм і штампів із загартованих сталей фрезами малого діаметру, які дозволяють отримати високоякісні поверхні і уникнути (ліквідувати) ряду операцій, наприклад, електроерозійної;
- 3) мікрофрезеруванні фрезами діаметром 0.25 мм і менше з частотою обертання до 500000 хв<sup>-1</sup>;
- 4) точінні і фрезеруванні алюмінієвих сплавів;
- 5) нарізанні різьби мітчиками, фрезами;
- 6) внутрішньому і плоскому шліфуванні;
- 7) свердлінні і розточуванні;
- 8) глибинному шліфуванні деталей авіаційних двигунів з нікелевих сплавів та ін.

З методів ВПО і ВШО лезовим інструментом найбільше розповсюдження в наш час має фрезерування кінцевими фрезами, в меншій мірі використовуються інші методи: торцеве фрезерування, точіння, розточування і свердління.

Аналіз досвіду ВПО і ВШО лезовим інструментом показав, що режими обробки для різних методів відрізняються головним чином в залежності від: динамічних характеристик, які визначаються схемою процесу різання; умов теплотворення і охолодження; матеріалу, який обробляється. В загальному випадку потрібний рівень швидкості різання  $v$  надзвичайно високий і досягає [2] для заготовок: з кольорових сплавів  $v = 7000...9000$  м/хв.; з загартованих сталей  $v \leq 2000$  м/хв.; з чавуну  $v \leq 4000$  м/хв. В даний час найбільш розповсюджено високошвидкісне фрезерування кінцевими фрезами.

Відрізняють фрезерування з використанням ЗОР і так зване сухе фрезерування (без ЗОР). За результатами опитування 10 німецьких ведучих фірм в роботі [3] зроблений висновок, що найбільший інтерес викликають інструменти для так званої сухої високошвидкісної і твердої обробки, а також обробки спеціальних матеріалів. Відзначається, що відбувається витиснення звичайного фрезерування високошвидкісним при обробці складних деталей з важкооброблених матеріалів. Однак, в багатьох випадках, високошвидкісне фрезерування, при якому є нормою частота обертання шпинделя 40000 хв<sup>-1</sup> з крутими моментами більш 6 Н·м, є менш економічне (а іноді значно). На основі досвіду різних підприємств існують границі, частіше умовні, між звичайним і високошвидкісним фрезеруванням. На прикладі високошвидкісного верстата XSM 400 фірми Mikron, вперше показаного на виставці ЕМО [4], доведено, що основною відмінністю високошвидкісного фрезерування від звичайного є збільшення в 5...10 разів швидкості подачі, а в цілому багатократно збільшена швидкість різання, в результаті чого змінюється процес стружкоутворення і напрямок потоку стружки. Відзначається також підвищення стійкості і зменшення зносу інструменту при високошвидкісному чорновому периферійному фрезеруванні (глибина 10 – 20 мм) загартованої штампової сталі AISI H13 твердістю HRC 52 кінцевими твердосплавними фрезами, які мають одношарове покриття (діаметром 10 мм з швидкістю 314 м/хв і подачею на зуб 0,067 мм) шляхом комбінування попутного і зустрічного фрезерування. Було також розглянуто співвідношення і залежності між основними параметрами, які впливають на температуру заготовки за сухого високошвидкісного фрезерування. Виявлено, що температура

падає при збільшенні величини подачі на зуб і досягає мінімуму за максимальної подачі, і є значно менша за температуру відпуску, але при швидкості більше ніж 1000 м/хв температура пропорційно збільшується. Крім того, потужність різання збільшується пропорційно, а при швидкості 1150 м/хв., незалежно від обраної подачі, буде в 3.27 рази вища ніж при швидкості у 300 м/хв.

Одна з основних проблем високошвидкісного фрезерування – виникнення вібрацій інструменту. Наприклад, при частотах 40 – 60 тис. хв.<sup>-1</sup>, які є типовими для верстатів фірми Mikton, виникають підвищені відцентрові сили, які впливають на шпindelні опори і погіршують точність обробки, через нестабільне положення верхньої точки фрези. Крім того, відбувається теплове розширення шпинделя і його вібрація як результат відцентрової сили, яка діє на будь яку незбалансовану масу в системі “інструмент – інструментальний патрон”. Отже, можна зробити певний висновок відносно підвищених вимог до балансування системи “шпindel – інструмент” і динамічної жорсткості і вібростійкості опор шпинделя для ВШО.

Значного зменшення вібрацій при високошвидкісному фрезеруванні можна добитися не тільки зі збільшенням частоти обертання кінцевих фрез з виходом на визначенні діапазони частот, але і шляхом регулювання їх вильоту з шпинделя в залежності від діаметру, числа канавок, виду кріплення та інших факторів.

За результатами практичних експериментів [5] американського інституту технологічних досліджень (NIST) відносно впровадження на підприємствах ВШО різноманітних матеріалів, а також 9 відомих американських і європейських фірм, досліджено резерви підвищення продуктивності ВШО, а також вказано на застосування недостатньо високих швидкостей різання, та не повне використання потенціалу сучасних інструментів.

В останній час для ВШО і ВПО використовується як існуюче металорізальне обладнання після його модернізацій, так і спеціально розроблене. Основні напрямки модернізації – підвищення потужності, швидкохідності і жорсткості верстатів. Журнальні публікації, матеріали виставок, колоквиумів і симпозиумів вказують на цілеспрямовану розробку універсальних і спеціальних верстатів для реалізації технології ВШО і ВПО як абразивним так і лезовим інструментом. Питома вага верстатів для ВПО і ВШО в загальному парку ведучих світових машинобудівних фірм стабільно зростає.

Високошвидкісні фрезерувальні верстати зазвичай використовуються при обробці алюмінію і легких сплавів, при цьому знижуються сили різання, забезпечується мала шорсткість, безвібраційне різання, підвищується стійкість інструменту, зменшується нагрівання деталі в зв'язку з винесенням тепла стружкою. В останній час фрезерувальні верстати для ВШО і ВПО широко використовуються для обробки штампів замість або в комбінації з електроерозійної обробкою.

Токарні верстати для високошвидкісної обробки менш розповсюджені. В теперішній час вони працюють переважно з частотою обертання шпинделя до 10000 хв.<sup>-1</sup>.

Високі частоти обертання потрібні також для шпинделів внутрішньо – шліфувальних верстатів, які повинні забезпечувати швидкості шліфування 50...100 м/хв і вище.

Застосовуються як універсальні високошвидкісні верстати для фрезерувальних, токарних, розточувальних, свердильних і інших робіт, так багатоцільові верстати і обробляючі центри.

На фірмі Fluve Metal [6] узагальнений досвід експлуатації надшвидкісних вертикальних обробляючих центрів Vibra-Free американської фірми Computachine, оснащених шпинделями з частотою обертання 45000 хв.<sup>-1</sup> фірми Irag. При цьому відзначено, що фірма вже має досвід застосування верстатів зі шпинделями на 15000 хв.<sup>-1</sup>. Високошвидкісне фрезерування на гнучких виробничих системах (ГВС) (6 обробляючих центрів мод. A88 японської фірми Makino) деталей вантажівок, в тому числі їх двигунів, відбувається на фірмі Eaton Corporation; вказані економічні і технічні переваги такої обробки. На виставці METAV'2002 були представлені вперше верстати для ВШО німецьких фірм: обробляючі центри з лінійним приводом DMP60V linear і DMF360 linear фірми DMG; високошвидкісної фрезерний верстат мод. RHP800 фірми Rödgers з лінійним приводом, гідростатичними направляючими і шпинделем з частотою обертання 36000 хв.<sup>-1</sup>; вертикальний токарний верстат VTM-350 фірми Schuster та ін.

Найбільш високі вимоги ставляться до шпиндельних вузлів (ШВ) верстатів для ВПО і ВШО відносно потужності, жорсткості і швидкохідності за їх високої точності.

Для роботи з високими швидкостями різання створюють спеціальні ШВ, частота обертання яких досягає 100000 хв.<sup>-1</sup> і більше. Підвищення швидкохідності ШВ супроводжується збільшенням його потужності. Швидкохідність шпиндельних вузлів прийнято оцінювати так званим

параметром швидкохідності:  $dn_{max}$ , де  $d$  – діаметр шийки шпинделя, мм;  $n_{max}$  – максимальна частота обертання шпинделя, хв.<sup>-1</sup> Потужність, яка передається шпинделем, визначається навантажувальною здатністю:  $N/d$ , де  $N$  – потужність приводу шпинделя, Вт.

ШВ для швидкісного різання в наш час в основному встановлюють на радіально-упорних кулькових підшипниках, які забезпечують швидкохідність до  $dn_{max} = (1..1,5)$  мм·хв.<sup>-1</sup> і навантажувальну здатність до  $N/d = (150..200)$  Вт·мм<sup>-1</sup> [2]. Для верстатів середніх розмірів для ВПО в основному заготовок з чорних металів і важкооброблюваних сплавів необхідно забезпечити як мінімум  $N/d=(600..800)$  Вт·мм<sup>-1</sup> за  $dn_{max} > (2..2,5)$  мм·хв.<sup>-1</sup>

Необхідність підвищення жорсткості вимагається підвищеними вимогами до динамічної якості верстатів в умовах праці на високих швидкостях і до точності обробки.

В ШВ використовують: спеціальні шпиндельні опори кочення, гідравлічні (гідродинамічні й гідростатичні) газові (газодинамічні й аеростатичні). Останнім часом також більш широко використовують електромагнітні опори.

Для опор кочення проблему представляє забезпечення заданого ресурсу за високих швидкостей. В звичайних підшипниках кочення, в яких не прийнято спеціальних мір для досягнення високих швидкостей, параметр швидкохідності  $dn_{max} \leq 0,4 \cdot 10^6$  мм·хв.<sup>-1</sup>. Завдяки спеціальним засобам (удосконалення способів змащування і видів мастил та охолодження, динамічного балансування шпинделя) в підшипниках кочення значення величини  $dn_{max}$  може бути збільшене до  $2,5 \cdot 10^6$  мм·хв.<sup>-1</sup> [7]. Гідростатичні підшипники працюють звичайно при  $dn_{max} \leq 1,5 \cdot 10^6$  мм·хв.<sup>-1</sup>, аеростатичні і газостатичні - при  $dn \leq (2,5..3) \cdot 10^6$  мм·хв.<sup>-1</sup>.

Найбільше поширення отримали ШВ з опорами кочення, як найбільш економічні і надійні, які вимагають меншого догляду. За власною навантажувальною здатністю і жорсткістю вони в цілому мають переваги над опорами інших типів, однак точність обертання в зв'язку з більш суттєвим впливом похибок виготовлення в них, як правило, нижча.

Підшипниковими заводами в нас і за кордоном виготовляються спеціальні шпиндельні підшипники кочення для верстатів: двохрядні і однорядні роликотпідшипники з конічною шийкою, конічні роликотпідшипники, радіально упорні кулькові підшипники з кутом  $15^\circ$  та  $25^\circ$  і упорно-радіальні двохрядні кулькові підшипники з кутом контакту  $60^\circ$ . Роликові підшипники мають більшу вантажопідйомність, на відміну від кулькових. Вдосконалення конструкцій підшипників кочення йде у напрямку підвищення їх точності, створення суперлегких серій оптимізацій умов контакту і використання композиційних матеріалів для тіл кочення. Точність обертання сучасних прецизійних підшипників складає 0.5...3 мкм, надпрецизійних - доли мікрометрів. Застосування радіально-упорних кулькових підшипників з тілами кочення менших діаметрів і більш тонкими кільцями дало змогу підвищити швидкохідність за однакових діаметрів до 2 разів, а при рівних зовнішніх діаметрах збільшити жорсткість до 60...70%. Удосконалюються також вид і спосіб мастила підшипників кочення, рекомендується змащувати мінімальною кількістю мастила, використання пластичного і масляного мастила, масляного туману, використання імпульсної подачі і вприскування мастила.

В гідростатичних опорах з ростом частоти обертання значно збільшуються втрати на тертя, що обмежують їх швидкохідність. В ШВ з діаметром передньої шийки шпинделя 100мм при частоті обертання 4000хв.<sup>-1</sup> за даними фірми FAG потужність тертя холостого ходу в вузлах з опорами кочення складає 0,7 кВт, гідростатичними - 3,5 кВт. При частоті обертання 30000 хв.<sup>-1</sup> втрати в гідростатичних опорах в 3...4 рази вищі ніж в опорах кочення.

Аеростатичні і аеродинамічні (газові) опори використовуються в високо швидкісних порівняно мало навантажених ШВ при підвищених вимогах до шорсткості деталей, включаючи верстати для точіння деталей з кольорових металів, алмазного шліфування надтвердих і крихких матеріалів, шліфування і свердління отворів малого діаметру і ін. Частіше ШВ з газовими опорами виконуються у вигляді автономних вузлів (пнеumo- або електрошпинделів). Їх швидкохідність обмежується втратою стійкості (появою напівшвидкісного вихору). Похибка обертання шпинделів на аеростатичних опорах складає десяті, а при оптимальних параметрах і соті доли мікрометра. В теперішній час біля 40% найбільш швидкохідних ШВ (за частотою обертання від 70000 до 100000 хв.<sup>-1</sup>) виконуються з аеростатичними опорами.

Електромагнітні опори шпинделів найбільш швидкохідні. Цей параметр обмежується тільки механічною стійкістю матеріалу ротора. До їх переваг відносять більш нижчі, ніж для інших опор, вимоги до точності виготовлення і складання електрошпинделя через великі зазори в опорах (від десятих, сотих мм при малих діаметрах, до 0,6...1 мм при великих значеннях  $d$ ), можливість

обертання шпинделя навколо осі інерції завдяки спеціальному ланцюгу в системі управління, можливість забезпечення дуже точної врізної подачі за рахунок зміщення шпинделя в межах зазору шляхом подачі сигналів в ланцюгу управління. Точність обертання шпинделя в електромагнітних опорах складає приблизно 1 мкм, жорсткість опор зменшується із збільшенням частоти обертання, так як електромагніт зменшує величину і зсув фази сигналу. Електрошпинделі на електромагнітних опорах потребують спеціального охолодження, як в зазорі між ротором і статором так і з зовні корпусу (сорочка охолодження). В наш час вартість електрошпинделів з електромагнітними опорами суттєво вища, ніж з аеростатичними.

Нагрів шпиндельних опор, зміщення осі шпинделя обмежує підвищення режимів різання. Дуже серйозний характер має зміна температури опор ШВ при розгоні. В опорах кочення нагрів приводить до зміни зазору - натягу, що в свою чергу призводить до зміни таких параметрів, як статична жорсткість, ресурс, динамічні характеристики.

**Висновки.** Проведений аналіз [8] характеристик усіх типів опор високошвидкісних шпинделів для ВШО та ВПО показав, що підшипники кочення, гідравлічні (гідродинамічні і гідростатичні), газові (аеродинамічні і аеростатичні) та магнітні, які використовуються в якості опор високошвидкісних шпинделів, не забезпечують одночасно повний комплекс вимог, які ставляться до них. Це можливо за умови одночасного використання переваг опор даних типів. На жаль, конструктивні можливості істотного покращення їхніх характеристик практично вичерпані. Існує новий, перспективний спосіб гідро-газового мащення, що дає можливість одночасно збільшити переваги (високу статичну жорсткість, демпфування) і зменшити недоліки (високі втрати потужності на тертя при збільшенні швидкохідності), які властиві гідравлічним та газовим підшипникам [9]. Дослідження [10] радіальних підшипників, та газо-гідравлічних інерційних підшипників [11], які створені за цим принципом, показали, що вони мають суттєві переваги перед усіма типами підшипників по усім технічних параметрам, які впливають на якість обробки за ВШО і ВПО.

1. Burrows S. High-speed processing: the requirements to the participants of process / S. Burrows // Machinery. – 2003. Nr. 4085. – S. 16-18.
2. Баклыков В.Г. Высокоскоростной шпиндельный узел для силового резания / В.Г. Баклыков, А.М. Фигатнер // Станки и инструмент. – 1990. – № 12. – С. 26-28.
3. Fecht N. Die Werkzeuge des morgigen Tages // Fertigung. – 2002. № 8. – S. 108-110.
4. Toh C. Increase of stability and reduction of deterioration of the tool at high-speed draft peripheral milling / C. Toh // Journal of Engineering and Manufacture. – 2003. V. 217. Nr. B9. – S. 1295-1304.
5. Aronson R. The major factors influencing results of high-speed processing / R. Aronson // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. V. 126. Nr. 1. – S. 89-96.
6. Zelinski P. Experience of application of the superhigh-speed processing centres in firm Fluve Metal / P. Zelinski // Modern Machine Shop. – 2001. V. 74. Nr. 3. Special release: high-speed cutting. – S. 86-93.
7. Расчётный анализ деформационных, динамических и температурных характеристик шпиндельных узлов при проектировании: Методич. рек. / Сост. Левина З. М., Горелик И. Г., Зверев И. А., Сегида А. П. – М.: ЭНИМС, 1989. – 78 с.
8. Гордеев А.Ф. Конструкции гидравлических шпиндельных опор для высокоскоростной и высокоточной обработки / А.Ф. Гордеев, П.А. Захаров // Материалы 15-й Ежегодной Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в машиностроении (ТЕХНОЛОГИЯ-2000)», Киев: 2000. – С. 59 – 63.
9. Спосіб мащення. Патент України на винахід № 25413А МКВ 6 F16 №15/100.
10. Гордеев О.Ф. Навантажувальні і енергетичні характеристики складових мащення високошвидкісного шпиндельного гідрогазового інерційного підшипника / О.Ф. Гордеев, П.О. Захаров // Промислова гідравліка і пневматика. – 2004, № 3. – С. 21-26.
11. Зубовецька Н.Т. Навантажувальна здатність і енергетичні характеристики високошвидкісних радіальних газо-гідравлічних інерційних підшипників: дисертація кандидата технічних наук: 26.05.10 / Зубовецька Наталія Тарасівна. – Луцьк., – 190 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.



**В.В. Карташов**

*Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя*  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСНОНАПОВНЕНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ  
 СФОРМОВАНИХ У ЗМІННОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ**

*В роботі досліджено вплив змінного магнітного поля на ударну в'язкість епоксикомпозитів. Обробку композицій проводили за допомогою розробленого пристрою змінним магнітним полем частотою  $\nu = 0,02...200$  кГц при вмісті ферромагнітного наповнювача  $q = 0...150$  мас.ч. на 100 мас.ч. зв'язувача. Методом математичного планування експерименту досліджено ударну в'язкість в залежності від режимів магнітної обробки. Встановлено, що для забезпечення високих значень ударної в'язкості у епоксидне в'язуче необхідно вводити 25...35 мас.ч. фериту, та обробляти змінним магнітним полем частотою 100...200 кГц. Це пояснюється тим, що змінне магнітне поле викликає збільшення кількості активних центрів та орієнтування доменів макромолекул, що у свою чергу приводить до підвищення фізико-механічних властивостей матеріалу.*

*Ключові слова:* епоксидний олігомер, поліетиленполіамін, композитний матеріал, дисперсний наповнювач, ударна в'язкість.

*Рис. 5. Літ. 13.*

**В.В. Карташов**

**ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСИОННОПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИКОМПОЗИТОВ  
 СФОРМИРОВАННЫХ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*В работе исследовано влияние переменного магнитного поля на ударную вязкость эпоксикомпозитов. Обработку композиций проводили с помощью разработанного устройства переменным магнитным полем частотой  $\nu = 0,02...200$  кГц при содержании ферромагнитного наполнителя  $q = 0...150$  мас.ч. на 100 мас.ч. связующего. Методом математического планирования эксперимента исследовано ударную вязкость в зависимости от режимов магнитной обработки. Установлено, что для обеспечения высоких значений ударной вязкости в эпоксидное вязучее необходимо вводить 25...35 мас.ч. феррита, и обрабатывать переменным магнитным полем частотой 100...200 кГц. Это объясняется тем, что переменное магнитное поле вызывает увеличение количества активных центров и ориентирования доменов макромолекул, а это свою очередь приводит к повышению физико-механических свойств материала.*

*Ключевые слова:* эпоксидный олигомер, полиэтиленполиамин, композитный материал, дисперсный наполнитель, ударная вязкость.

**V.V. Kartashov**

**THE RESEARCH OF EPOXYCOMPOSITES WHICH CONTAIN A DISPERSE FILLER  
 AND FORMED IN ALTERNATING MAGNETIC FIELD**

*The influence of alternating magnetic field on the impact strength of epoxycomposites was investigated. Treatment of the compositions was performed by developed device with an alternating magnetic field  $\nu = 0,02...200$  kHz and a filler content of  $q = 0...150$  mass parts of ferromagnetic. A regression equation to determine the impact strength by the method of mathematical planning of the experiment was found. Research has found that the use of ferrite in the range of 25÷35 mass parts per 100 mass parts of oligomer and processing by the alternating magnetic field by 100...200 kHz provides high rates of impact strength. Increasing of the physical and mechanical properties of the materials can be explained by the increasing of amount of active centres and orientation of the domains of the macromolecules as a result of the influence of alternating magnetic field.*

*Key words:* epoxy oligomer, polyetylenpoliamin, composite material, disperse filler, impact strength.

**Постановка проблеми.** На даному етапі розвитку сучасна промисловість ставить широкий комплекс вимог до нових метало- енергозберігаючих технологій. Одним з основних напрямків вирішення цієї проблеми є застосування полімеркомпозитних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Використання таких матеріалів дозволяє збільшити термін експлуатації обладнання, зменшити собівартість ремонтних робіт та металовитрати виробництва. Актуальним є використання полімеркомпозитних матеріалів на основі епоксидних зв'язувачів з дисперсними та волокнистими наповнювачами. При цьому одним з основних завдань при розробленні таких матеріалів є забезпечення оптимальних умов фізико-хімічної взаємодії на межі поділу фаз «наповнювач – олігомерний зв'язувач» та оптимальних умов зшивання при формуванні виробу.

Суттєво підвищити фізико-механічні характеристики композитів дозволяє їх модифікація зовнішніми силовими полями. При цьому навколо наповнювача змінюються умови проходження процесів зшивання, що приводить до утворення матеріалу із зміненими властивостями. Застосування магнітного оброблення дозволяє провести впорядкування доменів, що є, фактично

макромолекулами, і забезпечує направлену зміну властивостей композиту та створити матеріали з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Саме тому використання магнітної модифікації для створення дисперснонаповнених епоксикомпозитів з комплексом покращених фізико-механічних характеристик є актуальним завданням сучасного матеріалознавства. У зв'язку з цим, важливою задачею є встановлення закономірностей впливу магнітної обробки на процеси структуроутворення при формуванні матеріалів, а також їхніх властивостей. Отже, перспективними з науково-практичної точки зору є нові методи модифікації епоксикомпозитів на етапі структуроутворення, оскільки дозволять направлено керувати комплексом фізико-механічних властивостей композитних матеріалів, що забезпечить збільшення сфери їх застосування та дозволить вирішити ряд практичних задач.

Метою роботи було дослідити композитні матеріали на основі епоксидних смол з дисперсним наповнювачем затверджених під впливом змінного магнітного поля для створення епоксикомпозитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для регулювання основних властивостей КМ використовують фізичне та хімічне модифікування складових композиції [1]. У роботах авторів [2] встановлено, що наявність магнітного поля в процесі полімеризації реактопластів сприяє утворенню впорядкованих надмолекулярних структур. Це призводить до зміни фізико-механічних характеристик таких полімерів. Встановлено, що одним із основних чинників, що визначають вплив магнітного поля на властивості полімерів, є напруженість магнітного поля [3]. При цьому зміцнювальний ефект від магнітного оброблення залежить від режимів, котрі необхідно утримувати у певних оптимальних межах.

Відомо [4], що епоксидні полімери зазвичай є полярними діелектриками, основною властивістю яких є здатність до поляризації під впливом зовнішніх силових полів. Тобто полімери на основі епоксидного олігомера чутливі до впливу зовнішніх силових полів. В електричному полі в них може виникати дипольна або міграційна поляризація, а під впливом магнітного поля відбувається зміщення ділянок ланцюгів макромoleкули вздовж напрямку напруженості поля. При наповненні епоксидної матриці феритовими частинками наповнювача, при достатній його концентрації, такі полімери здобувають феромагнітні властивості, і при внесенні в магнітне поле поведуть себе як феромагнетики. Відомо [5], що при внесенні феромагнітних матеріалів в магнітне поле, в залежності від напруженості магнітного поля, відбувається часткова, або повна орієнтація спінів магнітних атомів. При цьому, якщо поміняти напрям зовнішнього магнітного поля, зміниться і напрям магнітних моментів, тобто відбудеться перемагнічування.

Авторами [6] встановлено, що величина напруженості магнітного поля нелінійно впливає на характеристики оброблених епоксидних полімерів, зокрема на їх пружні властивості. Встановлено, що при затвердженні епоксидного полімера в магнітному полі, матеріал проявляє анізотропію як відносно пружних характеристик, так і відносно електричних. При цьому степінь орієнтації макромoleкул зростає при збільшенні тривалості магнітного оброблення. Проте при різних значеннях напруженості магнітного поля макромoleкули орієнтовані по різному відносно силових ліній поля. Це пояснюють тим, що геометрична форма молекулярних утворень залежить від напруженості магнітного поля. Оскільки напрям осей анізотропії такого матеріалу є складною функцією від напруженості, можна припустити, що магнітне оброблення впливає на кінетику зшивання композиту. А саме, при реакції полімеризації, утворення хімічних зв'язків поширюється в об'ємі композиції у вигляді фронту, для якого характерними є напрям поширення та швидкість, що залежать від зовнішніх умов.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що при застосуванні магнітного оброблення спостерігали відмінність в просторовій орієнтації надмолекулярної організації [7, 8]. Тобто існує залежність густини зшивання сітки по відношенні до орієнтації силових ліній зовнішнього намагнічуючого поля.

Також у роботах авторів [9] показано, що у епоксидних полімерів, як у полярних діелектриків, мають місце процеси електронної, дипольної та міграційної поляризації. Тому під впливом магнітного поля відбувається зміщення ділянок ланцюгів макромoleкул в напрямку силових ліній поля. Встановлено, що при зростанні температури середовища підвищується діелектрична проникність епоксидних полімерів. А при досягненні температури склування починає знижуватися.

Таким чином для регулювання експлуатаційних властивостей епоксидних композитів перспективним є застосування модифікації силовими полями, зокрема змінним магнітним та електричним полем. Такі способи обробки фізичними полями забезпечують не лише активацію

макромолекул матриці, а й дають змогу збільшити активність епоксидних композицій для кращої міжфазної взаємодії дисперсних частинок із макромолекулами зв'язувача. Крім того оброблення силовими полями сприяє впорядкуванню структури матеріалу, збільшує його густину, забезпечує суттєву зміну конфірмаційного набору макромолекул у поверхневих шарах. Це забезпечує покращення фізико-механічних характеристик матеріалу.

**Методика дослідження.** В якості в'язучого для полімерної матриці вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20, який зшивали низькотемпературним твердником поліетиленполіаміном (ПЕПА) при стехіометричному співвідношенні компонентів ЕД-20: ПЕПА 100:10 мас.ч., що забезпечує можливість формування матеріалу при кімнатних температурах. При формуванні епоксикомпозитів вводили дисперсні частки феромагнітної природи (ферит марки 1500НМ3) розміром 63 мкм.

Для дослідження впливу магнітного оброблення на властивості композитних матеріалів було розроблено пристрій для оброблення епоксидних композицій змінним магнітним полем [10]. Оброблення композицій здійснювали як до введення твердника, так і в процесі зшивання тривалістю 10...180 хв., так як експериментально виявлено, що саме у такому діапазоні часу вплив магнітної обробки є максимально ефективним. Встановлено [11], що подальше збільшення тривалості модифікування композицій не призводить до суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик композитів на епоксидній основі. Зразки досліджуваних епоксидних композицій розташовували в середині соленоїда вздовж його осі. Після розміщення зразка в соленоїда пристрою, коливальний контур пристрою налаштовували на резонанс по частоті за допомогою конденсаторів змінної ємності. Частоту змінного магнітного поля (ЗМП) створюваного робочим каскадом соленоїда задавали звуковим генератором ГЗ-33 в межах 20 Гц - 200 кГц. Індукцію магнітного поля задавали шляхом зміни кількості задіяних витків котушки соленоїда в межах 0,5 – 3,5 Тл. Наближені значення індукції магнітного поля вимірювали за допомогою датчика Хола. Роботу пристрою контролювали за допомогою осцилографа із каліброваною розгорткою типу С1-73, для під'єднання якого в соленоїді виконано контрольну обмотку.

Феромагнітний наповнювач вводили в межах від 0 до 150 мас. ч. та проводили затвердження композицій під впливом змінного магнітного поля. Отримані матеріали досліджували на ударну в'язкість по Шарпі згідно ГОСТ 4647-80 за допомогою маятникового копра.

Обробку та аналіз дослідних даних проводили за допомогою програмного забезпечення Statistica 6.0 шляхом застосування багатofакторного регресійного аналізу.

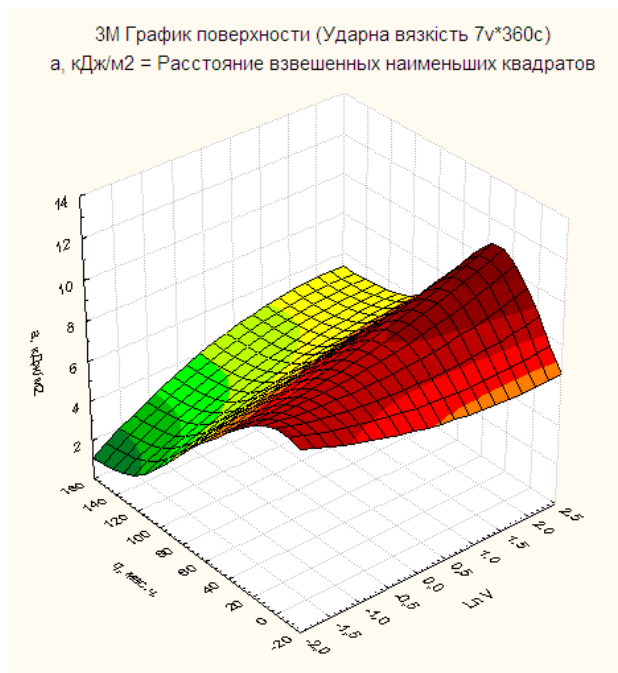
#### Обґрунтування отриманих результатів

У результаті аналізу дослідних даних було проведено дослідження кореляційного зв'язку між залежними та незалежними змінними. В якості незалежних змінних були представлені частота змінного магнітного поля ( $\nu$ , кГц), магнітна індукція ( $B$ , Тл) та концентрація феромагнітного наповнювача ( $q$ , мас.ч.). В якості залежної змінної – ударна в'язкість ( $a$ , кДж/м<sup>2</sup>). Результати кореляційного аналізу залежних та незалежних змінних приведені на рис 1.

Кореляції (Ударна в'язкість)				
Отмеченные корреляции значимы на уровне $p < 0,05000$				
N=360 (Построчное удаление ПД)				
Переменная	$\nu$ , кГц	$B$ , Тл	$q$ , мас.ч.	$a$ , кДж/м <sup>2</sup>
$\nu$ , кГц	1,00	-0,76	-0,00	0,27
$B$ , Тл	-0,76	1,00	0,00	-0,39
$q$ , мас.ч.	-0,00	0,00	1,00	-0,78
$a$ , кДж/м <sup>2</sup>	0,27	-0,39	-0,78	1,00

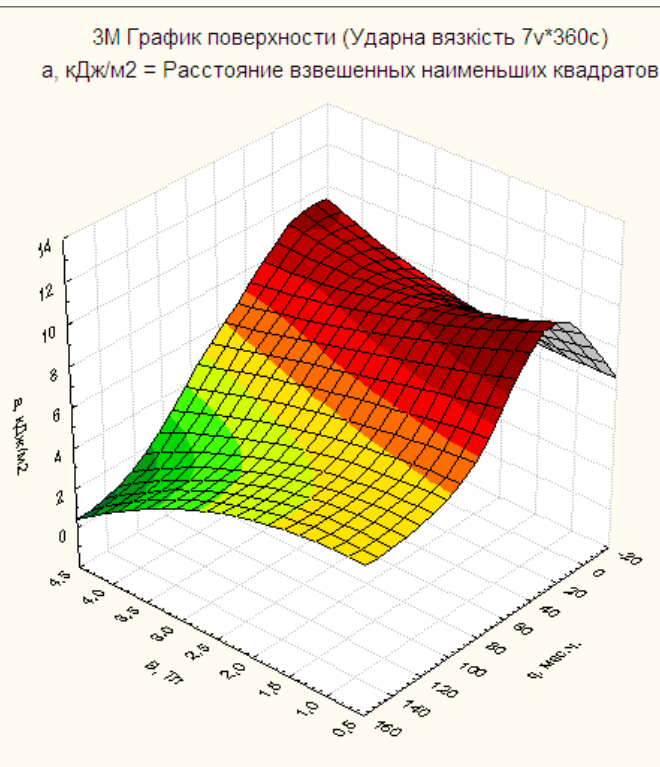
Рис. 1. Кореляційний аналіз впливу незалежних змінних на ударну в'язкість

Встановлено, що ударна в'язкість має помірну кореляцію з частотою ЗМП ( $\nu$ , кГц), оскільки  $0,25 < r/\leq 0,75$  і становить 0,27. Це вказує на те, що зростання частоти приводить до часткового зростання ударної в'язкості. Коефіцієнт кореляції магнітної індукції становить -0,39 (помірна залежність), що свідчить про те, що зростання індукції магнітного поля призводить до помірного зменшення ударної в'язкості. Вміст феромагнітного наповнювача має суттєвий вплив на ударну в'язкість ( $r = -0,78 > 0,75$  – сильна кореляція). Від'ємне значення коефіцієнта кореляції свідчить про те, що збільшення вмісту феромагнітного наповнювача призводить до суттєвого зменшення ударної в'язкості. Графік залежності ударної в'язкості від вмісту феромагнітного наповнювача та частоти ЗМП приведений на рис. 2, а від вмісту наповнювача та індукції магнітного поля на рис. 3.



**Рис. 2. Залежність ударної в'язкості сформованих у ЗМП епоксикомпозитів від вмісту ферромагнітного наповнювача та частоти**

Експериментально встановлено, що збільшення вмісту наповнювача веде до зменшення ударної в'язкості, а зростання частоти магнітного поля приводить до її зростання. При цьому введення ферромагнітних частинок в епоксидну композицію забезпечує зміну умов зшивання епоксидної матриці [12]. При обробці матеріалу змінним магнітним полем у процесі структуроутворення відбувається часткова орієнтація доменів макромолекул вздовж силових ліній поля. Наявність ферромагнітного наповнювача в композиті приводить до зростання магнітної індукції поля, що забезпечує підвищення орієнтаційного ефекту доменів. Зміна орієнтації ланцюгів макромолекул приводить до зміни фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, у тому числі і ударної в'язкості.



**Рис. 3. Залежність ударної в'язкості сформованих у ЗМП епоксикомпозитів від вмісту ферромагнітного наповнювача та магнітної індукції**

Більша міра орієнтації макромолекул, на нашу думку, збільшує фізико-механічні властивості розроблених матеріалів. Проте збільшення концентрації наповнювача, як показало дослідження концентрації ( $q > 40$  мас.ч. фериту) погіршує значення ударної в'язкості. Це пов'язано з тим, що збільшення кількості дисперсних часток в олігомері створює надмірну орієнтацію доменів макромолекул внаслідок чого в процесі зшивання виникають високі значення залишкових напружень, оскільки система макромолекул не може приймати оптимальний, з точки зору залишкових напружень конфірмаційний набір, що характеризується мінімальним значенням внутрішньої енергії [13]. У результаті утворюється більш «рихлий» композитний матеріал, який володіє гіршими фізико-механічними характеристиками. При надмірно високому вмісті феромагнітних часток фізико-механічні властивості погіршуються за рахунок недостатньої змочуваності наповнювача олігомером, що додатково погіршує експлуатаційні характеристики матеріалу.

При збільшенні частоти ЗМП досліджувані характеристики зростали. Це пояснюють тим, що збільшення частоти магнітного поля дозволяє перевести епоксидну матрицю в активний стан, що покращує умови структуроутворення в матеріалі в цілому, а при наявності феромагнітного наповнювача забезпечує орієнтацію доменів макромолекул, що додатково покращує фізико-механічні характеристики. Проте змінне магнітне поле викликає у дисперсних частках феромагнітної природи появу вихрових струмів. Їхнє утворення приводить до виділення теплоти, тобто при високих концентраціях феромагнетика та високій частоті ЗМП відбувається значний нагрів композиту. Оскільки реакція зшивання епоксидного олігомера є екзотермічною, тобто з виділенням тепла, значний додатковий нагрів індукційними струмами є небажаним, поза як погіршується зшивання олігомера твердником.

При наявності ЗМП із деяким значенням магнітної індукції виникає орієнтація доменів макромолекул та частинок наповнювача. Це приводить до покращення фізико-механічних властивостей, а зокрема ударної в'язкості. Збільшення значення магнітної індукції погіршує міцність композиту у випадку зростання вмісту феромагнітних частинок наповнювача (рис. 3). Це пов'язано з тим, що поряд з позитивним впливом на композит внаслідок орієнтації доменів (макромолекул), високі значення магнітної індукції викликають появу індукційних струмів і нагрів композиту. Це, у свою чергу, приводить до погіршення зшивання олігомера твердником. Експериментально встановлено, що оптимальні значення індукції магнітного поля лежать в межах від  $B = 0,5$  Тл до  $B = 2,0$  Тл, при яких досягають високої степені орієнтації макромолекул при незначному нагріві композиції. Дана тенденція спостерігалася при вмісті феромагнітного наповнювача не більше  $q = 40$  мас.ч. При вищій концентрації феромагнетика суттєво погіршуються умови зшивання внаслідок інтенсивнішого нагріву композиції вихровими струмами, можливе спізнення оброблюваного матеріалу.

Підсумовуючи викладене вище, слід зауважити, що вплив ЗМП на експлуатаційні характеристики композитних матеріалів наповнених феромагнетиками носить позитивний характер. Необхідно підбирати такі технологічні режими формування, щоб забезпечувалась орієнтація макромолекул при мінімальному нагріві композиції. Надалі у результаті обробки дослідних даних було проведено поліноміальну регресію (рис. 4).

R= .93944658 R2= .88255988 Скорректир. R2= .87988318  
F(8,351)=329,72 p<0.0000 Станд. ошибка оценки: .76856

N=360	БЕТА	Стд. Ош. БЕТА	В	Стд. Ош. В	t(351)	p-уров.
Св.член			7,764947	0,151924	51,11070	0,000000
Ln V	0,7110	0,073070	1,113385	0,114419	9,73078	0,000000
q, мас.ч.	2,4137	0,257098	0,131122	0,013966	9,38839	0,000000
V2**2	0,0733	0,107578	0,086560	0,126978	0,68169	0,495882
V2**3	-0,4395	0,114548	-0,171806	0,044782	-3,83648	0,000148
V2**4	0,0833	0,149542	0,017593	0,031576	0,55716	0,577775
V4**2	-10,3318	1,132321	-0,003893	0,000427	-9,12445	0,000000
V4**3	11,1150	1,733815	0,000029	0,000005	6,41072	0,000000
V4**4	-3,8460	0,858926	0,000000	0,000000	-4,47767	0,000010

Рис. 4. Результати поліноміальної регресії дослідних даних

Рівняння регресії має вигляд:

$$a(\ln v, q) = 7,764947 + 1,113385 \cdot \ln v + 0,131122 \cdot q - 0,171806 \cdot \ln v^3 - 0,0033893 \cdot q^2 + 0,000029 \cdot q^3.$$

Отримане рівняння дозволяє розрахувати значення ударної в'язкості при заданій частоті ЗМП та вмісті феромагнітного дисперсного наповнювача. Аналіз залишків показав, що похибка



регресійної моделі при розрахунку ударної в'язкості не перевищує 6,9%. Достовірність рівняння регресії з експериментальними результатами оцінювали по їх різниці у абсолютних величинах (залишках). Результати аналізу залишків приведені на рис. 5.

Набл. No.	Зависимая перемен.: а, кДж/м <sup>2</sup>								
	Наблюд. Значение	Предск. Значение	Остатки	Станд. предск.	Станд. Остатки	Стд. Ош. предск.	Махалан. расст.	Удален. остатки	Кука расст.
339	6,90000	7,70547	-0,80547	0,07876	-1,04802	0,114270	6,93873	-0,82368	0,002821
340	7,60000	7,70547	-0,10547	0,07876	-0,13723	0,114270	6,93873	-0,10786	0,000048
341	6,40000	6,96423	-0,56423	-0,27704	-0,73413	0,114201	6,92907	-0,57696	0,001383
342	6,90000	6,96423	-0,06423	-0,27704	-0,08357	0,114201	6,92907	-0,06568	0,000018
343	6,50000	6,96423	-0,46423	-0,27704	-0,60402	0,114201	6,92907	-0,47471	0,000936
344	5,80000	6,96423	-1,16423	-0,27704	-1,51481	0,114201	6,92907	-1,19051	0,005886
345	5,70000	6,31691	-0,61691	-0,58776	-0,80268	0,114399	6,95658	-0,63089	0,001659
346	5,20000	6,31691	-1,11691	-0,58776	-1,45324	0,114399	6,95658	-1,14222	0,005437
347	5,30000	6,31691	-1,01691	-0,58776	-1,32313	0,114399	6,95658	-1,03995	0,004507
348	6,60000	6,31691	0,28309	-0,58776	0,36833	0,114399	6,95658	0,28950	0,000349
349	5,50000	5,79676	-0,29676	-0,83744	-0,38612	0,122769	8,16317	-0,30453	0,000445
350	4,80000	5,79676	-0,99676	-0,83744	-1,29690	0,122769	8,16317	-1,02285	0,005022
351	5,50000	5,79676	-0,29676	-0,83744	-0,38612	0,122769	8,16317	-0,30453	0,000445
352	6,20000	5,79676	0,40325	-0,83744	0,52467	0,122769	8,16317	0,41380	0,000822
353	5,30000	5,18633	0,11367	-1,13045	0,14790	0,160238	14,60789	0,11884	0,000115
354	6,00000	5,18633	0,81367	-1,13045	1,05869	0,160238	14,60789	0,85065	0,005917
355	5,60000	5,18633	0,41367	-1,13045	0,53824	0,160238	14,60789	0,43247	0,001529
356	4,30000	5,18633	-0,88633	-1,13045	-1,15322	0,160238	14,60789	-0,92661	0,007020
357	5,00000	5,08350	-0,08350	-1,17981	-0,10865	0,189057	20,72573	-0,08888	0,000090
358	4,00000	5,08350	-1,08350	-1,17981	-1,40978	0,189057	20,72573	-1,15329	0,015139
359	4,90000	5,08350	-0,18350	-1,17981	-0,23876	0,189057	20,72573	-0,19532	0,000434
360	6,10000	5,08350	1,01650	-1,17981	1,32259	0,189057	20,72573	1,08197	0,013324
Минимум	1,90000	2,42460	-0,52460	-2,18516	-2,23554	0,102369	5,37182	-1,75141	0,000000
Максим.	12,10000	11,55170	0,54830	1,40826	2,71497	0,189057	20,72573	2,17539	0,041773
Среднее	7,54139	7,54139	0,00000	-0,00000	0,00000	0,119245	7,97778	0,00034	0,003273
Медиана	8,00000	8,06654	-0,08980	0,25208	-0,11683	0,108970	6,22061	-0,09349	0,001163

Рис. 5. Результати аналізу залишків ударної в'язкості епоксикомпозитів

Підсумовуючи вище сказане можна стверджувати, що вплив магнітної обробки при зшиванні епоксикомпозитів дозволяє підвищити значення ударної в'язкості при оптимальній концентрації дисперсного феромагнітного наповнювача  $q = 25 \dots 35$  мас.ч., та частоті ЗМП  $\nu = 100 \dots 200$  кГц.

**Висновки.** Вплив обробки змінним магнітним полем епоксидних композицій в процесі зшивання на значення ударної в'язкості носить позитивний характер. Зміцнюючого ефекту досягали при оптимальних значеннях вмісту фериту ( $q = 25 \dots 35$  мас.ч. та частоти магнітного поля  $100 \dots 200$  кГц). При більших значеннях вказаних параметрів збільшується нагрів композиції, що призводить до погіршення умов зшивання. При менших значеннях досліджуваних факторів обробка змінним магнітним полем не суттєво впливає на фізико-механічні властивості через низьке значення степені орієнтації компонентів композиції у процесі формування матеріалу. В подальшому планується дослідити вплив обробки змінним магнітним полем на інші фізико-механічні характеристики епоксикомпозитів.

1. Стухляк П.Д. Дослідження механізму впливу технології формування на властивості епоксидних композитів / Стухляк П.Д., Букетов В.А., Левицький В.В. // Вісник ТДТУ. — Тернопіль. — 2004. — №2. — С. 9-17.
2. Молчанов Ю. М. Структурные изменения полимерных материалов в магнитном поле / Ю. М. Молчанов, Э. Р. Кисис, Ю. П. Родин // Механика полимеров. — 1973. — № 4. — С. 737-761.
3. Шут М. І. Фізико-механічні властивості епоксидних полімерів, затверджених у постійному магнітному полі / М. І. Шут, Н. М. Зазимко, Т. Г. Січкара // Збірник праць 2-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Композиційні матеріали». — К.: НТУУ «КПІ». — 2001. — С. 131.
4. Тугов И.И. Химия и физика полимеров / И.И. Тугов, Г.И. Кострыкина. — М.: Химия, 1989. — 224 с.
5. Вонсовский С.В. Магнетизм / Вонсовский С.В. — М.: Наука, 1984. — 214 с.
6. Вундерлих Б. Физика макромолекул / Вундерлих Б. — М.: Мир, 1978. — 214 с.
7. Малежик П. М. Вплив магнітного поля на оптико-механічні властивості епоксидно-амінних полімерів / П. М. Малежик, М. І. Шут, Т. Г. Січкара, М. О. Рокицький // Полімерний журнал. — 2012. — Т. 34, № 2. — С. 161-167.
8. Зазимко Н. М. Вплив постійного магнітного поля на особливості тверднення епоксидних полімерів / Н. М. Зазимко, М. І. Шут, Т. Г. Січкара, П. М. Малежик // Фізика конденсованих високомолекулярних систем: Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. — Рівне, 2007. — Вип. 12. — С. 86-89.
9. Липатов Ю.С. Исследование молекулярных движений в системе эпоксидная смола-пластификатор / Липатов Ю.С., Фабуляк Ф.Г., Овченникова Г.П. // Механика полимеров. — 1973. — № 2. — С. 374.

10. Пат. 62717 Україна, МПК В 03 В 13/04. Пристрій для обробки полімерних композицій змінним магнітним полем / Стухляк П.Д., Карташов В.В, Андрієвський В.В.; заявник та патентовласник Тернопільський нац. техн. універс. – № u 2011 01904; заявл. 18.02.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17.
11. Стухляк П. Дослідження адгезійної міцності та залишкових напружень епоксикомпозитних матеріалів від обробки змінним магнітним полем низької частоти / П. Стухляк, В. Карташов // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Том 16. № 1. – С. 50-56.
12. Привалко В.П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В.П. Привалко. – Л. : Химия, 1986. – 314 с.
13. Манько Т. А. Структурные исследования эпоксидных полимеров, отвержденных в постоянном магнитном поле / Т. А. Манько, А. Н. Кваша, А. В. Соловьев и др. // Механика композитных материалов. – 1984. – № 4. – С. 589-592.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2014.

УДК 624.012.25:539.431

**Д.Я. Кислюк***Луцький національний технічний університет***ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО НАПРУЖЕННЯ ЗАТЯЖКИ НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ ЗУСИЛЬ В ДВОХШАРНІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКАХ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

*Наведено методику розрахунку двошарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях. Наведені результати дослідження роботи арок при різних режимах одноразового та малоциклового навантаження з натягом затяжки.*

*Ключові слова:* залізобетон, двошарнірна арка, попереднє напруження, напружено-деформований стан, несуча здатність.

*Рис. 5. Табл. 2. Форм. 4. Літ. 8.*

**Д.Я. Кислюк****ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫДУЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ЗАТЯЖКИ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ДВУХШАРНИРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРКАХ ПРИ ПОВТОРНЫХ НАГРУЗКАХ**

*Приведена методика расчета двухшарнирных железобетонных арок с учетом перераспределения усилий при повторных нагрузках. Приведены результаты исследования работы арок при разных режимах одноразовой и малоциклового нагрузки с натягом затяжки.*

*Ключевые слова:* железобетон, двухшарнирная арка, предварительное напряжение, напряженно-деформированное состояние, несущая способность.

**D.Ya. Kyslyuk****INFLUENCE OF PRE-STRESSING TIGHTENING THE TWO-HINGED REINFORCED ARCHES AT THE REPEATED LOADINGS**

*Concrete arches are widely used in the construction of various buildings. There are fixed arches, two-hinged arches, and three-hinged arches. The horizontal arch thrust is perceived with the tie, but also it can be transmitted on the other constructions such as frames and foundations. Arches which are used in industrial and civil building coverings and also in structures can be subjected to repeated loadings and sometimes to over-loadings which significantly influence on stress-deformation state of the arch sections and ties. There can be the redistribution of efforts between the upper zone arch and tie in two-hinged arches and it affects its hardness and strength. The influence of repeated loadings and possible redistribution of efforts in the arches calculations are not considered as current regulations. And the methodology of arches calculation with redistribution of efforts between the upper zone arch and tie is not developed yet.*

*The method of calculation the hinge two reinforced-concrete archs is resulted taking into account the redistribution of efforts at the repeated loadings. The of results of research of work of archs are at the different modes of the permanent and the repeated loadings stress with prestressing of efforts. There are new experimental data of two-hinged reinforced arches by the action of short-time and repeated loadings which perfected the methods of its calculation. Pre-stressing tightening reduces the maximal bending moment by 30% in the arch sections, which helps to reduce deflection and increase fracture arch.*

*Keywords:* reinforced concrete, tied arch, preliminary tension bearing ability, cycle of loading, stress-deformation state.

**Вступ.** Залізобетонні арки широко використовуються в складі поперечних рам виробничих будівель, в різних спеціальних спорудах. Під час експлуатації арки, як і інші будівельні конструкції можуть піддаватися повторним малоцикловим навантаженням, які можуть впливати на зміну механічних характеристик матеріалів, перерозподіл зусиль між елементами арок тощо [1, 2]. В останні тридцять років дослідженням роботи арок увага не приділялася, а як показали експериментальні дослідження двошарнірних та замкнутих залізобетонних рам, повторні навантаження суттєво впливають на прогини ригелів, ширину розкриття тріщин, внутрішній напружено-деформований стан тощо [3, 4, 5].

З огляду на наведене поставлено задачу експериментально встановити особливості роботи двошарнірних арок при дії на них повторних малоциклових навантажень з регулюванням зусиль і без, та порівняти їх з розрахунковими результатами.

Залізобетонні двошарнірні (статично невизначені) арки розраховують як пружні системи, приймаючи, що бетон і арматура під навантаженням працюють як абсолютно пружні матеріали, а в самих арках у розтягнутих зонах тріщини не утворюються. Розрахунок виконують методом сил (рис. 1):

$$X_1 \cdot \delta_{11} + \Delta_{1F} = 0, \quad (1)$$



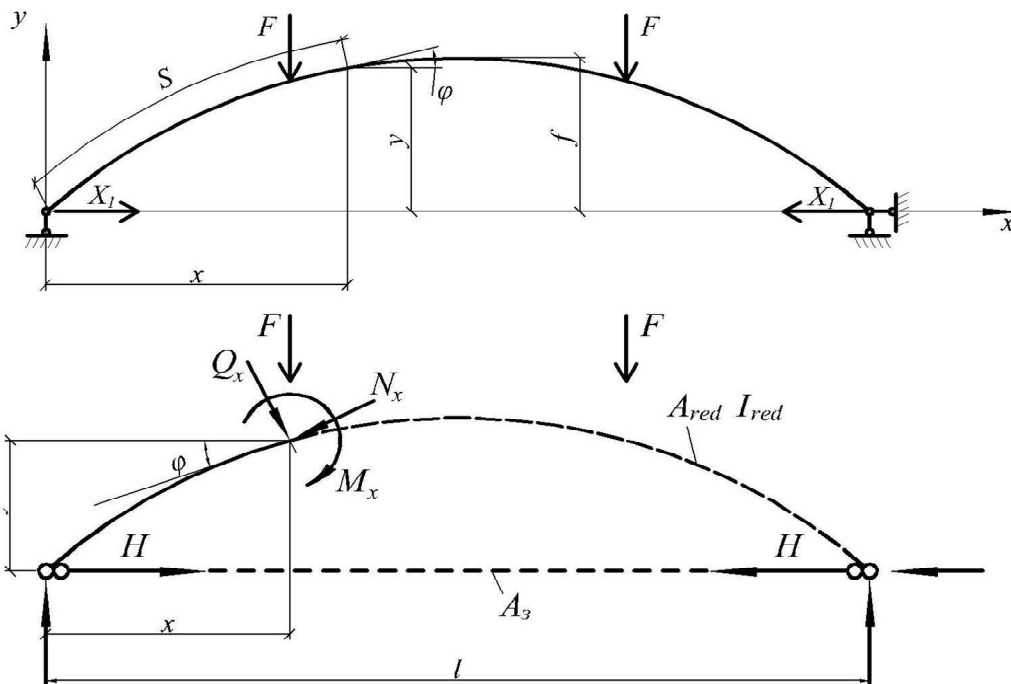


Рис. 1. Розрахункові схеми двохарнірної арки

Розрахунок розпору залізобетонних арок виконується з урахуванням деформацій елементів конструкції та впливу пружного обтискування арки.

$$k = l / \left[ l + \frac{15}{8f^2} \left( \frac{l}{A_{red}} + \frac{E_c I_{red}}{E_3 A_3} \right) \right] < 1. \quad (2)$$

Розпір в затяжці:

$$H = k \cdot X_1. \quad (3)$$

В дійсності бетон і залізобетон не є пружними матеріалами. В залізобетонних конструкціях у міру збільшення навантаження відбувається низка суттєвих змін. До деякої межі конструкції із залізобетону працюють без тріщин. При певному рівні навантаження в бетоні виникають пластичні (непружні) деформації (лінійні), а в розтягнутій зоні виникають і розвиваються тріщини. При наближенні до моменту вичерпання несучої здатності в найбільш напружених ділянках конструкції розвиваються нелінійні деформації бетону, на незначних або суттєвих ділянках порушується зчеплення арматури з бетоном, спостерігається текучість арматури. Всі ці процеси спричиняють перерозподіл зусиль у перерізах конструкцій.

Перерозподіл зусиль в статично невизначених залізобетонних конструкціях враховують на основі методу граничної рівноваги, в якому конструкцію розглядають як складену з окремих жорстких дисків, з'єднаних між собою пластичними шарнірами. Зусилля в арці можна перерозподілити таким чином, щоб отримати найбільший техніко-економічний ефект. З точки зору статичного розрахунку це рівноцінно множенню епюр згинальних моментів від зайвих невідомих на довільний коефіцієнт або додаванню до епюри моментів від зовнішнього навантаження, визначених за пружною роботою арок, додаткових епюр перерозподілу (рис. 2).

В двохарнірних арках перерозподіл зусиль відбувається в перерізах верхнього поясу арки і затяжці. Штучне регулювання зусиль, відбувається шляхом попереднього напруження затяжки, що дає змогу вплинути на перерозподіл зусиль.

Розрахунок зусилля попереднього натягу затяжки:

$$\Delta H = \frac{M_{s1} - M_{s2}}{y_1 + y_2} \quad (4)$$

Внаслідок перерозподілу зусиль максимальні значення згинальних моментів під зосередженими силами та протилежні значення моментів виявились однаковими. Це дає змогу більш економічно використати симетричне армування по всьому перерізу, знизити трудомісткість виготовлення конструкцій, покращити якість конструкцій.

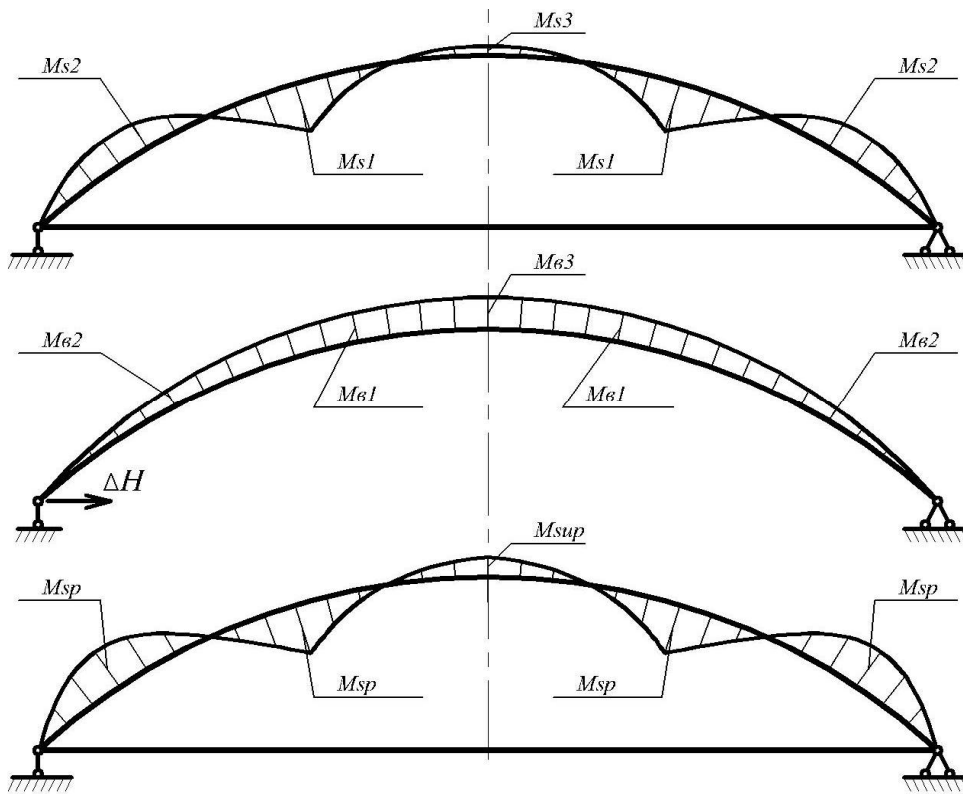


Рис. 2. Перерозподіл згинальних моментів в перерізах двошарнірної арки

На основі досліджень в будівельній лабораторії ЛуцькогоНТУ дійсної роботи двошарнірної залізобетонної арки із затяжкою при дії повторного навантаження було вирішено детальніше дослідити вплив попереднього натягу затяжки на зусилля які виникають в арці. Було випробувано залізобетонні двошарнірні арки, які мали загальну довжину 2160 мм зі стрілою підйому 40 см та поперечний переріз  $100 \times 140$  мм [6,7].

Робота арок вивчається в гідравлічному пресі, обладнаному спеціальними траверсами. Арки випробовувалися як вільно оперті з розрахунковим прольотом  $l=200$  см. Навантаження прикладувалося у вигляді зосереджених сил на відстані 40 см від осі симетрії арки через траверсу гідравлічним пресом (рис. 3) [6,7].

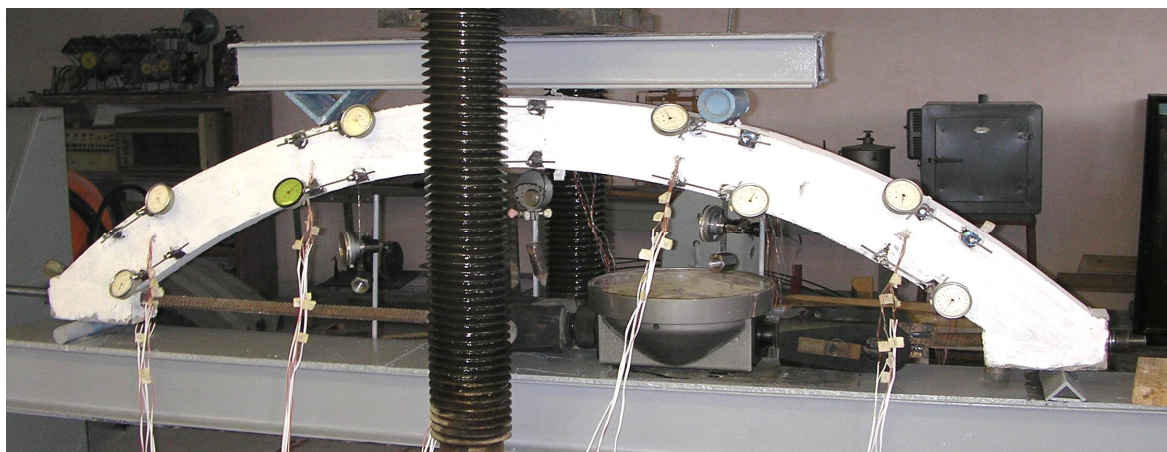


Рис. 3. Схема випробування арки

**Результати експериментальних досліджень.** Арка 2А-1 випробовувалась одноразовим монотонним навантаженням до руйнування, яке відбулося внаслідок роздроблення бетону на ділянці прикладання навантаження, рівного склала  $F_u = 106,5$  кН. Арка 2А-2 також випробовувалась одноразовим навантаженням до руйнування, однак на відміну від першої в роботу арки включали попереднє напруження затяжки. Значення додаткового зусилля визначали

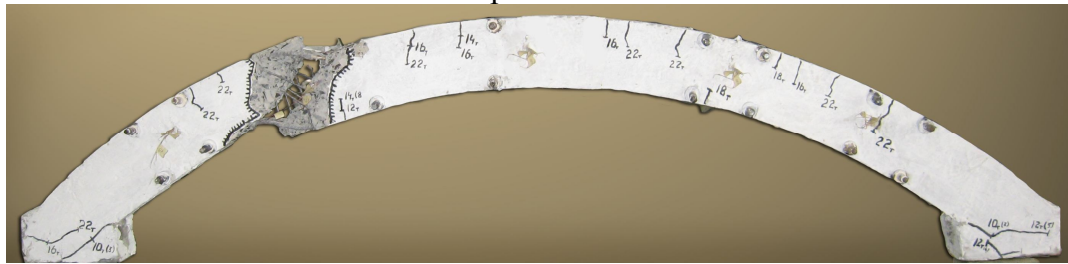
за допомогою розрахунку із врахуванням перерозподілу зусиль, яке становило  $\Delta H = 8$  кН. Руйнівне навантаження в арці 2А-2 склало  $F_u = 98,0$  кН. Арки 2А-3 і 2А-4 піддавали десятикратному мало цикловому навантаженню, також з попереднім напруженням затяжки. Для арки 2А-3 руйнівне навантаження склало  $F_u = 100,8$  кН, а для арки 2А-4 –  $F_u = 109,5$  кН. Арки руйнувалися в зоні дії максимального згинального моменту внаслідок роздроблення та зрізу стиснутого бетону (рис. 4) [7].



Арка 2А-1



Арка 2А-2



Арка 2А-4

**Рис. 4. Характер руйнування арок другої серії**

За допомогою розрахунку в ПК ЛИРА ставиться за мету змодельовати роботу двохарнірних залізобетонних арок та визначити числові значення зусиль, що виникають у перерізах арки та порівняти з результати дійсної роботи арок. Моделювання арки проводимо виходячи з дійсних характеристик матеріалів, в розрахунках враховуються закони нелінійного деформування матеріалів, а навантаження та результати обчислень відповідають кожному ступеню навантаження експериментального дослідження [8].

Для відтворення напружено-деформівного стану арок 2А-2, 2А-3, 2А-4, які випробовувались з попереднім напруженням затяжки, натяг задавали шляхом переміщення правого торця затяжки на шарнірно рухомій опорі. Попередній натяг затяжки складав  $\Delta H = 8,0$  кН, для співставлення результатів додатково розраховуємо  $\Delta H = 4,0$  кН та  $\Delta H = 12,0$  кН. В таблицях представлено результати розрахунків при монотонному та після дії повторних навантажень.

З отриманих результатів видно, що максимальний згинальний момент, при попередньому напруженні затяжки на 4кН зменшився на 6,1 %, при 8кН на 16,8 %, і при 12 кН на 31,3 % після врахування дії повторних навантажень. Аналізуючи результати обчислень, можна виділити, що зменшуються прогини арки, відбувається зменшення розтягнутої зони, але збільшується значення поздовжньої сили  $N$ . За рахунок попереднього натягу зменшилось значення згинальних моментів  $M$ , а дія повторних навантажень зменшила поздовжню силу  $N$ , що збігається з експериментальними даними (див. табл. 2).

Таблиця 1. Деформації змодельованої арки

№ n/n	$\Delta H$ кН	H кН	$\Delta_0$ мм	$\Delta$ мм		$f_0$ мм	f мм	
				1	2		1	2
1	0,0	142,6	0,0	4,58	5,79	0,0	5,31	6,49
2	4,0	146,6	-1,45	3,17	4,39	-1,42	3,5	5,15
3	8,0	150,6	-3,64	1,12	2,34	-3,65	2,16	3,29
4	12,0	154,6	-6,34	1,41	0,16	-6,44	0,49	1,54

Таблиця 2. Значення зусиль

№ n/n	$\Delta H$ кН	$M_0$ кНм	$N_0$ кН	$Q_0$ кН	M кНм		N кН		Q кН	
					1	2	1	2	1	2
1	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	11,2	-164,0	-166	-51,8	-51,8
2	4,0	-1,3	-3,8	1,2	9,13	10,52	-170,1	-166,2	-50,65	-51,87
3	8,0	-2,7	-7,6	2,4	7,77	9,31	-173,9	-169,4	-49,44	-50,28
4	12,0	-4,1	-11,0	3,6	6,4	7,69	-177,7	-175,0	-48,22	-49,37

За отриманими результатами експерименту та результатами розрахунку в ПК ЛИРА 9.4 було побудовано діаграми напруження стиснутої зони перерізів арки (рис. 5).

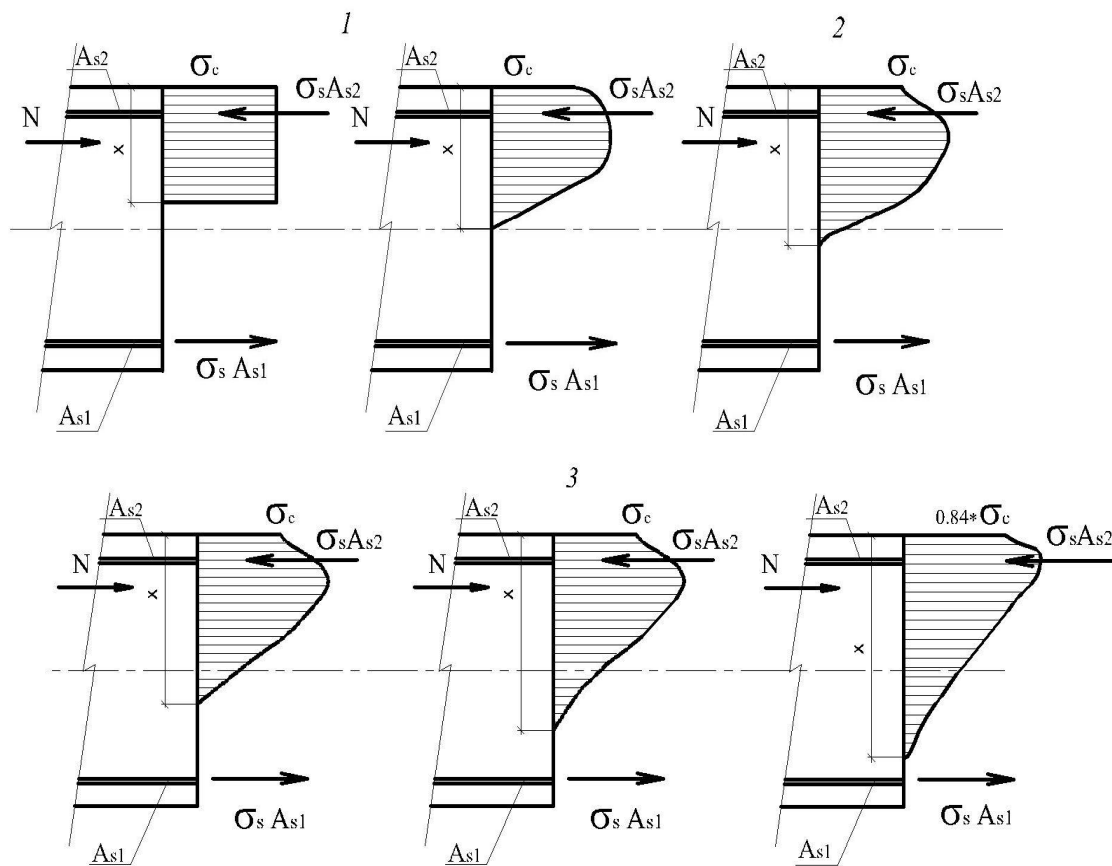


Рис. 5. Діаграми напружень стиснутої зони перерізів арки: 1 – СНиП 2.03.01-84 та ДБН В.2.6-98; 2 – без попереднього напруження; 3 – з попереднім натягом 4, 8, 12 кН

З отриманих результатів видно, що в різних випадках різна висота стиснутої зони. За СНиП 2.03.01-84  $x = 64$  мм та ДБН В.2.6-98  $x = 72$  мм за розрахунком ПК ЛИРА без попереднього напруження  $x = 80$  мм, за розрахунком ПК ЛИРА з попереднім натягом 4 кН.  $x = 85$  мм, 8 кН.  $x = 99$  мм, 12 кН.  $x = 118$  мм та при 4 кН.  $x = 80$  мм, 8 кН.  $x = 90$  мм, 12 кН.  $x = 103$  мм після повторних навантажень. В експериментальних арках другої серії з попереднім натягом затяжки 8 кН висота стиснутої зони  $x = 103$  мм в арці 2А-2 та  $x = 95$  мм після повторних навантажень в

арках 2А-3 і 2А-4. Крива напружень, побудована за СНиП 2.03.01-84, є прямокутною, вона не враховує зміни напружень по висоті стиснутої зони, при  $f_{cm} \approx \sigma_c$ . Зона розтягу в місці дії максимального згинального моменту при напруженні зтяжки на 4, 8, 12 кН відповідно зменшується на 20,5%; 44%; 70%. Після дії повторних навантажень розтягнута зона збільшується, але менша від початкового стану на 5,7%, 29% та 58%. Для арок з попереднім напруженням висота стиснутої зони  $x$  збільшується, а  $\sigma_c$  частково зменшується, але після повторних навантажень відповідає розрахунковому значенню.

Результати, отримані в ПК ЛИРА показали, що найбільш раціональне значення попереднього натягу зтяжки розраховане на основі сформульованих умов граничної рівноваги. За рахунок попереднього натягу зменшилось значення згинальних моментів  $M$ , а дія повторних навантажень зменшила поздовжню силу  $N$ , що збігається з експериментальними даними.

**Висновок.** Попереднє напруження зтяжки впливає на напружено-деформований стан в нормальному перерізі арки, зменшуються напруження стиснутого бетону, але збільшується його висота, та величина поздовжньої сили. Для раціонального знаходження значення попереднього напруження зтяжки можна використовувати метод граничної рівноваги, а для визначення напружено-деформованого стану, міцності та руйнівних навантажень в двохшарнірних арках числові методи скінченних елементів з використанням ПК ЛИРА.

1. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок / Барашиков А.Я. / Киев: Будівельник, 1977. – 156 с.
2. Бабич Є.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень / Бабич Є.М., Крусь Ю.О. / : Монографія. - Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999. – 119 с.
3. Бабич Є.М. Вплив повторних навантажень на роботу замкнутих залізобетонних рам / Бабич Є.М., Філіпчук С.В. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр, 2007. – Випуск 7. – С. 167-172.
4. Ільчук Н.І. Особливості роботи П-подібних залізобетонних рам при короткочасних малоциклових навантаженнях: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01.- Луцьк, 2007. – 229 с.
5. Бабич Є.М. Опір залізобетонних рам повторним навантаженням / Бабич Є.М., Ільчук Н.І. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр, 2005. – Випуск 6. – С. 234-242.
6. Кислюк Д.Я. „Дослідження прогинів двохшарнірних залізобетонних арок з регулюванням зусиль в зтяжці при дії повторних навантажень” // Кислюк Д.Я. / Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди Збірник наукових праць Випуск 18 - Рівне : НУВГП, 2009р. – С. 215-220.
7. Кислюк Д.Я. „Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при повторному навантаженні з попереднім напруженням зтяжки” / Кислюк Д.Я. / Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник Випуск №33 – Київ: КНУБА, 2009. – С. 186-194.
8. Кислюк Д.Я. „Порівняння дійсної роботи двохшарнірних з/б арок з теоретичними значеннями та нелінійним розрахунком в ПК Ліра 9.0”. // Кислюк Д.Я. / Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди Збірник наукових праць Випуск 19 – Рівне: НУВГП, 2009 р. – С. 171-177.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

УДК 621.762.4; 621.762.5

**О.Г. Кіркова, М.Б. Штерн***Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича***ВИЗНАЧЕННЯ ПЛАСТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПОРИСТИХ СЕРЕДОВИЩ  
МЕТОДОМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

*Запропоновано методику побудови поверхні текучості стисливого мікронеоднорідного матеріалу, що містить нестисливу тверду фазу і сферичні пори. Використовуючи метод прямого комп'ютерного моделювання на елементарній комірці, сформульовано умову переходу пористого матеріалу в цілому до пластичного стану. Встановлено залежність вмісту пластичної зони та вмісту пор від схеми навантаження.*

*Ключові слова:* поверхня текучості, пластичний потенціал, метод прямого комп'ютерного моделювання, пористі матеріали

*Рис. 6. Літ. 21.***Е.Г. Киркова, М.Б. Штерн****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОРИСТЫХ СРЕД  
МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

*Предложена методика построения поверхности течения сжимаемого микронеоднородного материала, содержащего несжимаемую твердую фазу и сферические поры. Используя метод прямого компьютерного моделирования на элементарной ячейке, сформулировано условие перехода пористого материала в целом в пластическое состояние. Установлена зависимость содержания пластической зоны и содержания пор от схемы нагружения.*

*Ключевые слова:* поверхность течения, пластический потенциал, метод прямого компьютерного моделирования, пористые материалы.

**O.G. Kirkova, M.B. Shtern****DETERMINATION OF PLASTIC POTENTIAL OF POROUS MEDIA USING  
COMPUTATIONAL EXPERIMENT**

*The computational procedure of a yield surface construction of compressible microheterogeneous material with incompressible solid phase and spherical pores is proposed. Using the direct simulation method on a unit cell the condition of porous material transition into macroscopic plasticity state is formulated. The dependence of the plastic zone and the pores content on the loading condition is established.*

*Keywords:* yield surface, plastic potential, direct simulation method, porous materials.

Для адекватного опису пластичної поведінки пористих середовищ потрібні моделі, які враховують реальну структуру матеріалу та особливості різних технологічних процесів. Як правило, побудова такої моделі базується на експериментальному або теоретичному підходах. Експериментальний спосіб визначення поверхні текучості пористого матеріалу ґрунтується на використанні результатів трьохвісних навантажень і описаний в роботах [1-3]. Але проведення експериментів для кожного з можливих випадків мікроструктури та способу навантаження потребує матеріальних витрат і може викликати значні труднощі. Тому для побудови моделей текучості поряд із експериментальними інтенсивно розвиваються і теоретичні підходи, які опираються на методи мікромеханіки [4-8] і дозволяють з більшою чи меншою точністю описати структуру матеріалу.

Так, добре відома модель Герсона [7], яка описує поведінку пористих пластичних матеріалів. Вона виведена аналітично із використанням елементарної комірки у вигляді циліндру з центральною циліндричною порою. Однак, ця модель не враховує взаємодію пор та обмежена малою пористістю. Тому більш широкого використання набула вдосконалена модель Герсона-Твергарда-Нідлмана (ГТН) [9], яка краще відображає структуру пористого матеріалу завдяки можливості підбору вхідних коефіцієнтів. В літературі описано також інші моделі, отримані в аналітичному вигляді на базі мікромеханічного підходу [8, 10, 11]. В роботі [12] запропоновано феноменологічну модель пластичності пористих та гранульованих середовищ.

Не зважаючи на досить розвинуту теорію пластичності пористих матеріалів, проблема врахування реальної структури і вибору матеріальних параметрів, які б адекватно цю структуру відображали, і до цього часу залишається актуальною [13]. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є побудова поверхні текучості за допомогою прямого комп'ютерного моделювання на елементарній комірці. Це дозволяє уникнути неминучих спрощень та обмежень, властивих аналітичному способу виведення моделей пластичності, і дослідити вплив різної структури та

пористості на границю текучості матеріалу. Так, в роботах [5, 6] визначався вплив структурної моделі пористого матеріалу на його поверхню текучості для елементарних комірок у формі порожнистого шару та циліндру зі сферичною порою. Відома ціла низка нещодавніх робіт, присвячених побудові поверхні текучості за допомогою моделювання на елементарній комірці [13 – 16]. Наприклад, у [13] проводилося порівняння двох різних структур пористого тіла, перша з яких отримана технологією вільного спікання, а друга – шляхом холодного пресування або спікання під дією електричного поля. Результати чисельного моделювання показали, що границя текучості пористого тіла чутлива до внутрішньої структури, а отже, модель пластичності пористого середовища повинна включати в себе параметри мікроструктури. Також у [13, 14] отримані контури текучості порівнювались із ГТН-моделлю, причому у [13] було виявлено адекватність ГТН-моделі за умови вибору відповідних коефіцієнтів, а у [14] з метою розширення границь її застосування для довільної пористості пропонувалось введення додаткового параметру. В [15] розглядалась напіваналітична модель текучості пористого середовища із можливістю флуктуацій локальної пористості, а мікроструктура описувалась узагальненим сімейством порожнистих сфер типу Хашина. Трьохвимірні кубічні комірочки з однією порою пропонувались у [16] для дослідження границі текучості пористого тіла під час циклічного навантаження. В роботі [17] моделювання на елементарній комірці використовувалось для верифікації модельних параметрів, хоча сама функція текучості пористих монокристалів побудована на основі варіаційного підходу.

Серед методів побудови поверхні текучості також відомий метод дискретних елементів [18]. Він дозволяє наочно моделювати процес пресування порошків, але характеризується громіздкістю обчислювального процесу. У [18] форма контуру текучості не є еліптичною, як, наприклад, у роботах [13, 14].

В деяких роботах враховувався вплив третього інваріанту на поверхню текучості пористого тіла [15, 19-21], але це питання виходить за межі даного дослідження.

Для побудови поверхні текучості пористих середовищ необхідно правильно встановити момент, коли відбувається перехід пористого матеріалу від пружного до пластичного стану. Метод прямого комп'ютерного моделювання, що пропонується в даній роботі, дозволяє безпосередньо виявити момент пружно-пластичного переходу пористих тіл. Крім того, окрему увагу приділено дослідженню розповсюдження пластичної зони всередині комірки для різних схем деформування.

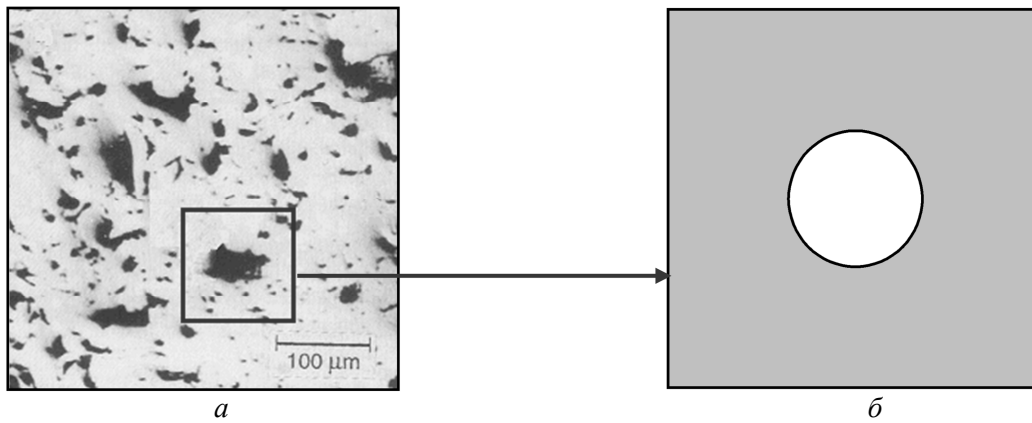
Таким чином, дослідження даної роботи зосереджено на побудові поверхні текучості за допомогою прямого комп'ютерного моделювання на елементарній комірці і вибору критерію розповсюдження пластичності від мікро- до макрорівня. Під критерієм мається на увазі встановлення такого моменту пластичної течії всередині комірки, який вважається границею текучості пористого тіла в цілому.

Основна ідея методу, що пропонується, базується на моделюванні процесу утворення та розповсюдження пластичної зони в межах елементарної комірки. Геометрія пластичної зони визначається за допомогою методу скінчених елементів у сполученні із процедурою покрокового навантаження.

Доцільно нагадати, що контуром текучості є переріз поверхні текучості певною площиною, яка містить гідростатичну вісь. В свою чергу, поверхня текучості визначається як геометричне місце точок у просторі напружень, досягнення яких обумовлює пластичну течію. Саме досягнення відповідних точок асоціюється із процедурою пропорційного (променевого) навантаження або деформування. Самі точки ототожнюються із границею текучості для даного шляху навантаження або деформування.

Далі припускається, що пористе тіло в цілому може бути представлене як сукупність елементарних комірок, геометрія яких припускає можливість покриття ними усієї площини. Кожна з комірок містить порожнину у вигляді пори, що має форму кола. Певним виправданням вибору саме такої форми комірки є та обставина, що реальна пориста структура, яка відповідає стану пресовки, спеченої після пресування, містить пори різної форми та різної орієнтації, зображені на рис. 1





*a* – шліф пористого матеріалу; *б* – репрезентативна комірка  
 Рис. 1. Елементарна комірка пористого матеріалу

Проекція «середньостатистичної» пори, згідно даних рис. 1, може бути подана і далі розглядатися у вигляді кола. Кожній комірни присується певне значення пористості, під якою далі розуміємо відношення площини пори до площини комірки.

Стосовно системи комірок формулюється принцип еквівалентної гомогенності, згідно з яким до розгляду приймаються два головні види напружень, що діють в цій системі – макроскопічні для тіла в цілому і мікроскопічні для комірки. При цьому в межах комірки припускається, що макроскопічні напруження, деформації та швидкості деформацій однорідні. Натомість мікроскопічні напруження, деформації та швидкості деформацій не є однорідними. Їх розподіл в об'ємі комірки залежить як від величини пористості так і вигляду макроскопічного напруженого або деформованого стану на границях комірки.

Далі розглядаються променеві навантаження або деформування. Саме співвідношення між різними компонентами тензорів напружень та деформацій або швидкостей деформацій і визначає характер навантаження або деформування. Припускається, що макроскопічні тензори напруження та деформації в системі координат, головні осі якої перпендикулярні до сторін комірки на рис. 1, мають вигляд

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & & \\ & \sigma_{22} & \\ & & \sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & & \\ & \varepsilon_{22} & \\ & & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}.$$

Поза діагоналями тензорів всі компоненти дорівнюють нулю.

Далі розглядаються ізотропні матеріали. Тому замість компонент відповідних тензорів в аналізі, що виконується в даній статті, фігурують їх інваріанти. Припускається, що впливом третіх інваріантів можна нехтувати. Тому особливу роль у подальшому розгляді відіграватимуть перший

інваріант тензору напружень  $p = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$ , другий інваріант його девіатора

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{22})^2},$$

а також швидкість зміни об'єму

$$e = \left( \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33} \right)$$

та інтенсивність швидкостей деформацій

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_{11} - \dot{\varepsilon}_{22})^2 + (\dot{\varepsilon}_{11} - \dot{\varepsilon}_{33})^2 + (\dot{\varepsilon}_{33} - \dot{\varepsilon}_{22})^2}.$$

В тому випадку коли виконується принцип нормальності, чотири згадані вище параметри можуть бути геометрично інтерпретовані так, як це показано на рис. 2.



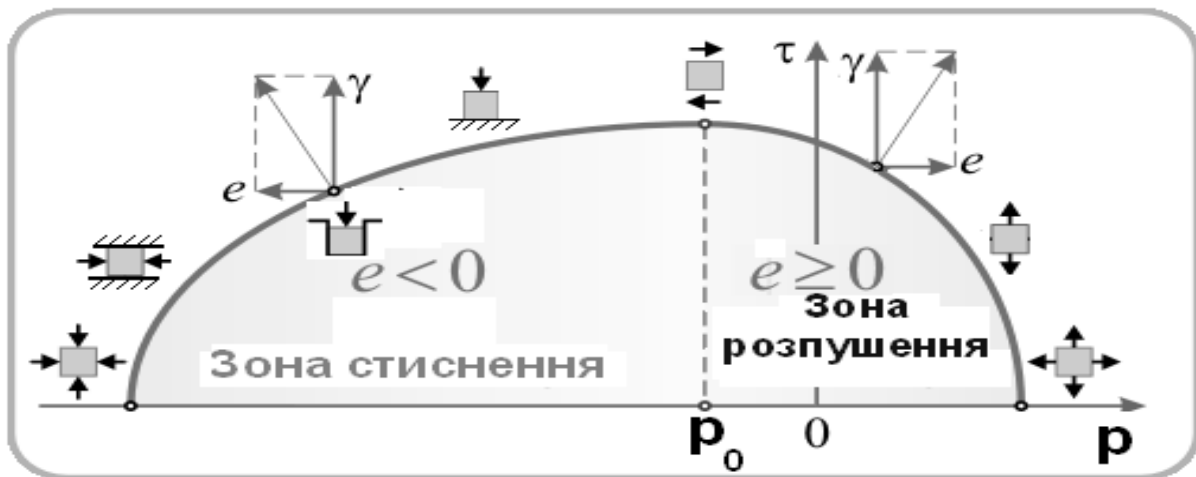


Рис. 2. Геометричне тлумачення контуру навантажень та інваріантів тензорів напружень та швидкостей деформацій

Зауважимо, що рисунок 2 містить також безпосередньо і ескіз контуру текучості, поділений на дві частини. Зліва зображена його частина, де має місце стиснення, а справа – зона розпушення.

Уданій роботі визначається форма контуру текучості для умов деформування, коли має місце стиснення. Тобто розглядаються такі схеми навантаження та деформування, за умов дії яких пористий матеріал ущільнюється.

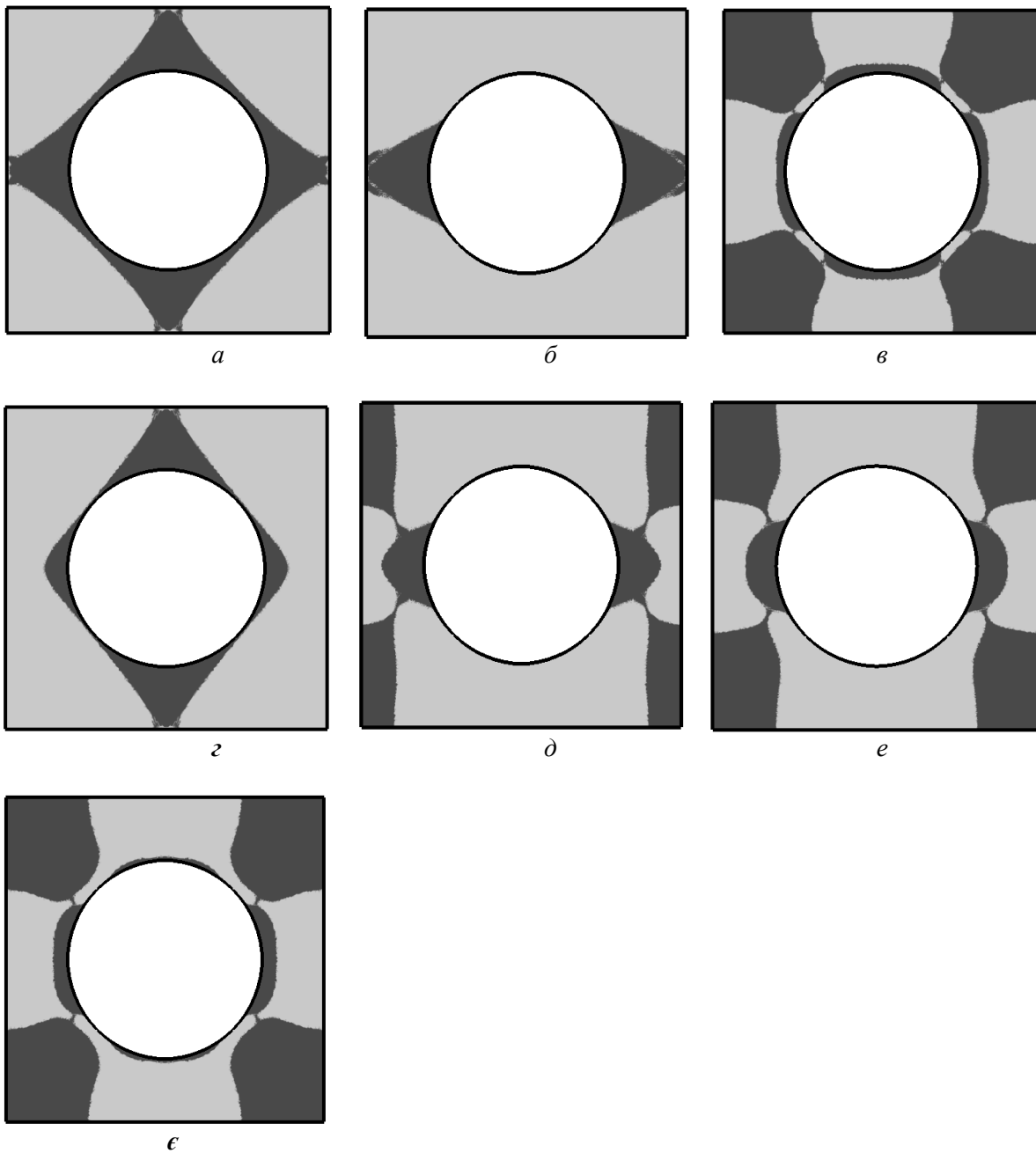
Припускалося, що матеріал матриці пористого тіла є пружно – пластичним, а тензори напружень та швидкостей деформацій пов'язані між собою співвідношенням Прандтля – Рейса. Використовувався метод покрокового деформування, суміщений з методом кінцевих елементів в межах кожного кроку. Основна увага приділялась визначенню розподілу гідростатичної та девіаторної складових тензору напружень в межах комірки та на її границях. Припускалось, що навантаження не супроводжується спотворенням форми комірки в тому розумінні, що її границі залишаються паралельними в усі моменти деформування.

Деформування комірки проводили за променевими траєкторіями. Припускалось, що дотичні до вертикальної та горизонтальної границь складові вектору переміщення відсутні. Використовувалися траєкторії деформування, які забезпечували пропорційність переміщення границь комірки, зображеної на рис. 1 у вертикальному та горизонтальному напрямках. Покладалось, що для кожної траєкторії деформування виконується умова  $u_y = \kappa u_x$ , де  $u_y$  та  $u_x$  – компоненти вектору переміщень у вертикальному і горизонтальному напрямках відповідно. Змінюючи коефіцієнт  $\kappa$ , можна імітувати будь-яку схему деформування. Зокрема, рівність  $u_y = u_x$  відповідає всебічному стисненню,  $u_y = -u_x$  - чистому зсуву,  $u_x = 0$  - стисненню у прес – формі.

На початку деформування матриця поводить себе як пружне тіло. Але в ході деформування в певних областях виникали ділянки, де спостерігаються пластичні деформації. Поступово вони утворюють пластичну зону і, таким чином, між пластичною та пружною зонами утворюється границя.

Саме еволюція цієї границі і була одним з центральних об'єктів пошуку.

На рис. 3 наведені результати обчислень у вигляді зон пружної деформації – світло-сірий колір та пластичної деформації – темно-сірий колір, а також границі між ними за умови, що пористість комірки дорівнює 0,3. Аналогічні за формою конфігурації зон було отримано і для значень пористості 0,2 та 0,1. Рисунки 3 відображають момент утворення неперервної пластичної зони всередині комірки.

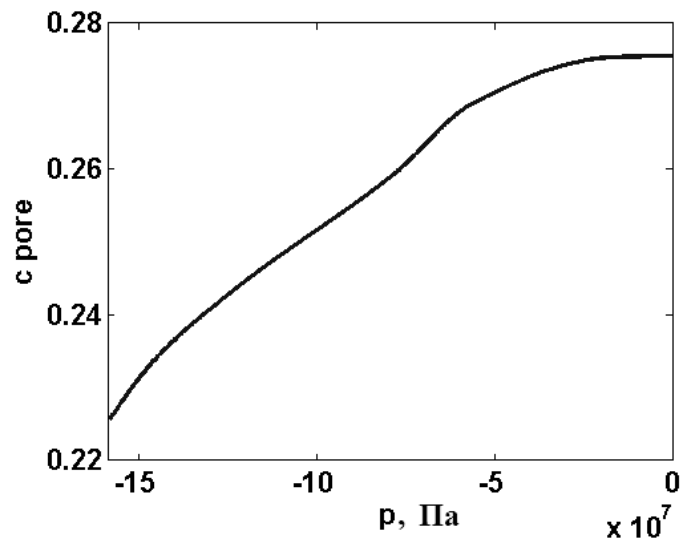


$a - u_y = u_x; b - u_x = 0; в - u_y = -u_x; г - u_y = 1/2u_x; д - u_x = -1/2u_y; e - u_x = -2/3u_y; e - u_x = -9/10u_y$

**Рис. 3. Пружні та пластичні зони в комірці за різних умов її деформування; пористість комірки приймалася рівною 0,3**

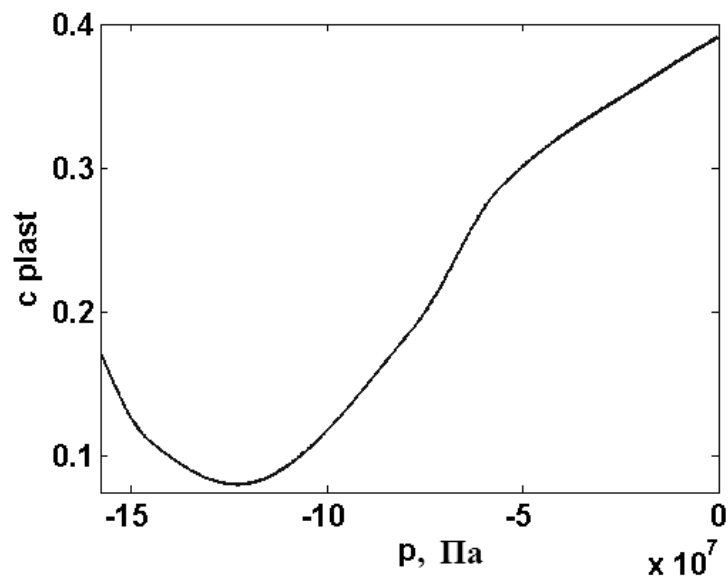
Об'єм пори також змінюється в залежності від обраної схеми деформування (рис. 4).

При цьому найменша пористість спостерігається у випадку всебічного стиснення, а найбільша – під час чистого зсуву, коли, взагалі кажучи, за відсутності дилатансії зміна об'єму не відбувається (у нашому випадку невелика зміна об'єму пов'язана із чисельною похибкою). В цілому із зростанням середнього тиску спостерігається монотонне зменшення пористості (рис. 4).



**Рис. 4. Залежність вмісту пористості від середнього тиску, визначена шляхом обчислень на елементарній комірці пористого тіла у момент утворення нескінченного пластичного кластеру**

Навпаки, залежність вмісту пластичної зони від середнього тиску в елементарній комірці (а отже, і у пористому тілі) носить немонотонний характер (рис. 5). Причому мінімальне значення вмісту пластичної зони досягається для випадку стиснення у прес-формі (рис. 3б).



**Рис. 5. Залежність вмісту пластичної зони від середнього тиску, визначена шляхом обчислень на елементарній комірці пористого тіла у момент утворення нескінченного пластичного кластеру**

Слід зазначити, що характер розташування отриманих зон у випадку всебічного стиснення не відповідає уявленню про радіально-симетричне навантаження. Цей парадокс пов'язаний із вибором сітки кінцевих елементів, а також з тим, що граничне значення нормальної компоненти вектору переміщення для даного шляху деформування має бути незалежним від полярного кута. У цьому випадку зона пластичності уявлятиме собою коло, що має бути строго концентричним до форми отвору. В цьому ж випадку за визначенням будемо мати такі значення інваріантів:  $p = \sigma_s \ln(\theta)$ ,  $\tau = 0$ .

На підставі отриманих результатів формулювалася умова переходу пористого матеріалу в цілому до пластичного стану. В механіці суцільного середовища віддають перевагу умовам, де фігурують комбінації компонентів тензору напружень (умови Мізеса та Треска для нестисливих

матеріалів, умови Шими та Гersona для стисливих). На відміну від них в даній роботі за умову переходу матеріалу до пластичного стану приймали момент утворення неперервної пластичної зони в межах комірки, що асоціюється з формуванням нескінченного пластичного кластеру у макроскопічному тілі в цілому. Неперервна пластична зона може утворюватись або всередині комірки – для схем деформування, що наближаються до чистого зсуву (тонкі перешийки на рис. 3в, 3д–3е)), або під час дотику до її границі – для інших схем деформування (рис. 3а, 3б, 3г).

Момент утворення неперервної пластичної зони фіксували і для цього моменту обраховували компоненти тензору напружень на границі комірки, які далі осереднювали по границі, ототожнюючи їх з тими, що відповідають макроскопічному стану. Для осередненого значення тензору напружень обраховували його перший інваріант та другий інваріант його девіатору. Виконуючи описану процедуру для кожного з можливих шляхів деформування, визначали множину пар інваріантів, яким відповідає перехід комірки, а значить і пористого тіла в цілому у пластичний стан.

Саме в такий спосіб і були отримані контури текучості, відображені на рис. 6. Як зазначалося вище, всі розрахунки проводилися за умови, що має місце стиснення. При цьому для схеми всебічного стиснення бралися відомі значення інваріантів  $p = \sigma_s \ln(\theta)$ ,  $\tau = 0$ . Передостанньою точкою контуру текучості, для якої проводили розрахунки на елементарній комірці (перед точкою всебічного стиснення) була точка стиснення у прес-формі.

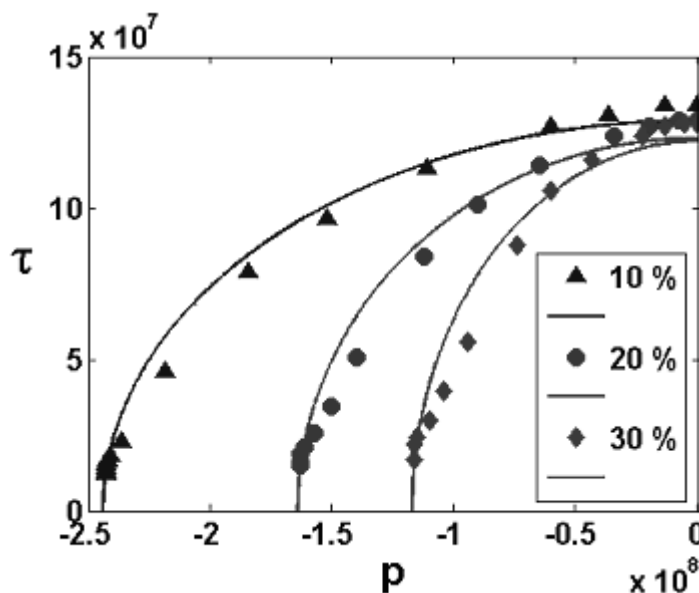


Рис. 6. Контури навантажень стисливого середовища (залізо) для відносної пористості 10 %, 20 % та 30 %

Таким чином, методом прямого комп'ютерного моделювання на елементарній комірці квадратної форми побудовано контур текучості для стисливого мікронеоднорідного матеріалу, що містить нестисливу тверду фазу і сферичні пори. За умову переходу матеріалу до пластичного стану в цілому може бути обраний момент утворення в межах комірки неперервної пластичної зони, що складається з двох областей пластичності – навколо пори та на границі комірки.

Встановлено залежність вмісту пластичної зони та вмісту пор від схеми навантаження. Виявлено, що із наближенням до схеми чистого зсуву пластична зона збільшується, а ущільнення пористого матеріалу зменшується.

1. В.Д. Рудь, В.З. Мидуков. Экспериментальное исследование пластических деформаций пористых тел // Порошковая металлургия. – 1982, № 8. – С. 10-16.
2. J. Kergadallan, G. Puente, P. Doremus and E. Pavier: Proc. Int. Workshop on "Modelling of metal powder forming processes", Grenoble, France, 1997. – P. 277-285.
3. S. Shima, M. Oyane Plasticity theory for porous metal//International Journal of Mech. Sciences. -1976. – V. 18, № 6. – P. 285-291.
4. M. Shtern, A.C.F. Cocks, The structure of constitutive laws for the compaction of metal powders, Recent developments in computer modeling of powder metallurgy processes, IOS Press, 2001. –P. 71-81.
5. В.Т. Головчан, В.И. Куш. Поверхность текучести для однофазной структуры пористого тела // Порошковая металлургия. – 1991. – № 2. – С. 8-12.

6. В.Т. Головчан, В.И. Куш. Влияние структурной модели пористого материала на его поверхность текучести // Порошковая металлургия. – 1991. – № 6. – С. 8-11.
7. A. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media // Journal for Engineering Materials and Technology. – 1977. – V. 99. – P. 2-15.
8. N.A. Fleck, On the cold compaction of powders // J. Mech. Phys. Solids. – V. 43. – 1995. – P. 1409-1431.
9. V. Tvergaard, A. Needleman. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar // Acta Metall. Mater. – V. 32. – 1984. – P. 157-169.
10. R.G. Green. A plasticity theory for porous solids // Int. J. Mech. Sci. – V. 4. – 1972. – P. 109-120.
11. X.M. Yu, W. Cheng, J.P. Chen. A yield criterion for isotropic porous media for the meso-scale range // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – V. 59. – 2012. – P. 57-61.
12. М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др. Феноменологические теории прессования порошков. – Киев: Наук. думка, 1982. – 140 с.
13. V.I. Kushch, Ya.O. Podoba, M.B. Shtern. Effect of micro-structure on yield strength of porous solid: A comparative study of two simple cell models // Computational Materials Science – V. 42. – 2008. – 113-121.
14. F. Fritzen, S. Forest, T. Böhlke, D. Kondo, T. Kanit. Computational homogenization of elasto-plastic porous metals // International Journal of Plasticity. – V. 29. – 2012. – P. 102-119.
15. N. Bilger, F. Auslender, M. Bornert, H. Moulinec, A. Zaoui Bounds and estimates for the effective yield surface of porous media with a uniform or a nonuniform distribution of voids // European Journal of Mechanics - A/Solids. – V. 26. – № 5. – 2007. – P. 810-836.
16. T. Seifert, I. Schmidt Plastic yielding in cyclically loaded porous materials // International Journal of Plasticity. – V. 25. – № 12. – 2009. – P. 2435-2453.
17. X. Han, J. Besson, S. Forest, B. Tanguy, S. Bugat A yield function for single crystals containing voids // International Journal of Solids and Structures. – V. 50. – № 14-15. – 2013. – P. 2115-2131.
18. P. Pizette, C.L. Martin, G. Delette, P. Sornay, F. Sans Compaction of aggregated ceramic powders: From contact laws to fracture and yield surfaces // Powder Technology. – V. 198. – № 2. – 2010. – P. 240-250.
19. М.Б. Штерн, А.П. Майданюк, А. Кокс Влияние третьего инварианта на эффективную реакцию пластических пористых тел. I. Поведение элементарной ячейки пористого материала и обобщенное правило нормальности // Порошковая металлургия. – 2002. – № 5/6. – С. 19-27.
20. М.Б. Штерн, А.П. Майданюк, А. Кокс Влияние третьего инварианта на эффективную реакцию пластических пористых тел. II. Поверхность нагружения пористых тел, свойства которых чувствительны к трехосности напряженного состояния // Порошковая металлургия. – 2002. – № 7/8. – С. 15-23.
21. D.L. Sean McElwain, Anthony P. Roberts, Andy H. Wilkins Yield functions for porous materials with cubic symmetry using different definitions of yield // Advanced Engineering Materials. – V. 8. – № 9. – 2006. – P. 870-876.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2014.

УДК 66.084.6

**Ф.М. Крисак**

ПП «Науково -виробнича фірма Фанком»

**ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ ВПЛИВУ ТОНКИХ ВОДЯНИХ СТРУМЕНІВ ВИСОКОГО ТИСКУ НА ПРОЦЕС МИТТЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ**

*Обґрунтовані геометричні параметри струменевих сопел, проведена оптимізація дії тонких водяних струменів високого тиску на рослину сировину в процесі її миття з мінімальними витратами мийної води і енергії.*

*Ключові слова: тонкий водяний струмінь, сопло, оптимізація струменевих пучків.*

*Рис. 3. Форм. 7. Літ. 3.*

**Ф.Н. Крисак****ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ ТОНКИХ ВОДЯНЫХ СТРУЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС МОЙКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Обоснованы геометрические параметры струйных сопел, проведена оптимизация воздействия водяных струй высокого давления на растительное сырье в процессе мойки с минимальные затраты моечной воды и энергии.

*Ключевые слова: тонкая водяная струя, сопло, оптимизация струйных пучков.*

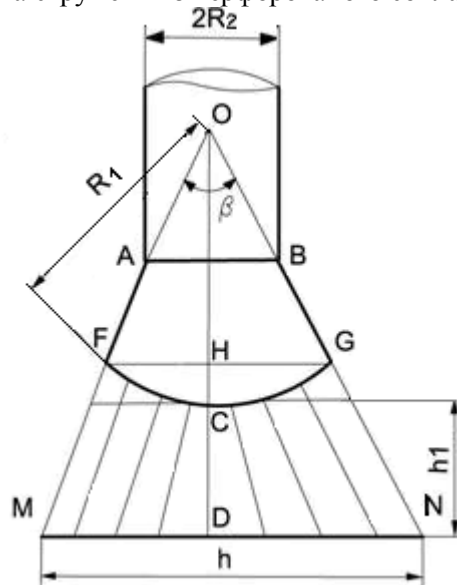
**F.M. Krysak****FEATURES OF RECEIPT AND OPTIMIZATION OF INFLUENCE OF THIN WATERJETS OF HIGH-PRESSURE ARE ON PROCESS OF WASHING OF DIGISTER**

*Reasonable geometrical parameters of stream nozzles, conducted optimization of action of thin waterjets of high-pressure on a digister in the process of her washing with the minimum charges of washing water and energy*

**Постановка проблеми:** з метою застосування тонких водяних струменів високого тиску для миття рослинної сировини з мінімальними витратами мийної води і енергії, необхідні теоретичні обґрунтування геометричних параметрів сопел різної конструкції та оптимізація застосування струменевих пучків.

**Результати дослідження.** В роботах [1, 2] досліджувалась гідродинаміка тонкого водяного струменя, проте відсутні дослідження отримання та оптимізації впливу струменевих пучків тонких водяних струменів високого тиску на процес миття рослинної сировини.

Особливості отримання пучка струменів із перфорованого сопла показано на рис. 1.



**Рис. 1. Параметри струменевого сопла**

$R_1$  – радіус кривизни перфорованої поверхні;  $R_2$  – радіус горловини сопла;  $\beta$  – кут розкриття струменя;  $h$  – ширина транспортеру;  $h_1$  – відстань від перфорованої поверхні до транспортеру.

© Ф.М. Крисак

Струменевий пучок складається з багатьох локальних струменів, які виходять з перфорованого сопла (рис.1). Чим менші діаметр локального струменю і відстань перфорованої поверхні до транспортеру, тим глибша воронка на поверхні забруднення. Сукупність локальних струменів руйнують шар забруднень і змивають його з поверхні коренеплоду.

Кут розкриття струменів дорівнює:

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \frac{h}{2(h_1 + R_1)}.$$

Площа вихідної поверхні сопла (кульовий сегмент) дорівнює:

$$S = \pi(CH^2 + FH^2). \quad (1)$$

З рис.1 знаходимо:

$$CH = R_1 \left( 1 - \cos \frac{\beta}{2} \right) = R_1 \left( 1 - \cos \left( \operatorname{arctg} \frac{h}{2(h_1 + R_1)} \right) \right) = R_1 \left( 1 - \frac{2(h_1 + R_1)}{\sqrt{h^2 + 4(h_1 + R_1)^2}} \right);$$

$$FH = R_1 \sin \frac{\beta}{2} = R_1 \sin \left( \operatorname{arctg} \frac{h}{2(h_1 + R_1)} \right) = \frac{R_1 h}{\sqrt{h^2 + 4(h_1 + R_1)^2}}.$$

За допомогою формули (1) знайдемо:

$$S = \pi R_1^2 \left( 2 - \frac{4(h_1 + R_1)}{\sqrt{h^2 + 4(h_1 + R_1)^2}} \right). \quad (2)$$

Нехай  $h_0$  – товщина приграничного шару води на бокових стінках сопла. Цей шар спирається на кільцеву поверхню, площа якої дорівнює :

$$S_0 = 2\pi F H h_0 = \frac{2\pi R_1 h_0 h}{\sqrt{h^2 + 4(h_1 + R_1)^2}}. \quad (3)$$

Площа, яку необхідно покрити перетинами локальних струменів, використавши формули (2) і (3) становитиме:

$$S_1 = S - S_0 = 2\pi R_1 \left( R_1 - \frac{2R_1(h_1 + R_1) - h_0 h}{\sqrt{h^2 + 4(h_1 + R_1)^2}} \right) \quad (4)$$

Якщо діаметр локального струменю дорівнює товщині приграничного шару, то отримаємо формулу коефіцієнту живого січення:

$$\alpha = \frac{\pi N h_0^2}{S - S_0}, \quad (5)$$

де  $N$  – число локальних струменів, що дорівнює числу отворів.

Це число залежить від способу будови сітки з вузлами в центрі отворів. Сітка повинна мати дві властивості:

1) відстань між суміжним центрами отворів постійна;

2) клітки сіток рівновеликі.

Загальний метод побудови таких сіток наступний. Покривається сіткою вся сфера, якій належить сегмент FCG. Ця сітка утворює ікосаедр у якого 20 граней та 30 ребер. Кількість вершин знайдемо за формулою Ейлера [3]:

$$V = \Gamma - P + 2 = 30 - 20 + 2 = 12.$$

Перші 12 вузлів сітки на сфері являються вершинами ікосаедра. До цих вузлів додаються 20 центрів граней трикутників. Так на сфері утворюється сітка, у якій число вузлів дорівнює 32.

Таким методом отримаємо послідовність кількості вузлів, що рівномірно покривають поверхню сфери трикутною сіткою :

$$12; 32; 92; 272... \quad (6)$$

Отже кількість локальних струменів сопла із формули (5) становитиме :

$$N = \frac{nS_1}{4\pi R_2^2}, \quad (7)$$

де  $n$  - одне з чисел послідовності із ряду (7).

Отже кількість локальних струменів в соплі визначають п'ять геометричних параметрів:

- 1) радіус горловини сопла;
- 2) радіус кривизни перфорованої поверхні;
- 3) відстань перфорованої поверхні до транспортеру;
- 4) ширина транспортеру;
- 5) товщина приграничного шару води на бокових стінках всередині сопла.

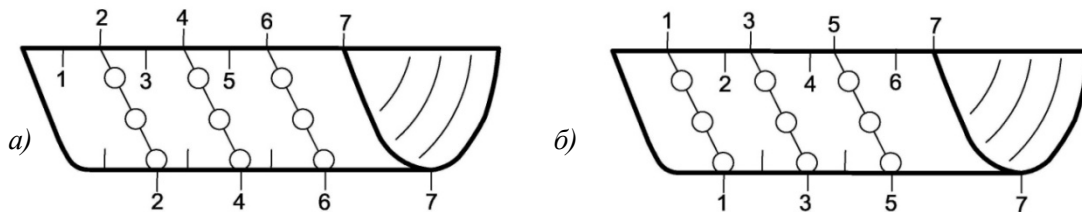


Рис. 2. Розміщення тонких струменів на сусідніх пучках:

a) розміщення початку струменів на парних паралелях; б) розміщення початку струменів на непарних паралелях

Якщо струменеві пучки мають плоске або сферичне сопло, то інтервал між сусідніми пучками не покривається струменями. Ці недоліки можна уникнути, якщо поверхні сопел мають циліндричну форму. Переваги такої форми показані на рис.2 і рис.3.

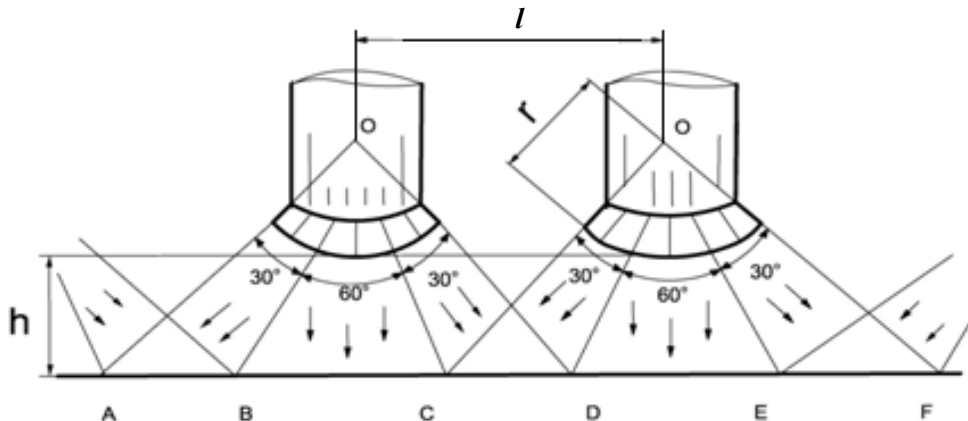


Рис. 3. Покриття поверхні струменями двох сусідніх пучків:

$h$  – мінімальна довжина струменю;  $r$  – радіус кривизни сопла;  $l$  – відстань між соплами



При розміщенні тонких струменів на паралелях циліндричної поверхні пучки на парних паралелях (рис. 2.а) не перетинаються с пучками на непарних паралелях (рис. 2.б), але покривають загальну площу (рис.3).

На рис. 3 зображено покриття струменями ділянку АF двома сусідніми пучками. Ділянка АВ покривається чвертю всіх струменів пучка а) і чвертю всіх струменів сусіднього зліва пучка. Ділянка ВС покривається половиною всіх струменів пучка а). Ділянка CD покривається чвертю струменів пучка а) і чвертю струменів пучка б). Ділянка DE покривається половиною всіх струменів пучка б). Ділянка EF покривається чвертю всіх струменів пучка б) і чвертю всіх струменів сусіднього пучка справа.

За умови рівності числа струменів в кожному пучку всі п'ять ділянок (АВ, ВС, CD, DE, EF) покриваються однаковим числом струменів. Щільність струменів (кількість струменів на одиницю площі) однакова для ділянок ВС і DE, а також для ділянок АВ, CD і EF.

Порівняємо ці щільності:

$$BC = 2(h+r)tg30^\circ = \frac{2}{\sqrt{3}}(h+r);$$

$$AB = (h+r)tg60^\circ - \frac{BC}{2} = (h+r)\sqrt{3} - \frac{h+r}{\sqrt{3}} = \frac{2(h+r)}{\sqrt{3}}.$$

Тому:  $AB = BC = CD = DE = EF$ .

Таким чином на рис. 3 зображена постійна щільність розподілення струменів. Відстань  $d$  між центрами сусідніх пучків при мінімальній довжині струменю  $h$ , радіусі кривизни циліндричного сопла  $r$  і кузі розкриття пучка  $120^\circ$ , для рівномірного покриття площі, відстань між центрами сусідніх становитиме:

$$l = \frac{1}{2}BC + CD + \frac{1}{2}DE = 2BC = \frac{4(h+r)}{\sqrt{3}}.$$

**Висновок.** В результаті проведених теоретичних досліджень отримані залежності дають можливість визначати геометричні параметри сопел для отримання пучків тонких водяних струменів і оптимізувати ефективно їх використання, проводити процес миття з мінімальними витратами води і енергії.

1. Гордиенко А.В. Влияние гидравлических параметров высокоскоростной струи на эффективность водорезания пищевых продуктов / А.В.Гордиенко, А.В. Погребняк // Перспективы пищевых технологий. – 2009. – Вып. 20. – С. 148-153.
2. Бафталовский В.Е. О пороговых значениях скорости истечения водяных струй в автомобильном режиме / В.Е.Бафталовский // Науч. тр. – 1982. – Вып. 207. – С. 84-92.
3. Соколенко О.І. Вища математика. К., 2002. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.

УДК 621.762

**А.В. Кузьмов***Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича  
НАН України***МОДЕЛЮВАННЯ ВДАВЛЮВАННЯ СФЕРИЧНОГО ІНДЕНТОРА В ЗВОРотно  
СТИСЛИВИЙ МАТЕРІАЛ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЕФЕКТАМИ**

*На основі теорії пластичності пористого тіла за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів досліджується напружено-деформований стан поблизу сферичного індентора при різних властивостях індентованого матеріалу. Аналізується розподіл густини в околі індентора в залежності від властивостей пористого тіла та умов тертя між індентором та пористим тілом. Наводяться діаграми навантаження в залежності від схильності до дилатансії та зовнішнього тертя. Придільено увагу виникненню та формі навалів навколо індентора.*

*Ключові слова:* індентування, пластичність стисливих середовищ, сферичний індентор, дилатансія.

*Рис. 8. Форм. 4. Літ. 21.*

**А.В. Кузьмов****МОДЕЛИРОВАНИЕ ВДАВЛИВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА В ОБРАТИМО  
СЖИМАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ДЕФЕКТАМИ**

*На основе теории пластичности пористого тела с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов исследуется напряженно-деформированное состояние вблизи сферического индентора при различных свойствах индентируемого материала. Анализируется распределение плотности в окрестности индентора в зависимости от свойств пористого тела и условий трения между индентором и пористым телом. Приводятся диаграммы нагружения в зависимости от склонности к дилатансии и внешнего трения. Уделяется внимание возникновению и форме навалов вокруг индентора.*

*Ключевые слова:* индентирование, пластичность сжимаемых сред, сферический индентор, дилатансия.

**A.V. Kuzmov****COMPUTER SIMULATION OF THE SPHERICAL INDENTATION FOR IRREVERSIBLE  
COMPRESSIBLE  
MATERIAL WITH DISTRIBUTED DAMAGE**

*Based on theory of plasticity for porous media using finite element computer simulation the deformed state near spherical indenter has been studied for different mechanical properties of indented material. Porosity distribution near indenter depending on properties of porous body and friction conditions between indenter and porous body has been analyzed. Load profiles as a function of dilatancy tendency and contact friction has been shown. Development of bulk around indenter and its shape has been investigated.*

*Keywords:* indentation, plasticity of compressible continuum, spherical indenter, dilatancy.

**Вступ.** При аналізі діаграми навантаження індентора найбільше поширення отримали методики на основі аналітичних розв'язків відповідних задач теорії пружності: розв'язку контактної задачі Герца [1] для випадку сферичного індентора, і розв'язку Лур'є [2] та Снеддона [3] для конічного індентора. Серед відомих робіт в цьому напрямі слід зазначити роботи Олівера і Фарра [4,5], Філда і Свейна [6,7], а також роботи Галанова, Мільмана та ін. [8-10] по інтерпретації діаграм навантаження для пірамідальних інденторів.

Метод Олівера-Фарра та його модифікації зазвичай дають прийнятні результати, хоча, стосовно низькомодульних металів така методика дає значні похибки. Пропонувалась ціла низка інших способів аналізу діаграм навантаження [11-14]. Останнім часом набуло поширення використання для аналізу діаграм навантаження моделювання методом скінчених елементів [11,15-17], зокрема в роботі [11] метод скінчених елементів використовувався для аналізу діаграми навантаження у випадку сферичного індентора.

Неруйнівні методи визначення властивостей становлять особливий інтерес для порошкових матеріалів. Своєрідність їх поведінки при індентуванні пов'язана з наявністю пор і площинних дефектів. Це обумовлює істотні особливості реологічної поведінки пористих матеріалів порошкового походження. Характерними особливостями такого типу матеріалів, є можливість істотних незворотних об'ємних деформацій, різноопірність розтягу-стиску, що пов'язана зі схильністю до дилатансії (вплив дотичних напружень на зміну об'єму) та наявністю площинних дефектів. Наразі, теоретичний розгляд процесу індентування, як правило, ведеться для компактних матеріалів в припущенні про відсутність незворотних змін об'єму. Але, як добре відомо, насамперед з механіки ґрунтів, розподіл напружено-деформованого стану для випадку

© А.В. Кузьмов

нестисливих середовищ і випадку наявності незворотної стисливості середовища, для більшості задач помітно відрізняються. Наявність дилатансії в реологічних властивостях матеріалу, яка неможлива в нестисливому випадку, ще більш посилює цю відмінність. В той же час врахування наведених ефектів – є дуже важливим для інтерпретації результатів індетування.

В роботі, що пропонується, досліджується напружено-деформований стан поблизу сферичного індетора та розподіл відносної густини в його околі при різних властивостях деформованого матеріалу та за різних умов зовнішнього тертя. Використовується одна з концепцій контактної взаємодії та теорія пластичності пористого тіла, чутлива до деформаційного зміцнення твердої фази та наявності площинних дефектів. Сам процес індетування вивчається в рамках наведеної моделі за допомогою комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів. На підставі проведених досліджень з'ясовується вплив відзначених вище особливостей на напружено – деформований стан, розподіл густини і криві навантаження (зусилля – глибина проникнення). Вивчаються якісні особливості процесу індетування, зокрема виникнення навалів та їх зв'язок зі схильністю до розпушення та деформаційним зміцненням.

**Постановка задачі та опис моделі матеріалу.** Пластична складова поведінки матеріалу описується визначальними співвідношеннями узагальненої моделі Cam – Clay, у формі, поданій в роботах [18-20]. Згідно цієї моделі рівняння поверхні навантаження для пористого середовища має вигляд:

$$\frac{(p + p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} = (1 - \theta) \left( \frac{\sigma_0}{1 + m} \right)^2 \quad (2)$$

Де  $p = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$  – шарова складова тензору напружень,

$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}$  – інтенсивність

девіатору напружень,  $\theta$  - пористість,  $\sigma_0$  - напруження течії нестислової твердої фази.

Інші змінні та параметри, які містяться в (2) виражаються за допомогою співвідношень

$$\psi = \frac{2(1 - \eta)^3}{3\eta}, \quad \phi = (1 - \eta)^2, \quad \sigma_0(\omega) = a + b\omega^\alpha, \quad p_0 = m\sigma_0\sqrt{(1 - \theta)\psi} \quad (3)$$

де  $\omega$  - еквівалентна деформація твердої фази пористого тіла, яка приймається у вигляді [18-19]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\sqrt{1 - \theta}} \sqrt{\psi (e^{pl})^2 + \phi (\gamma^{pl})^2} \quad (4)$$

де  $e = e_{11}^{pl} + e_{22}^{pl} + e_{33}^{pl}$  - об'ємна складова тензору швидкостей незворотних деформацій,

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_{11}^{pl} - e_{22}^{pl})^2 + (e_{22}^{pl} - e_{33}^{pl})^2 + (e_{33}^{pl} - e_{11}^{pl})^2 + 6((e_{12}^{pl})^2 + (e_{23}^{pl})^2 + (e_{31}^{pl})^2)}$  - девіаторна складова того ж тензору, а, b

– початкова границя текучості та коефіцієнт зміцнення, матеріалу твердої фази пористого тіла відповідно, m – параметр, що характеризує різноопірність пористого матеріалу при розтягуванні та стисненні. Така поведінка може бути викликана різними чинниками структури пористого тіла: наявністю плоских дефектів (тріщин) або зародженням нових пор.

Припускається, що m задовільняє нерівність:  $0 \leq m \leq 1$

Для описаного вище пружно-пластичного середовища розглядалась задача про вертикальне вдавлювання жорсткого сферичного індетора. При цьому досліджувались як випадки наявності тертя за законом Кулона між індетором та матеріалом, так і його відсутність. Область деформованого середовища являє собою циліндр з однаковими радіусом основи та висотою величина яких у 5 разів більша за радіус індетора.

Для розв'язку задачі генерувалась сітка з 3000 чотирикутних скінчених елементів, яка мала згущення поблизу індетора. Для апроксимації кривої зміцнення (3) використовувались наступні параметри:  $a = 70$  мПа,  $b = 105$  мПа,  $\alpha = 0.5$ , які в цілому характерні для міді. Діаметр індетора - 1.6 мм (1/16 дюйма). Індетор вдавлюється на глибину половини свого радіуса

**Результати обчислень та їх аналіз.** Аналіз результатів обчислень зосереджено на полі відносної густини в околі індентора, яке формується для заданих значень початкової відносної густини, параметру  $m$ . Окремо досліджується вплив зовнішнього тертя та визначається його вплив, а також параметру  $m$  на криві навантаження.

*Вплив дилатансії та початкової відносної густини на ущільнення та розпушення пористого тіла в околі індентора.*

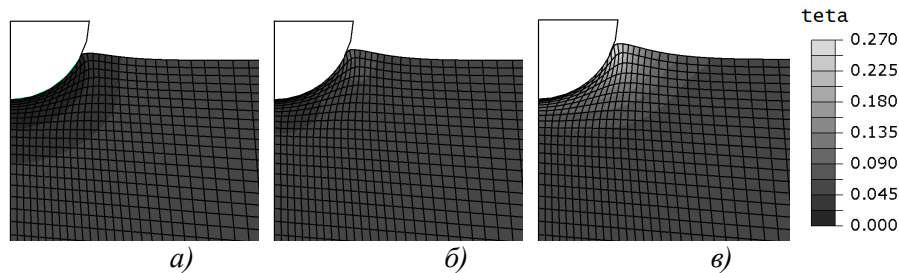


Рис. 4. Розподіл пористості при початковій пористості 0.05 за відсутності тертя а)  $m = 0$  ; б)  $m = 0.4$ ; в)  $m = 0.8$

При відносно невеликій початковій пористості величина параметра  $m$  суттєво впливає як на розподіл пористості так і на характер викривлення поверхні в околі індентора. З ростом  $m$  стає помітнішою тенденція до розпушення матеріалу в околі індентора внаслідок дилатансії. Зокрема, великим значенням цього параметру ( $m = 0.8$ ) в околі індентора, взагалі, не спостерігається ущільнення. В той же час за відсутності дилатансії при  $m = 0$  спостерігається тільки ущільнення. З ростом  $m$  спостерігається збільшення величини навалу навколо індентора. Слід зазначити, що найбільше розпушення відбувається у вершині навалу, де очікуються найбільші деформації розтягу (Рис. 4).

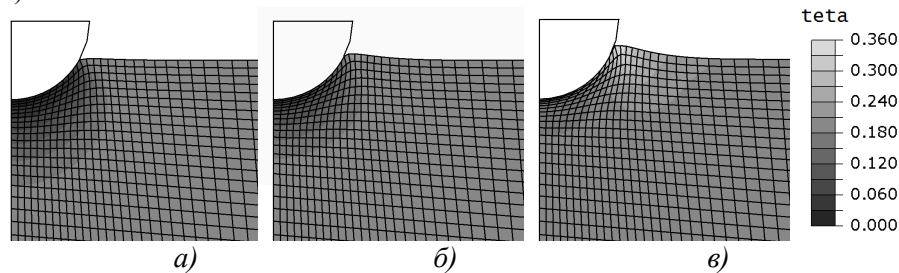


Рис. 5. Розподіл пористості при початковій пористості 0.2 за відсутності тертя а)  $m = 0$  ; б)  $m = 0.4$ ; в)  $m = 0.8$

В той же час, як свідчать дані на Рис.5, 6 збільшення початкової пористості ( $\theta_0 = 0.2$ ) супроводжується зменшенням висоти навалів навколо індентора. Коли  $m = 0.4$ , висота навалу значно менша ніж в аналогічному випадку при початковій пористості 0.05. При  $m = 0.8$  спостерігається найбільша висота навалу в околі індентора. Вплив параметру  $m$  на розподіл пористості в цілому залишається таким самим, як і у випадку, коли  $\theta_0 = 0.05$

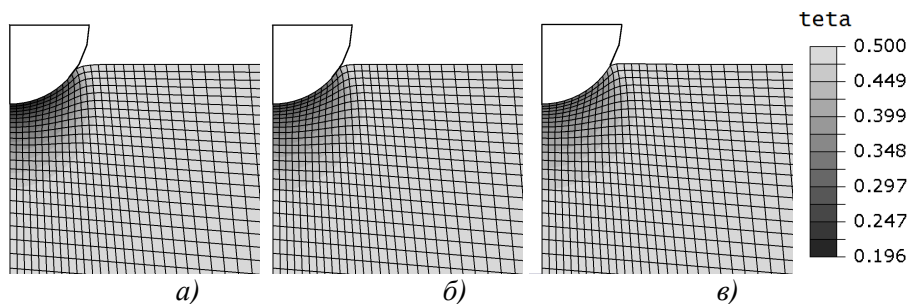
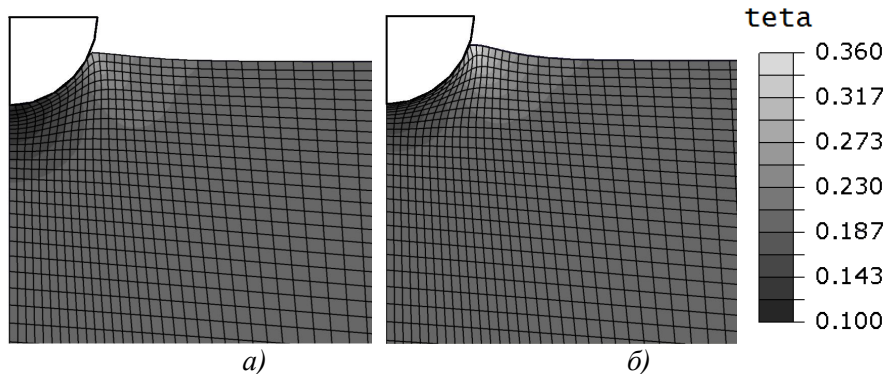


Рис. 6 Розподіл пористості при початковій пористості 0.5 за відсутності тертя а)  $m = 0$ ; б)  $m = 0.4$ ; в)  $m = 0.8$

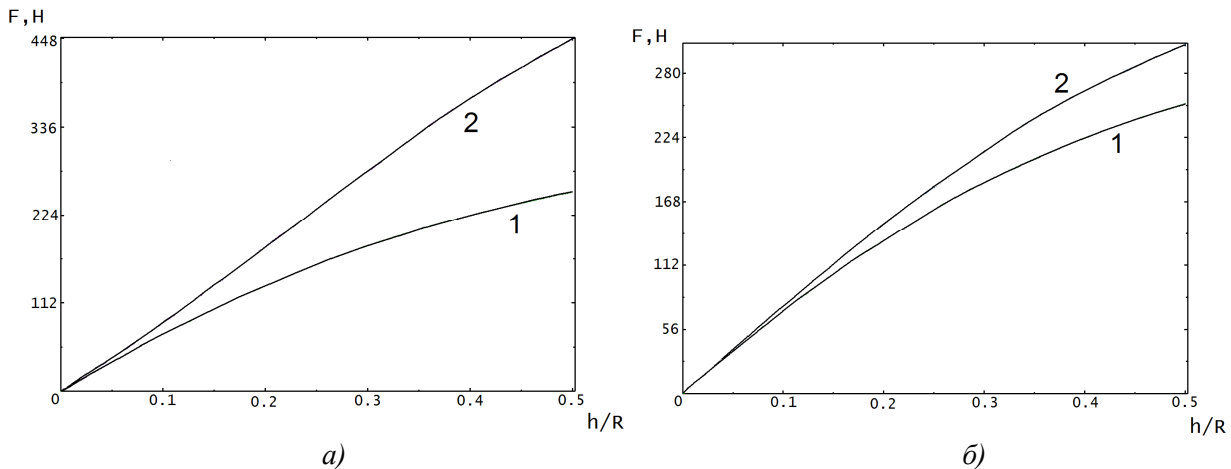
Навіть за умови, що  $m = 0.8$  розпушення практично відсутнє, коли  $\theta_0 = 0.5$ . В той же час схильність до дилатансії суттєво впливає на ступінь ущільнення матеріалу під індентором: чим більше  $m$  тим менш помітне ущільнення. Навалів навколо індентора не спостерігається. Навпаки, спостерігається прогин матеріалу навколо індентора, втім величина прогину незначна (Рис.6)

*Вплив зовнішнього тертя та діаграми навантаження.*



**Рис. 7. Розподіл пористості при початковій пористості 0.2 та  $m = 0.8$**   
**а) коефіцієнт тертя - 0.2; б) відсутність тертя**

Наявність тертя (Рис.7) між індентором та матеріалом також помітно впливає як на розподіл пористості в околі індентора так і на викривлення поверхні матеріалу. Можна стверджувати, що збільшення коефіцієнту тертя певним чином нівелює вплив  $m$ . Тобто за наявності контактного тертя збільшується ущільнення під індентором та зменшується величина навалу навколо нього. Менш помітним є і розпушення в його вершині.



**Рис. 8. Діаграми навантаження при початковій пористості 0.2 (по осі абсцис відкладене відношення переміщення індентора до його радіуса, а по осі ординат зусилля на інденторі)**  
**а) тертя відсутнє, 1)  $m = 0.8$ ; 2)  $m = 0$ ;**  
**б)  $m = 0.8$ , 1) відсутність тертя; 2) коефіцієнт тертя - 0.2**

Розраховані в ході аналізу діаграми навантаження (Рис.8) свідчать, що як зовнішнє тертя між індентором та матеріалом, так і наявність в матеріалі дефектів і пошкоджень, що описуються параметром  $m$  впливають на твердість. З порівняння Рис.8. а) та Рис.8. б) можна зробити висновок, що вплив плоских макродефектів на величину твердості може бути значно суттєвішим ніж вплив наявності тертя. Слід зазначити, що величина коефіцієнту тертя 0.2, для якої побудований рис.8. б) суттєво вище ніж взагалі при індентуванні. Натомість дефектний або слабозв'язаний матеріал цілком може характеризуватись  $m$  більшим ніж 0.8. Необхідно також зазначити, що у випадку різного  $m$  (рис.8. а)) методом індентування досліджуються по суті різні матеріали. В той же час на рис.8. б) зображені діаграми навантаження для одного матеріалу, які відрізняються внаслідок різних умов випробування.

**Висновки.** Для пористого матеріалу, що містить площинні дефекти, характер деформації при індентуванні сферичним індентором суттєво залежить, як від початкової пористості, так і від

ступеня дефектності матеріалу та тертя між індентором та матеріалом. Навіть при відносно невеликій початковій пористості величина параметра дефектності  $m$  суттєво впливає як на розподіл пористості так і на характер викривлення поверхні в околі індентора. З ростом  $m$  стає помітнішою тенденція до розпушення матеріалу в околі індентора внаслідок дилатансії. Збільшення коефіцієнту тертя частково нівелює вплив  $m$  на напружено-деформований стан.

Наведене вище дає підстави використовувати метод індентування як підґрунття для експериментального визначення параметру  $m$ , який може розглядатися як одна з можливих кількісних характеристик дефектності.

Як видно з розрахунків навіть при невеликій початковій пористості за рахунок дилатансії в процесі індентування виникають зони локального розпушення, що наводить на думку про можливість руйнування у цих зонах. Тому напрямком подальших досліджень авторам вбачається детальний аналіз картини напружено-деформованого стану в околі індентора на предмет можливого руйнування. Цікаво дослідити можливість руйнування за найбільш розповсюдженими критеріями руйнування [21].

1. Hertz H. Gesammelte Werke, т. 1, 1895. – P. 179-195.
2. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости. М.: ГТТИ, 1955. – 408 с.
3. Sneddon I.N. The relationship between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile // Int. J. Engin. Sci. 1965. V. 3. № 1. – P. 47-57
4. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. 1992. V. 7. № 6. – P. 1564-1583
5. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // J. Mater. Res. 2004. V. 19. № 1. – P. 3-20
6. Field J.S., Swain M.W. A Simple Predictive Model for Spherical Indentation // J. Mater. Res. 1993. V. 8. – P. 297-306
7. Field J.S., Swain M.W. Determining the mechanical properties of small volumes of material from submicrometer spherical indentations // J. Mater. Res. 1995. V. 10. № 1. – P. 101-112
8. Галанов Б.А., Григорьев О.Н., Мильман Ю.В., Рагозин И.П. Определение твердости и модуля Юнга по глубине внедрения пирамидального индентора // Проблемы прочности. 1983. № 11. С. 93-96.
9. Milman Yu.V., Galanov B.A., Chugunova S.I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement. Overview 107 // Acta Metall. Mater. 1993. V. 41. № 9. P. 2523-2532
10. Галанов Б.А., Мильман Ю.В., Чугунова С.И., Гончарова И.В. Исследование механических свойств высокопрочных материалов методом индентирования // Сверхтвердые материалы. 1999. № 3. С. 25-38.
11. Kogut L., Komvopoulos R. Analysis of the spherifl indentation cycle for elastic-perfectly plastic solid // J. Mater. Res. 2004. V. 19. № 12. – P. 3641-3653
12. Dub S., Novikov N. Milman Y. The transition from elastic to plastic behavior in an Al-Cu-Fe quasicrystal studied by cyclic nanoindentation // Phil. Mag. 2002. V. 82. – P. 2161-2172
13. Antunes J.M., Fernandes J.V., Menezes L.F. A new approach for reverse analyses in depth-sensing indentation using numerical simulation // Acta Mater. 2007. V. 55. – P. 69-81
14. Ma D., Ong C.V., Wong S.F., He J.J. New method for determining Young's modulus by non-ideally sharp indentation // J. Mater. Res. 2005. V. 20. – P. 1498-1506
15. Venckatesh T.A., Van Vliet K.J., Giannocopoulos A.E., Suresh S. Determination of elasto-plastic properties by instrumented sharp indentation: guidelines for property extraction // Scripta Mater. 2000. V. 42. № 9. P. 833-839
16. Li M., Chen W.M., Liang N.-G., Wang L.D. A numerical study of indentation using indenters of different geometry // J. Mater. Res. 2004. V. 19. № 1. – P. 73-78
17. Sreeranganathan A., Golhale A., Tamirisakandala S. Determination of local constitutive properties of titanium alloy matrix in boron-modified titanium alloy using spherical indentations // Scripta Mater. 2008. V. 58. № 1. P. 114-117
18. В.В. Скороход, Реологические основы теории спекания. – Киев, Наук. Думка, 1972. – 151 с.
19. Штерн М.Б. Развитие теории прессования порошков и теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия №9 – 1992
20. Мидуков В.З., Рудь В.Д. О состоянии экспериментальных исследований пластических деформаций пористых металлов // В кн. Реологические модели и процессы деформирования порошковых, пористых и композиционных материалов. Киев. Наук. Думка. 1985. – 164 с.
21. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев.: „Наукова думка”, 1976. – 415 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

УДК 621.793.7

**В.В. Кустов<sup>1</sup>, М.В. Маковійчук<sup>2</sup>, Л.Я. Роп'як<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу<sup>2</sup>Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України**ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТА НАГРІВАННЯ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ В ПРОЦЕСІ НАПИЛЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ**

*Досліджено процес руху та зміну температури частинок порошку, введених у потік розпилюючого газу при напиленні композиційних покриттів. Систему диференціальних рівнянь, що описують рух та нагрівання частинки порошку для випадку неоднорідних полів швидкості та температури газового потоку розв'язано чисельним методом Рунге-Кутта. Проаналізовано залежність отриманих розв'язків для різних матеріалів частинок порошку (алюміній, титан, залізо, молибден, карбід вольфраму) від технологічних параметрів процесу електродугового напилення композиційних покриттів. Встановлено характер зміни температури та швидкості частинок порошку вздовж дистанції напилення. Показано, що температура частинки порошку, яка досягла поверхні деталі є дещо менша від температури частинки, утвореної розпиленням суцільних дротів-електродів із того ж матеріалу.*

*Ключові слова:* частинка порошку, дроти-електроди, електродугове напилення, композиційне покриття, температура нагріву, швидкість частинки порошку.

*Форм. 12. Табл. 1. Рис. 5. Літ. 14.*

**В.В. Кустов, Н.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як****ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ПРОЦЕССЕ НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ**

*Исследован процесс движения и изменения температуры частиц порошка, введенных в поток распыляющего газа при напылении композиционных покрытий. Система дифференциальных уравнений, которые описывают движение и температуру частицы порошка для случая неоднородных полей скорости и температуры газового потока решена численным методом Рунге-Кутта. Проанализирована зависимость полученных решений для различных материалов частиц порошка (алюминий, титан, железо, молибден, карбид вольфрама) от технологических параметров процесса электродугового напыления покрытий. Установлен характер изменения температуры и скорости частиц вдоль дистанции напыления. Показано, что температура частицы порошка, которая достигла поверхности детали несколько меньше температуры частицы, образованной распылением сплошных проволок-электродов из того же материала.*

*Ключевые слова:* частица порошка, проволоки-электроды, электродуговое напыление, композиционное покрытие, температура нагрева, скорость частицы порошка.

**V.V. Kustov, M.V. Makoviichuk, L.Ya. Ropiak****RESEARCH OF MOTION AND HEATING OF PARTICLES OF POWDER IN PROCESS OF SPRAY COATING BY ELECTRIC-ARC METHOD**

*The motion and thermal change of powder particles in the stream of gas at spray coating process are studied. The system of differential equations that describe motion and temperature of powder particle in the case of the heterogeneous speed and temperature fields of gas stream is solved with the numerical Runge-Kutta method. Dependence of the solutions on the technological parameters of coating arc spraying is analyzed for different materials of powder particles (aluminium, titanium, iron, molybdenum, tungsten carbide). The type of thermal change and speed of powder particles are determined along the distance of spraying. It is shown that the temperature of powder particle, which reached the surface of detail, is somewhat less than the one of the particle produced by spraying of continuous wires-electrodes made of the same material.*

*Key words:* particles of powder, wires-electrodes, electroarc coating, composite coating, heating temperature, speed of powder particles.

**Вступ.** Для виготовлення нових та відновлення зношених деталей машин, робочі поверхні яких повинні мати задані фізико-механічні, трибологічні та електрохімічні властивості застосовують функціонально-орієнтовані технології [1]. У цих технологіях важливе місце займають технологічні процеси формування покриттів, які наносять газотермічним напиленням (газополумєневим, газоелектричним). При газополумєневому напиленні покриттів джерелом тепла є факел полум'я утворений при згорянні суміші горючий газ – кисень. При газоелектричних методах напилення для нагрівання матеріалу використовується тепло електричної дуги, індукційного високочастотного нагрівання, електродного плазмового струменя. Серед вказаних методів напилення покриттів слід виділити електродуговий метод, який володіє високою тепловою ефективністю (до 57 %) у порівнянні з плазмовим (17 %) і газополумєневим (13 %) [2].

При електродуговому напиленні покриття наносять з дротів (суцільних або порошкових) [3–5] або додатково вводять частинки порошку в металоповітряний потік для отримання композиційних покриттів із заданою концентрацією компонентів у покритті [6].

© В.В. Кустов, М.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливим показником у процесі напилення покриттів є температура та швидкість частинок у момент досягнення ними поверхні деталей, оскільки від цих показників суттєво залежить якість покриттів. Автори [3–5] проводили експерименти з дослідження швидкості частинок за допомогою швидкісної кінокамери та визначення їх температури калориметричним методом. Розрахунок швидкостей є трудомістким, а отримані значення температури є усередненими. У роботі авторів [7] запропоновано методику оптимального вибору початкових умов руху (початкової швидкості та положення дозуючої трубки), з метою виведення кінцевих точок траєкторій частинок порошку на вісь сопла і тим самим забезпечити їх потрапляння у центр області напилення без врахування теплообміну із струменем розпилюючого повітря.

Відомі також результати експериментальних досліджень розподілу температури в повітряному струмені і напилюваній основі при металізації електродуговим методом [8]. В роботі [9] здійснена аналітична оцінка нагріву і переміщення частинок в однорідному плазмовому потоці зі сталими фізичними параметрами. Розрахунок температури і траєкторій частинок порошку у плазмовому струмені із заданими профілями швидкостей та температури з урахуванням кута введення частинок в канал здійснено в праці [10]. Результати досліджень [8–10] стосуються плазмового напилення покриттів і їх неможна безпосередньо застосувати для моделювання процесу напилення композиційних покриттів електродуговим методом, так, як відмінною особливістю цього методу є високоградієнтний розподіл температури струменя повітря в околі зосередженого джерела тепла (електричної дуги).

**Метою даної роботи** є дослідження руху та зміни температури частинок порошку за різних початкових умов їх уведення в потік розпилюючого повітря при електродуговому методі напилення для оптимізації технології нанесення композиційних покриттів.

**Формулювання задачі та припущення моделі.** Дослідження руху та зміни температури частинок порошку, введених у струмінь газу здійснюємо за таких модельних припущень: 1) радіальна швидкість поширення газового струменя є значно менша від його осьової швидкості, тому її значенням нехтуємо (приймаємо рівною нулю); 2) поля температури та швидкостей газового струменя вважатимемо стаціонарними, тобто незмінними в часі; 3) унаслідок малих розмірів частинок порошку та швидкий перебіг процесу поширення тепла у металах, фактичний розподіл температури у об'ємі частинки не враховуємо і вважаємо, що температура змінюється одночасно для всієї частинки; 4) під час руху частинки порошку не змінюють форму та розміри; 5) концентрація частинок порошку в струмені повітря незначна та їх присутність не впливає на параметри металогазового потоку.

При електродуговій металізації для формування композиційних покриттів уведення частинок порошку у конус повітряного струменя здійснюється у радіальному напрямку. За таких умов вважаємо, що задача володіє осьовою симетрією, тобто рух частинки характеризується двома координатами і відбувається у вертикальній площині, яка проходить через вісь сопла електродугового металізатора та дозуючої трубки порошкового живильника. Дослідження проводимо в системі координат  $Ox$  з початком в полюсі газового струменя, спрямувавши вісь  $Ox$  вздовж осі сопла в напрямку поверхні на яку напилюють покриття, а вісь  $Oy$  – вертикально вгору (рис. 1). При цьому вважатимемо, що частинки порошку рухаються під дією власної ваги  $G$  і сили аеродинамічного опору  $F_{оп}$ . Всі інші сили, що можуть виникати у процесі руху частинки порошку, наприклад за рахунок нерівномірного розподілу градієнтів тиску та швидкості струменя повітря, та запізнення відклику середовища на зміну її швидкості, вважаються такими, що мають незначний вплив унаслідок малості часу руху та розмірів цієї частинки.

З метою визначення кінематичних та теплових характеристик процесу електродугового напилення композиційних покриттів запишемо диференціальні рівняння руху та нагріву твердої частинки введеної у повітряний струмінь і дослідимо залежність їх розв'язків від вихідних технологічних параметрів процесу та початкових умов.

**Диференціальні рівняння руху.** Рух та нагрівання частинок порошку в струмені газу в рамках прийнятих припущень описується системою диференціальних рівнянь



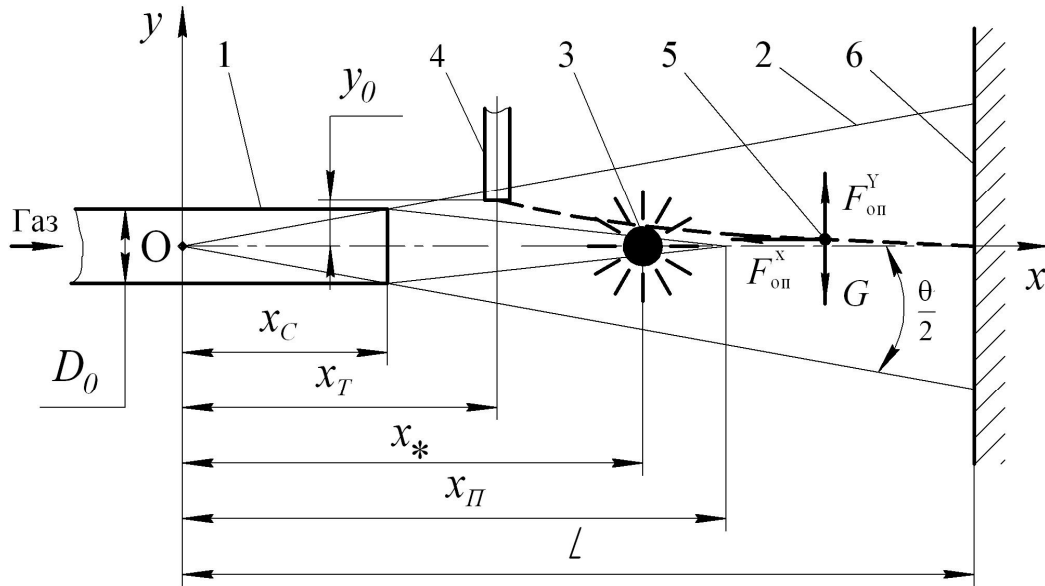


Рис. 1. Схема введення частинок порошку в струмінь розпилюючого повітря при електродуговому напilenні композиційних покриттів: 1 – сопло; 2 – повітряний струмінь; 3 – електрична дуга (точкове джерело тепла); 4 – дозуюча трубка живильника; 5 – частинка порошку; 6 – поверхня на яку напильється покриття

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{1}{2} C_d S_{mid} \rho_g |\vec{V}_g - \vec{V}_p| (\vec{V}_g - \vec{V}_p) + m_p \vec{g},$$

$$c_p m_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p S_{surf} (T_g - T_p),$$
(1)

де

$m_p$  – маса частинки порошку, кг;

$V_p$  – швидкість частинки порошку, м/с;

$V_g$  – швидкість струменя розпилюючого газу, м/с;

$T_p$  – температура частинки порошку, °С;

$T_g$  – температура струменя розпилюючого газу, °С;

$\rho_g$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – питома теплоємність матеріалу частинки порошку, Дж/(кг·°С);

$d_p, r_p$  – діаметр та радіус сферичної частинки порошку відповідно, м;

$S_{mid}$  – площа міделевого січення частинки порошку, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт лобового опору частинки порошку  $C_d$  та її коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_p$  визначаються із критеріальних співвідношень згідно емпіричних залежностей [9]

$$C_d = \frac{24}{Re} \left( 1 + 0,15 Re^{0,687} \right), \quad \alpha_p = Nu \frac{\lambda_g}{d_p};$$
(2)

$$Re = \frac{\rho_g d_p |\vec{V}_g - \vec{V}_p|}{\mu_g}, \quad Nu = 2 + 0,6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Pr = \frac{\mu_g c_g}{\lambda_g}.$$
(3)

Тут  $Re, Nu, Pr$  – числа Рейнольдса, Нуссельта та Прандтля відповідно;

$\mu_g$  – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с;

$\lambda_g$  – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/(м·°С);

$c_g$  – питома теплоємність газу, Дж/(кг·°С).

Площа поверхні, площа міделевого січення та маса частинки порошку сферичної форми визначаються відповідно за формулами

$$S_{surf} = \pi d_p^2, \quad S_{mid} = \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad m_p = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6}.$$

Для обчислення значень горизонтальної складової швидкості  $V_{g,x}(x, y)$  (за припущенням  $V_{g,y}(x, y) \equiv 0$ ), а також температури  $T_g(x, y)$  струменя повітря, розглянемо його спрощену схему, що складається з початкової ділянки з сталою осью швидкістю та основної частини, де осьова швидкість є змінною. Встановлено, що для турбулентних газових струменів поперечні профілі обезрозмірених величин горизонтальної швидкості та температури у межах основної ділянки ( $x > x_{\Pi}$ ) мають універсальний вигляд [11]

$$\frac{V_{g,x}(x, y)}{V_{g,x}(x, 0)} = \left( 1 - \left( \frac{y}{b(x)} \right)^2 \right)^2, \quad \frac{T_g(x, y) - T_H}{T_g(x, 0) - T_H} = 1 - \left( \frac{y}{b(x)} \right)^2.$$

Спадання швидкості та температури газу вздовж осі струменя ( $y = 0$ ) на основній ділянці ( $x > x_{\Pi}$ ) здійснюється за гіперболічним законом [11]

$$\frac{V_{g,x}(x, 0)}{V_{g,x}^0} = \frac{x_{\Pi}}{x} = \frac{\frac{a}{R_0} x_{\Pi}}{\frac{a}{R_0} (x_c + s)} = \frac{0,96}{0,29 + \frac{as}{R_0}}, \quad (4)$$

$$\frac{T_g(x, 0) - T_H}{T_{g\Pi} - T_H} = \frac{x_{\Pi}}{x} = \frac{\frac{a}{R_0} x_{\Pi}}{\frac{a}{R_0} (x_c + s)} = \frac{0,7}{0,29 + \frac{as}{R_0}}. \quad (5)$$

Тут  $b(x) = tg \frac{\theta}{2} \cdot x$  – змінний радіус струменя повітря;  $R_0 = D_0 / 2$  – радіус сопла;  $a \approx 0,07$  – коефіцієнт турбулентності, який визначається емпірично за розмірами сопла [7];  $s$  – координата із початком відліку на зрізі сопла;  $x_c = 0,008$  м – глибина полюса струменя ( $x_c = x - s$ );  $x_{\Pi}$ ,  $x_{\Pi}$  – координати перехідних перерізів профілів швидкості та температури;  $T_{g\Pi}$ ,  $T_H$  – значення температури повітря у перехідному перерізі струменя та у навколишньому середовищі;  $V_{g,x}^0$  – швидкість повітря у початковому перерізі струменя (на зрізі сопла).

Із виразів (4), (5) видно, що перехідний переріз профіля температури знаходиться дещо ближче до початку струменя ніж перехідний переріз профіля швидкості ( $x_{\Pi} = 0,02$  м,  $x_{\Pi} = 0,027$  м). На початковій ділянці струменя ( $x_c \leq x \leq x_{\Pi}$ ) швидкість струменя вздовж осі не міняється і дорівнює початковому значенню на зрізі сопла  $V_{g,x}(x, 0) = V_{g,x}^0 = \text{const}$ .

Щодо визначення поля температури на початковій ділянці і врахування високих температурних градієнтів у безпосередній близькості до електричної дуги, використаємо модель точкового джерела тепла, сталої потужності  $q$  (Вт) у рухомому середовищі. Вважатимемо, що джерело тепла розміщене в точці  $(x_*, 0)$ , а середовище рухається з постійною швидкістю  $V_{g,x}^0$  у додатному напрямку осі  $Ox$ . Таким чином, у рамках припущень про усталені режими струменя повітря та поширення тепла, стаціонарне поле температури у межах початкової ділянки ( $x_c < x < x_{\Pi}$ ) у площині  $Oxy$  опишемо формулою [12]

$$T_g(x, y) = \frac{q}{4\pi\lambda_g R_*} \exp \left[ -\frac{V_{g,x}^0}{2k^2} (R_* - (x - x_*)) \right].$$

Тут  $R_* = \sqrt{(x-x_*)^2 + y^2}$  – відстань до точкового джерела тепла, м;  $k^2 = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g}$  – коефіцієнт

температуропровідності повітря, м<sup>2</sup>/с.

Унаслідок ідеалізації моделі, пов'язаною із заміною електричної дуги певних розмірів, точковим джерелом тепла, у місці його розташування  $(x_*, 0)$  виникає сингулярність поля температури. З метою усунення фізичного протиріччя, на значення температури накладемо обмеження  $T_g(x, y) < T_{\max}$ , де  $T_{\max}$  – максимально допустима температура електричної дуги. Згідно даних [4, 13] температура електричної дуги міняється в межах  $T_{\max} = 5800 \dots 6200$  °С.

Потужність електричної дуги  $q$ , що впливає на градієнт температури середовища поблизу дуги визначимо за формулою

$$q = IU,$$

де  $I$  – сила струму, А;  $U$  – напруга, В. Для електродугового наплення залежно від матеріалу та діаметрів дровів-електродів  $D = 0,0015 \dots 0,002$  м ці параметри знаходяться в межах:  $I = 70 \dots 150$  А;  $U = 25 \dots 35$  В [14].

Остаточні формули для інженерного розрахунку поля температури від точкового джерела тепла та горизонтальної складової швидкості у довільній точці газового струменя представимо у вигляді:

$$T_g(x, y) = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\lambda_g R_*} \exp\left[-\frac{v}{2k^2}(R_* - (x-x_*))\right], & x_c \leq x < x_{\text{пт}}; \\ T_H + (T_{g\text{пт}} - T_H) \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right) \frac{x_{\text{пт}}}{x}, & x_{\text{пт}} \leq x < x_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

$$V_{g,x}(x, y) = \begin{cases} V_{g,x}^0 \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right)^2, & x_c \leq x < x_{\text{пт}}; \\ V_{g,x}^0 \left(1 - \left(\frac{y}{b(x)}\right)^{3/2}\right)^2 \frac{x_{\text{пт}}}{x}, & x_{\text{пт}} \leq x < x_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Результати обчислення температури та швидкості за формулами (6), (7) показані на рис. 2.

Спроектвавши векторне рівняння руху з системи (1) на осі координат та враховуючи вирази (2), (3), отримаємо систему взаємопов'язаних рівнянь, що описують рух та нагрівання частинки порошку в струмені розпилюючого газу

$$\begin{aligned} \frac{dV_{p,x}}{dt} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{0,687}\right) (V_{g,x} - V_{p,x}), \\ \frac{dV_{p,y}}{dt} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left(1 + 0,15 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{0,687}\right) (V_{g,y} - V_{p,y}) - g, \\ \frac{dT_p}{dt} &= \frac{6\lambda_g}{d_p^2 \rho_p c_p} \left(2 + 0,6 \left(\frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V\right)^{1/2} \left(\frac{\mu_g c_g}{\lambda_g}\right)^{1/3}\right) (T_g - T_p). \end{aligned} \quad (8)$$

Тут  $V = \sqrt{(V_{g,x} - V_{p,x})^2 + (V_{g,y} - V_{p,y})^2}$  – модуль відносної швидкості частинки порошку у струмені розпилюючого повітря.

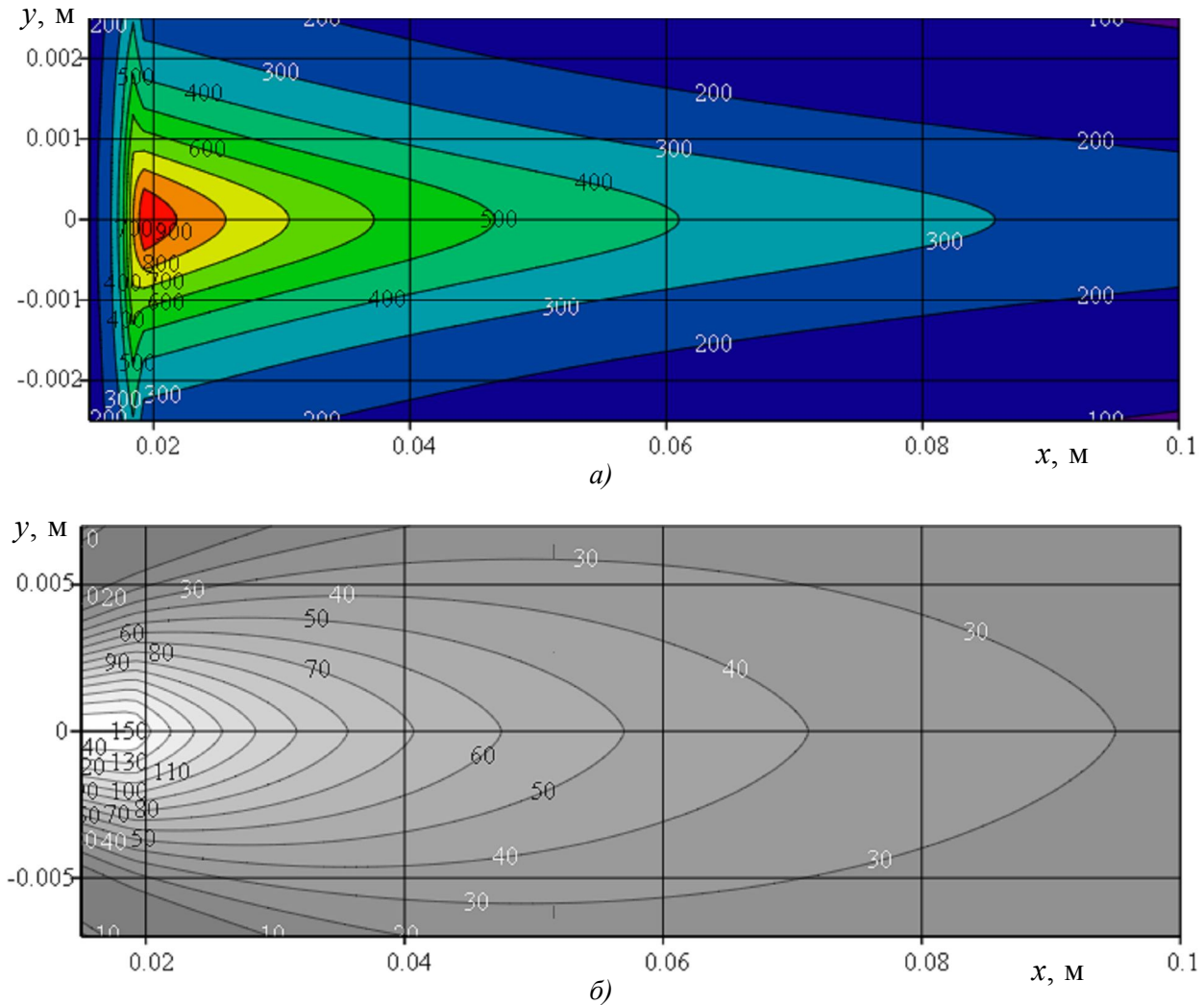


Рис. 2. Поле температури  $T_g(x, y)$  (а) та поле горизонтальної складової швидкості  $V_{g,x}(x, y)$  (б) в осьовому перерізі струменя розпилюючого повітря

Розв'язок системи рівнянь (8) визначатиме зміну швидкості та температури частинки порошку в часі. Наявність у останньому рівнянні величини  $V$  відображає очевидний факт, що температура частинки порошку залежатиме від її відносної швидкості, а тим самим і від часу перебування у потоці повітря.

Для визначення закону руху частинки порошку  $x_p = x_p(t)$ ,  $y_p = y_p(t)$  та побудови її траєкторії систему (8) потрібно доповнити залежностями

$$\frac{dx_p}{dt} = V_{p,x}(t), \quad \frac{dy_p}{dt} = V_{p,y}(t). \quad (9)$$

Варто зазначити, що у випадку стаціонарного розподілу полів швидкостей  $\vec{V}_g$  та температури  $T_g$  розпилюючого газу система рівнянь (8) явно не міститиме часову змінну  $t$ . У такому разі можна отримати незмінні у часі, координатні залежності швидкості та температури частинки безпосередньо вздовж траєкторії, що мають більшу наочність та є зручними для аналізу і практичного використання. Для цього у похідних від швидкостей перейдемо до диференціювання за координатами

$$\frac{dV_{p,x}}{dt} = \frac{dx_p}{dt} \frac{dV_{p,x}}{dx_p} = V_{p,x} \frac{dV_{p,x}}{dx_p}, \quad \frac{dV_{p,y}}{dt} = \frac{dy_p}{dt} \frac{dV_{p,y}}{dy_p} = V_{p,y} \frac{dV_{p,y}}{dy_p},$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{dx_p}{dt} \frac{dT_p}{dx_p} = V_{p,x} \frac{dT_p}{dx_p}.$$

Після підстановки вищенаведених виразів систему рівнянь (8) запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} V_{p,x} \frac{dV_{p,x}}{dx_p} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left( 1 + 0,15 \left( \frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{0,687} \right) (V_{g,x} - V_{p,x}), \\ V_{p,y} \frac{dV_{p,y}}{dy_p} &= \frac{18\mu_g}{d_p^2 \rho_p} \left( 1 + 0,15 \left( \frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{0,687} \right) (V_{g,y} - V_{p,y}) + g, \\ V_{p,x} \frac{dT_p}{dx_p} &= \frac{6\lambda_g}{d_p^2 \rho_p c_p} \left( 2 + 0,6 \left( \frac{\rho_g d_p}{\mu_g} V \right)^{1/2} \left( \frac{\mu_g c_g}{\lambda_g} \right)^{1/3} \right) (T_g - T_p). \end{aligned} \quad (10)$$

Для визначення складових параметрів руху частинок порошку у потоці розпилюючого повітря отримані рівняння слід розв'язувати задавши для системи (8), (9) умови у початковий момент часу:

$$V_{p,x}|_{t=0} = V_{p,x}^0, \quad V_{p,y}|_{t=0} = V_{p,y}^0, \quad x_p|_{t=0} = x_p^0, \quad y_p|_{t=0} = y_p^0, \quad T_p|_{t=0} = T_p^0, \quad (11)$$

а для системи (10) умови у початковій точці руху:

$$V_{p,x}|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = V_{p,x}^0, \quad V_{p,y}|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = V_{p,y}^0, \quad T_p|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} = T_p^0. \quad (12)$$

**Результати дослідження.** Числовий розв'язок систем нелінійних диференціальних рівнянь (8) та (10) з відповідними початковими умовами (11), (12) отримали за допомогою алгоритму Рунге-Кутта 4-го порядку.

Обчислення проводили для частинок порошку з таких матеріалів: алюміній, титан, залізо, молібден, карбід вольфраму середньої грануляції ( $d_p = 50 \cdot 10^{-6}$  м), за початкових умов введення:  $x_0 = 0,01$  м,  $y_0 = 0,002$  м,  $V_{px}^0 = 0$  м/с,  $V_{py}^0 = 0,5$  м/с і значень фізичних параметрів повітряного струменя:  $V_{gx}^0 = 150$  м/с,  $T_p^0 = T_H = 20$  °С,  $\rho_g = 0,277$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_g = 49 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>,  $\lambda_g = 8,07 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·°С),  $c_g = 1,185 \cdot 10^3$  Дж/(кг·°С).

Зміну температури частинки порошку різних матеріалів вздовж горизонтального переміщення ілюструє рис. 3. Для порівняння також наведено температуру повітряного потоку вздовж кожної з траєкторій. Розрахунок температури частинок порошку здійснювали виходячи з умови, щоб максимальна температура нагріву не перевищувала температуру плавлення. Дана умова забезпечується вибором місця введення частинок у потік повітря відносно точкового джерела тепла, а також початковою швидкістю їх руху.

Як видно з графіків, наведених на рис. 3, температура частинок порошку різко зростає практично до температури плавлення в момент введення у зоні дії точкового джерела тепла (електричної дуги). Далі відбувається поступове зниження температури у потоці повітря, залишаючись при цьому досить високою на момент досягнення поверхні напилення. Слід відзначити, що спадання температури частинок порошку відбувається швидше для матеріалів із більшою температурою плавлення. Порівняно із температурою частинок, утворених розпиленням із суцільних дротів-електродів, в кінці дистанції напилення [3–5, 14], температура частинок порошку введених у струмінь розпилюючого повітря згідно із запропонованим способом [6] є дещо менша але цілком достатня для формування якісних композиційних покриттів.

Залежність горизонтальної складової швидкості частинок порошку різних матеріалів від переміщення подано на рис. 4. З рисунка видно, що фактично відразу ж після моменту введення у потік повітря швидкість частинок зростає до певної величини і далі в процесі руху практично не міняється. Також є очевидним факт, що частинки порошку матеріалів меншої питомої густини досягають більших швидкостей.

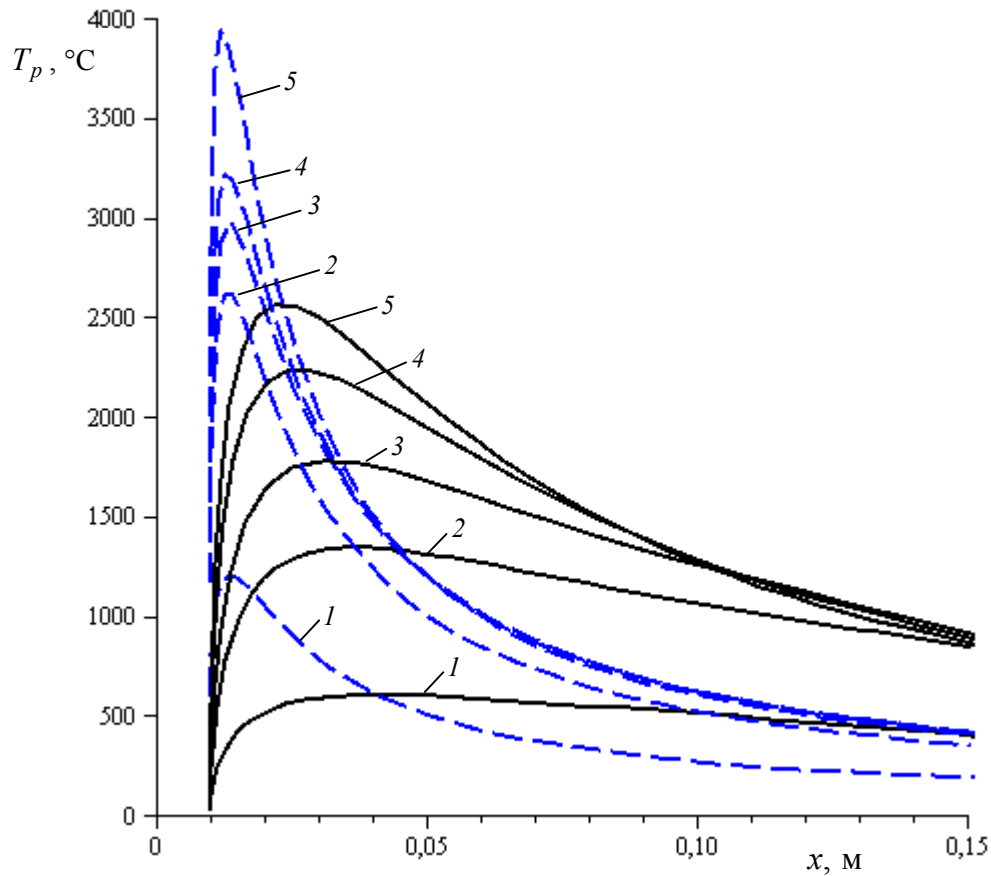


Рис. 3. Залежність температури частинок порошку від переміщення (суцільні лінії) та температура розпилюючого повітря вздовж відповідних траєкторій частинок (штрихові лінії): 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму

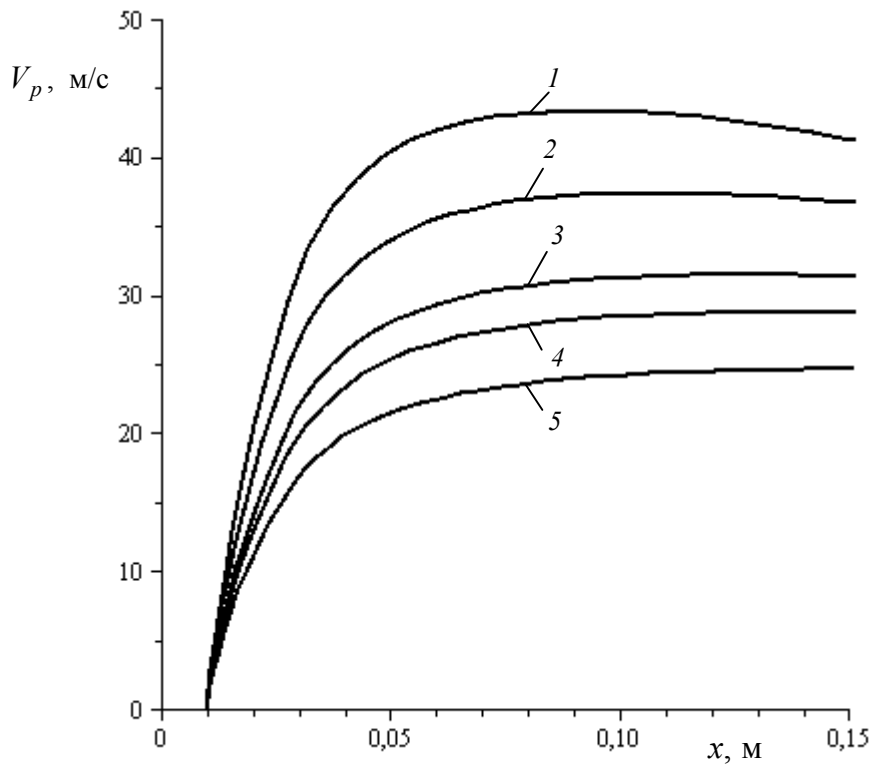


Рис. 4. Залежність горизонтальної швидкості частинок порошку від переміщення: 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму

Траєкторії руху частинок порошку різних матеріалів, які розраховані за однакових початкових умов руху, зображено на рис. 5.

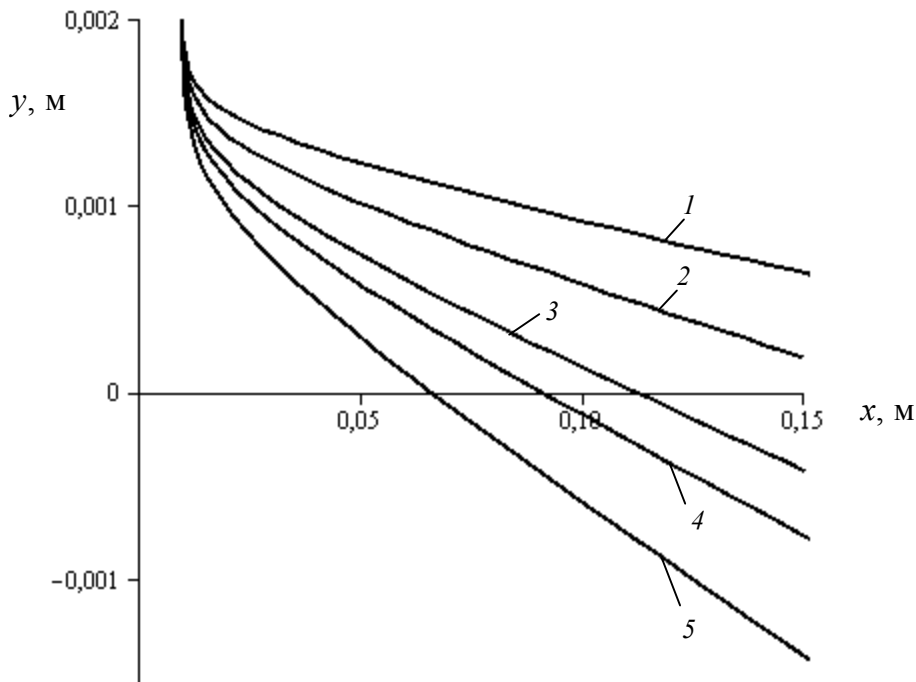


Рис. 5. Траєкторії руху частинок порошку для значень  $x_p^0 = 0,01$  м,  $y_p^0 = 0,002$  м,  $V_{px}^0 = 0$  м/с,  $V_{py}^0 = 0,5$  м/с: 1 – алюміній; 2 – титан; 3 – залізо; 4 – молібден; 5 – карбід вольфраму

За однакових початкових умов руху траєкторії частинок важчих матеріалів значно відхилятимуться від частинок аналогічних розмірів меншої питомої густини. З метою, забезпечення попадання основної маси частинок порошку у центр області напилення, згідно запропонованого способу нанесення композиційних покриттів [7], для кожного матеріалу необхідно підібрати початкові умови введення його частинок у повітряний струмінь, так, щоб у кінці дистанції напилення, траєкторії вийшли на вісь симетрії повітряного потоку. Особливістю такого підбору є те, що у неоднорідному полі швидкостей вигляд траєкторій руху залежатиме також і від місця введення частинок порошку у потік повітря. Таким чином для кожних конкретних вихідних фізичних та геометричних параметрів задачі потрібно узгоджувати початкові умови руху – для заданого початкового положення кінця дозуючої трубки слід підбирати відповідну початкову швидкість введення частинок порошку в потік. Оптимальні початкові умови за дистанції напилення  $L = 0,15$  м для частинок порошку вибраних матеріалів та прийнятих фізичних параметрів задачі наведено у таблиці.

Таблиця 1. Рекомендовані умови введення частинок порошку в потік розпилюючого повітря

Умови введення / Матеріал порошку	Алюміній	Титан	Залізо	Молібден	Карбід вольфраму
Місце введення ( $x_p^0$ ; $y_p^0$ ), м	(0,01; 0,002)	(0,01; 0,002)	(0,01; 0,015)	(0,01; 0,015)	(0,01; 0,001)
Швидкість введення $V_{py}^0$ , м/с	0,8	0,6	0,4	0,25	0,15

У подальших дослідженнях планується дослідити теплову взаємодію введених частинок порошку із металоповітряним потоком, що містить краплини металу дротів-електродів у процесі напылення композиційних покриттів електродуговим методом.

**Висновки.** Встановлено залежності параметрів руху та температури частинок порошку, введених у потік розпилюючого повітря з неоднорідним розподілом швидкостей та температур, від технологічних параметрів при напыленні композиційних покриттів електродуговим методом.

Для досліджуваних матеріалів частинок порошку (алюміній, титан, залізо, молібден, карбід вольфраму) визначено оптимальні початкові умови введення їх у неоднорідний потік розпилюючого повітря для забезпечення потрапляння цих частинок у центр області напылення.

Згідно з умовами запропонованого способу напылення температура частинки порошку в кінці дистанції є дещо менша від температури частинок утворених розпыленням із суцільних дротів-електродів, але цілком достатня для забезпечення формування якісних композиційних покриттів.

1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Герасименко В.М. Перспективные методы получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий газотермическим напылением / В.М. Герасименко. – К., 1985. – 64 с. (Обзор. информ. / УкрНИИТИ). Сер. 9. Технология и оборудование сварочного производства.
3. Хасуй А. Техника напыления / Пер. с японского С.Л. Масленникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
4. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с японского В.Н. Попова. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
5. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів, Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – 2005. – 192 с. + вклейка 8 с.
6. Патент на винахід України № 40784 МПК С 23 С 4/04, 26/02, 28/00 Установа для напылення композиційних покриттів електродуговим методом [Текст] / В.В. Кустов, Л.Я. Роп'як; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010333; заявл. 20.01.00; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12. – 3 с.
7. Кустов В.В. Моделювання руху частинок порошку при напыленні покриттів електродуговим методом / В.В. Кустов, М.В. Маковійчук, Л.Я. Роп'як // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. Вип. 41. С. 188 – 196.
8. Воропай Н.М. Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации / Н.М. Воропай, О.И. Мажейка, С.И. Маркович // Автоматическая сварка, 2004. № 5. – С. 18–21.
9. Бороненко М.П. Модель движения и нагрева частиц в плазменной струе / М.П. Бороненко, И.П. Гуляев, А.Е. Серегин // Вестник Югорского гос. ун-та, 2012. – Выпуск 2 (25). – С. 7–15.
10. Хрусталева Т.Р. Расчет температуры и траектории частиц в неизотермической струе газа / Т.Р. Хрусталева, С.А. Панфилов, А.И. Друговский // Физика и химия обработки материалов, 1979. № 2. – С. 70–74.
11. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович / Репринтное воспроизведение издания 1960 г. — М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
12. Маргинсон Л.К., Малов Ю.И. Дифференциальные уравнения математической физики: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 368 с.
13. Макаров А.Н., Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания. Ч. 2. Теплообмен в факельных печах, топках, камерах сгорания: монография / А.Н. Макаров. – Тверь: ТГТУ, 2009. – 152 с.
14. Катц Н.В. Металлизация распылением / Н.В. Катц, Е.В. Антошин, Д.Г. Вадивасов, Г.Д. Вольперт, Г.Д. Камионский. – М.: Машиностроение, 1966. – 200 с.

Стаття надійшла до редакції 31.12.2013.



О.Л. Ляшук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Досліджено динамічний процес переміщення сипкого середовища за допомогою канатного робочого органу скребкового конвеєра. Виведено дисперсійні залежності для визначення невідомих хвильових чисел та частот динамічного процесу за геометричними, кінематичними та фізико-механічними параметрами.*

*Ключові слова: динамічний процес, транспортер, канатний робочий орган.*

*Рис. 1. Форм. 10. Літ. 23.*

О.Л. Ляшук

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Исследован динамический процесс перемещения сыпучей среды с помощью канатного рабочего органа скребкового конвейера. Выведены дисперсионные зависимости для определения неизвестных волновых чисел и частот динамического процесса по геометрическим, кинематическим и физико-механическим параметрам.*

*Ключевые слова: динамический процесс, транспортер, канатный рабочий орган.*

O.L. Lyashuk

**INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES TRANSPORTATION OF BULK MATERIALS**

*The dynamic process of moving the of granular medium using a rope working body of the scraper conveyors. We found out the dispersion dependences for the unknown wave numbers determination and frequency of the dynamic process in the given geometric, kinematic and physical-mechanical parameters.*

*Keywords: dynamic process transporter, ropes working body.*

**Постановка проблеми.** Дослідження динамічних процесів машин та механізмів на базі лінійних розрахункових моделей не дають змоги пояснити багато явищ, що їх супроводжують. Одночасно коливальні процеси, які супроводжують технологічні процеси, як правило, призводить до небажаних явищ: появляются значні деформації, знижується в кінцевому результаті довговічність експлуатації вузлів та механізмів складовими частинами яких вони є. У зв'язку із цим всебічний аналіз динамічних явищ на базі нелінійних розрахункових моделей має велике практичне значення. Для гнучких привідних елементів транспортних скребкових конвеєрів (ТСК), ще на стадії проектування визначати спектр власних частот, вибирати параметри та режими експлуатації таким чином, щоб уникнути резонансні явища у них, а значить, забезпечити довготривалу їх експлуатацію. Зробити це можна тільки на основі побудови та аналізу розв'язків математичних моделей, які адекватні динамічному процесу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для випадку коливальних систем (привідної канати транспортера у тому числі) це, в першу чергу, комбінаційні резонанси, залежність частоти коливань від амплітуди, відсутність принципу суперпозиції, втрата стійкості займалося багато науковців Андронов І. В. [1] Бабаков І. М [2], Боголюбов Н. Н. [3], Блакьер О. [4], Гробов В. А [5], Доценко П. Д. [6], Кузьо І. В., Сокіл Б.І. [7] тощо. Саме побудова аналітичних розв'язків нелінійних математичних моделей коливань привідних гнучких елементів скребкового конвеєра, які ураховують постійну складову швидкості їх руху та аналіз на їх основі впливу кінематичних, фізико-механічних, геометричних параметрів на динамічний процес є предметом розгляду. Вона базується на: а) принципі одночастотності коливань у нелінійних системах із багатьма ступенями вільності та розподіленими параметрами [3, 8]; б) хвильовій теорії рух [9,10,11], яка адаптована для поздовжньо-рухомих систем [14-15]; в) поширенні основної ідеї методу Ван-дер-Поля [16] на розглядувані класи динамічних систем.

**Мета роботи.** Розробити методику знаходження впливу нелінійних сил на нелінійні коливання віток транспортера за умови малих збурень крайових умов. Робота виконується в рамках пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки і Постанови Кабінету Міністрів України "Новітні та ресурсощадні технології в промисловості, енергетиці та агропромисловому комплексі" на 2010-2015 роки.

**Реалізація результатів роботи.** Динамічні системи, основні характеристики яких змінюються за певним законом вздовж їх довжини (площі, об'єму) носять назву систем із розподіленими

параметрами. Їх рух описується рівняннями з частинними похідними за певних крайових умов. Робочий орган скребкового конвеєра, за допомогою якого переміщається сипке середовище, можна вважати одновимірним пружним тілом, маса якого змінюється вздовж довжини.

Із рухом канатного робочого органу та нелінійно- пружними її властивостями пов'язані основні труднощі аналітичного дослідження динаміки процесу.

Щодо крайових умов, то вони враховують:

по-перше, переміщення крайніх точок ділянок робочого органу, вважаються малими величинами;

по-друге, що переміщення крайньої правої точки нижньої частини робочого органу узгоджується із переміщенням нижньої точки вертикальної частини, а переміщення крайньої правої точки верхньої частини - узгоджується із переміщенням верхньої точки вертикальної частини (одні і ті ж фізичні точки).

До того ж диференціальні рівняння, які описують досліджуваний процес, представлені у змінних Ейлера [17,18]. Використання останніх у певній мірі спрощує представлення крайових умов. Для випадку, коли рухом сипкого середовища відносно робочого органу можна знехтувати, масу сипкого середовища можна вважати розподіленою за певним законом вздовж робочого органу. В такому разі всі точки нормальних поперечних перерізів системи сипке середовище – робочий орган мають однакові кінематичні характеристики (за виключенням кутових областей). Вказане є підставою того, що досліджуваний об'єкт можна трактувати одновимірною механічною системою із розподіленими параметрами.

Для вказаних задач визначальними чинниками технологічного процесу є основні усереднені кінематичні та фізико-механічні характеристики динаміки сипкого середовища (умовні динамічний модуль пружності, амплітуда та частота коливань розглянутої моделі процесу сипкого середовища). Тому у вказаних роботах показано, що сипке середовище за вказаних технологічних операцій можна розглядати як пружне тіло із деякими усередненими інтегральними характеристиками. У технологічному ж процесі транспортування сипкого середовища за допомогою робочого органу із скребками, рух сипкого середовища відносно робочого органу не становить, а на наш погляд, ні теоретичної, ні практичної цінності. До того ж, переміщення частинок середовища відносно робочого органу є незначними, особливо це стосується горизонтальних віток скребкового конвеєра. За масу одиниці довжини вказаного умовного одновимірного тіла (сипке середовище та канатний скребковий робочий орган) слід розуміти сумарну масу самого робочого органу та сипкого середовища. Таким чином, наведене є підставою того, що задачу про переміщення сипкого середовища за допомогою (ТСК) можна віднести до задачі динаміки одновимірної системи із розподіленими параметрами. Положення одновимірних систем із розподіленими параметрами при поздовжніх її коливаннях однозначно визначається функцією, яка описує деформацію умовної пружної матеріальної лінії в довільний момент часу. Для визначення вказаної функції умовно розглядалися три ділянки канатного скребкового конвеєра (КСК): дві горизонтальні (верхня та нижня); одна вертикальна. Основні характеристики (кінематичні та фізико механічні) верхньої та нижньої віток (КСК) однакові за виключенням лише величини сили натягу.

До обґрунтованих обмежень, які дають змогу аналітично вирішити деякі задачі поставленої проблеми належать:

- маса робочого органу із невідривно зв'язаною сипким середовищем є повільно змінною функцією. Нижче, не зменшуючи загальності постановки задачі, будемо вважати закон розподілу

маси у змінних Лагранжа описується функцією  $m(x) = m_0 + m_1 \cos\left(\frac{\pi}{2l}x + \varphi_0\right)$ ,  $m_1 \ll m_0$ ,  $\varphi_0$  - сталі;

- максимальне значення сили опору є малим у порівнянні із лінійною складовою відновлюючої сили, тобто  $\max R_i \left( \frac{\partial u_i(x_i, t)}{\partial t} \right) \ll \max EA \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial x_i^2}$ ;

- матеріал каната має слабо виражені нелінійно пружні властивості, тобто,  $k \ll 1$ ;

- лінійні переміщення крайніх правих (вертикальних точок) є малими.

У дослідженні динамічного процесу горизонтальних та вертикальної віток (КСК) дозволяє представити диференціальні рівняння [13] та ввести малий параметр та подати їх у вигляді:

$$\frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial t \partial x_i} - \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right) \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial x_i^2} = \mu f_i \left( u_i, \frac{\partial u_i(x_i, t)}{\partial t}, \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial x_i^2}, g \right) \quad (1)$$

де  $\mu = \frac{k}{m_0}$  – малий параметр,  $\vartheta = \frac{\pi}{l}Vt - \varphi_0$ , функції  $f_i\left(u_i, \frac{\partial u_i(x_i, t)}{\partial t}, \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial x_i^2}, \vartheta\right)$  приймають

вигляд:

$$f_1(u_1, \dots, \vartheta) = \frac{1}{m_0} EA \left( k \left( \frac{\partial^2 u_1(x_1, t)}{\partial x_1^2} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 u_1(x_1, t)}{\partial x_1^2} - \frac{1}{km_0} R_1 \left( \frac{\partial u_1(x_1, t)}{\partial t} \right) - \frac{m_1}{m_0} S(u_1(x_1, t)) \cos \left( \frac{\pi}{2l} (x_1 - Vt) + \varphi_0 \right),$$

$$f_2(u_2, \dots, \vartheta) = \frac{1}{m_0} EA \left( k \left( \frac{\partial^2 u_2(x_2, t)}{\partial x_2^2} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 u_2(x_2, t)}{\partial x_2^2} - \frac{1}{km_0} R_1 \left( \frac{\partial u_2(x_2, t)}{\partial t} \right) - \frac{m_1}{m_0} S(u_2(x_2, t)) \cos \left( \frac{\pi}{2l} (x_2 - Vt) + \varphi_0 \right),$$

$$f_3(u_3, \dots, \vartheta) = \frac{1}{m_0} EA \left( k \left( \frac{\partial^2 u_3(x_3, t)}{\partial x_3^2} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 u_3(x_3, t)}{\partial x_3^2} - \frac{1}{km_0} R_1 \left( \frac{\partial u_3(x_3, t)}{\partial t} \right) - \frac{m_1}{m_0} S(u_3(x_3, t)) \cos \left( \frac{\pi}{2l} (x_3 - Vt) + \varphi_0 \right) +$$

$$+ \frac{m}{k} g \int_0^{x_3-Vt} m_1(x) dx, S(u(x, t)) = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t \partial x}$$

Отримані нелінійні диференціальні рівняння відрізняються лише крайовими умовами та правими частинами, які пропорційні малому параметру  $\mu$ . Такі системи називають системами із малою нелінійністю. Для них найбільш ефективними методами дослідження є методи в основу яких покладені основні ідеї методів збурень [12, 19-21] в тому числі асимптотичні методи нелінійної механіки [8] чи їх модифікації [11]. Базою для їх застосування є існування у явному вигляді розв'язку відповідних незбурених ( $\mu = 0$ ) крайових задач, тобто розв'язку рівняння.

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t \partial x} - \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

за однорідних крайових умов

$$u(x, t)|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$u(x, t)|_{x=L} = 0.$$

Примітка. Незбурені рівняння, які відповідають (1) відрізняються тільки індексами, тому у (2) та крайових умовах (3) вони опущені.

На перший погляд, знайти аналітичний розв'язок вказаних рівнянь не становить значних труднощів. Однак для інтегрування рівнянь вказаного типу не можна застосувати відомі класичні методи Фур'є та Д'Аламбера [17, 18]. Перешкодою для їх застосування є наявність у рівнянні (2) мішаної похідної за часовою та лінійною змінними  $\left( \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t \partial x} \right)$ . Ця похідна враховує вплив сталої

складової швидкості поздовжнього руху на динамічний процес. Одночасно нехтування цим доданком у рівняннях руху може привести неточностей як при визначенні основних характеристик коливального процесу канатного робочого органу, так і динамічних зусиль у ній. Тому нижче зупинимось коротко на використанні хвильової теорії руху [9, 10, 14] при дослідженні динаміки поздовжньо-рухомих суцільних середовищ

Базою для визначення впливу наведеної множини параметрів на динамічний процес може служити залежність (2). Покажемо, що її можна подати у вигляді

$$u(x, t) = a [\cos(Kx + \Omega t + \varphi) - \cos(Hx - \Omega t - \varphi)], \quad (4)$$

де  $a, \varphi$  – сталі,  $K, H$  – хвильові числа прямої і відбитої хвилі,  $\Omega$  – власна частота процесу.

Якщо представлення (4), що є розв'язком рівняння (2), то мають справджуватись дисперсійні співвідношення

$$\Omega^2 + 2VK\Omega - \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right) K^2 = 0,$$

$$\Omega^2 - 2VH\Omega - \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right) H^2 = 0 \quad (5)$$

та крайові умови (3). Вказані крайові умови еквівалентні тотожності

$$\cos(KL + \Omega t + \varphi) - \cos(HL - \Omega t - \varphi) \equiv 0. \quad (6)$$

Вона має справджуватись для довільного значення параметру  $t$ . Це рівнозначно тому, що коефіцієнти при  $\sin \Omega t$  та  $\cos \Omega t$  у виразі, який випливає із (6), рівні нулеві. Тобто

$$\begin{aligned} \cos KL - \cos HL &= 0, \\ \sin KL + \sin HL &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Система тригонометричних рівнянь (7) зв'яже хвильові числа та параметр  $L$  формулою

$$K + H = \frac{2k\pi}{L}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Дисперсійні співвідношення (6) разом із отриманою вище залежністю визначають невідомі хвильові числа та частоту процесу як функції геометричних, кінематичних та фізико-механічних параметрів у вигляді

$$K = \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \sqrt{\frac{EA}{m_0}} + V \right)}, \quad H = \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \sqrt{\frac{EA}{m_0}} - V \right)}, \quad \Omega = \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right)}. \quad (9)$$

На рис.1 представлено залежність хвильових чисел  $K$ ,  $H$  та частоти власних коливань  $\Omega$  від швидкості переміщення сипкого середовища  $V$  та довжини труби за різних значень параметрів  $L$  та  $m_0$ .

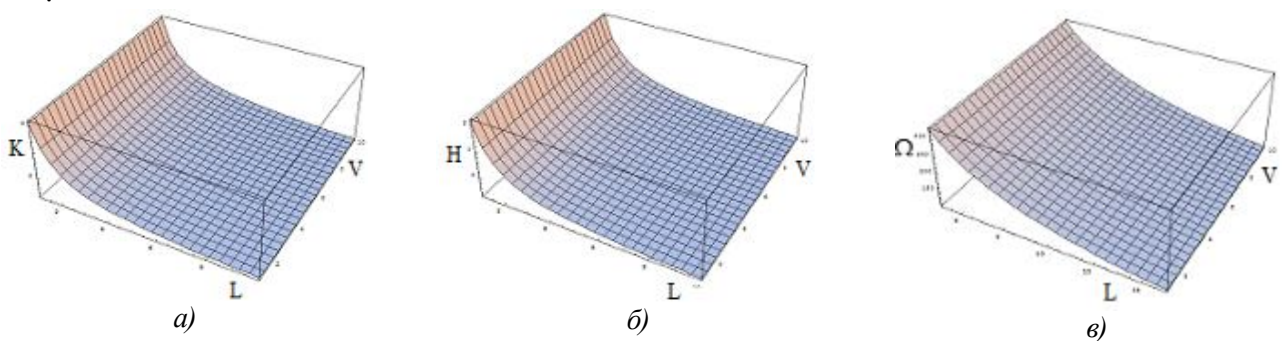


Рис. 1. Залежність хвильових чисел та частоти від швидкості руху каната та довжини труби канатного скребкового конвеєра [23]: при а)  $m_0 = 15 \text{ кг/м}, E = 0.8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2, d = 0.008 \text{ м}$ ,

б)  $m_0 = 30 \text{ кг/м}, E = 0.8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2, d = 0.008 \text{ м}$ , в)  $m_0 = 60 \text{ кг/м}, E = 0.8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2, d = 0.008 \text{ м}$

Отримані графічні залежності показують:

по-перше, для більших значень швидкостей переміщення сипкого середовища хвильове число прямої хвилі є меншим, а для зворотної – більшим;

по-друге, власна частота канатного робочого органу для більших значень швидкості її руху є меншою;

по-третє, що стосується погонної маси, то для більших її значень хвильові числа є більшими, а частота – меншою;

по-четверте, за швидкості руху робочого органу  $V = \sqrt{\frac{EA}{m_0}}$  проходить зрив коливань (частота

поздовжніх коливань рівна нулеві).

Одночасно залежності (3) та (9) дозволяють представити одночастотні та багаточастотні динамічні процеси канатного робочого органу відповідно у вигляді

$$\begin{aligned} u(x,t) &= a \left\{ \cos \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right)} \left( \frac{\sqrt{m_0} x}{\sqrt{EA} - \sqrt{m_0} V} + t + \varphi \right) - \cos \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right)} \left( \frac{\sqrt{m_0} x}{\sqrt{EA} - \sqrt{m_0} V} - t - \varphi \right) \right\} \\ u(x,t) &= \sum_{k=1} a_k \left\{ \cos \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right)} \left( \frac{\sqrt{m_0} x}{\sqrt{EA} - \sqrt{m_0} V} + t + \varphi_k \right) - \cos \frac{k\pi}{L} \sqrt{\frac{m_0}{EA} \left( \frac{EA}{m_0} - V^2 \right)} \left( \frac{\sqrt{m_0} x}{\sqrt{EA} - \sqrt{m_0} V} - t - \varphi_k \right) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

Відзначимо, параметри  $a_k$  та  $\varphi_k$  знаходяться із початкових умов і така задача може бути предметом окремого дослідження. Що стосується одночастотного розв'язку (перше із наведених вище співвідношень), то він буде служити базою для дослідження впливу нелінійних сил (у тому

числі й сили опору), крайових умов на динамічний процес транспортування сипкого середовища. Підставою для такого дещо спрощеного, із математичної сторони підходу, дає принцип одночастотності нелінійних коливань у механічних системах із зосередженими масами та розподіленими параметрами [3,11,22]. Такий розгляд коливань у робочому органі, який переміщає сипке середовище, дозволяє отримати залежності для оцінки впливу всього спектру чинників урахованих у математичній моделі на амплітуду та частоту її поздовжніх коливань.

#### Висновки.

1. Проведено дослідження динамічного процесу робочого органу (КСК), який переміщає сипке середовище, що дозволяє проаналізувати вплив швидкості руху та різної природи сил та крайових умов на закони зміни амплітудно-частотної характеристики.

2. За лінійної постановки задачі частота (період) коливань робочого органу залежить лише від фізико-механічних характеристик, швидкості поздовжнього руху та крайових умов, геометричних розмірів. У той же час у нелінійній – як від вказаної вище низки параметрів, так і від амплітуди коливань, причому, зі зростанням амплітуди коливань частота зростає для жорстких систем, а для м'яких – спадає.

1. Андронов И.В. Неквазилинейная асимптотика задач о колебаниях балок и пластин на нелинейном упругом основании / Андронов И. В., Буланова Н. С. // Доп. НАН України. – К., 1995. – № 9. – С. 28–30.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – М.: Наука, 1965. – 560 с.
3. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Боголюбов Николай Николаевич, Митропольский Юрий Алексеевич. – М.: Наука, 1974. – 501 с.
4. Блякьер О. Анализ нелинейных систем / Блякьер О. – М.: Наука, 1969. – 275 с.
5. Гробов В. А. Асимптотические методы расчета изгибных колебаний валов турбомашин / Гробов Валериан Александрович. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 165 с.
6. Доценко П.Д. О колебаниях и устойчивости прямолинейного трубопровода / Доценко П.Д. // Прикладная механика. – 1971. – Вып. 3. – С. 85–91.
7. Кузьо І.В. Вплив поздовжнього руху на поперечні коливання нелінійних пружних систем / Кузьо І.В., Сокіл Б.І. // Вибрації в техніці та технологіях. – 2000. – № 2 (14). – С. 44–46.
8. Митропольский Ю.А. Асимптотические решения уравнений в частных производных / Ю.А. Митропольский, Б.И. Мосеенков. – К: Вища школа, 1976. – 589 с.
9. Митропольский Ю.А. О построении асимптотического решения возмущенного уравнения Клейна-Гордона / Митропольский Ю.А. // Укр. мат. журн. – 1995. – 47, № 9. – С. 1209–1216.
10. Митропольский Ю.А. О построении асимптотического решения возмущенного уравнения Брезертона / Митропольский Ю.А. // Укр. мат. журн. – 1998. – 59, №1. – С. 58–71.
11. Митропольский Ю.О. Про застосування Ateb-функцій для побудови асимптотичного розв'язку збуреного нелінійного рівняння Клейна-Гордона / Митропольский Ю.О., Сокіл Б.І. // Укр. мат. журн. – 1998. – 50, № 5. – С. 665–670.
12. Коул Дж. Методы возмущений в прикладной математике / Джулиан Коул; [пер. с англ. А. И. Державиной и В. Н. Дясперова. Под ред. [и с предисл.] О. С. Рыжова]. – М.: Мир, 1972. – 276 с.12
13. Ляшук О.Л. Математичні моделі динамічного процесу горизонтальних та вертикальної віток каната трубчастого скребкового конвеєра / Б.М. Гевко, О.Л. Ляшук // Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Механізація і електрифікація сільського господарства» Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». Глеваха, Київська обл. Вип. 98, 2013. – С.501-509.
14. Chen L.Q. Nonlinear parametric vibration of axially moving beams: asymptotic analysis and differential quadrature verification/ Li-Qun Chen, Bo Wang, Hu Ding// Journal of Physics: Conference Series 181 (2009), – P.1-8
15. Харченко Є. Багаточастотні коливання одновиірних нелінійно пружних рухомих середовищ та методика побудови асимптотичних наближень крайових задач, що їх описують / Є. Харченко, М. Сокіл // Машинознавство. Всеукраїнський щомісячний науково-технічний і виробничий журнал. – 2007. – № 1. – С. 19–25.
16. V. Wan der Pol. A Theory of the Amplitude of Free and Forced Triode Vibrations // Radio Review. –1920. – № 1.
17. Курант Р. Уравнения с частными производными / Курант Р.; [пер. с англ. Т. Д. Вентцель. Под. ред. О. А. Олейник]. – М.: Мир, 1964. – 830 с.
18. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Тихонов А.Н., Самарский А.А. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
19. Моделювання динаміки вібраційних оброблювальних машин з дебалансним віброзбудником / [Стоцько З. А., Сокіл Б.І., Боровець В.М., Топільницький В.І.] // Автоматизація технологічних процесів та виробництва в машинобудуванні та приладобудуванні. – 1999. – № 34. – С. 39–45.
20. Стоцько З.А. Нелінійна модель руху шару середовища робочого контейнера вібраційних машин об'ємного оброблення виробів зі змінним параметром нелінійності / Стоцько З.А., Сокіл Б.І., Топільницький В.І. // Машинознавство. – 2001. – № 1 (43). – С. 19–23.
21. Stotsko Z. Das Nonlinearparametrischmodell der Dreimassenmaschiennen für die Vibrations volumen behandlung und ihre Streuladung / Stotsko Z., Sokil B., Topilnytskyj V. // Maszyny dzwigowo-transportowe. – 2000. – № 3. – P. 50–62.
22. Chen L.Q. Dynamic stability of an axially moving viscoelastic beam / L.Q. Chen, X.D. Yang, C.J. Chng // European journal of mechanics a solids. – 2004. – Volume 23. – P. 659–666.
23. Пат. №54102 Україна, МПК В65G 33/00. Гнучкий канатний конвеєр. Заявники: Ляшук О.Л., Гевко Б.М., Стефанів В.М., Олексин О.В., Комар Р.В., Гевко І.Б., Дячун А.Є. патентовласник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя – № u201005330; заявл 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. №20.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

УДК: 502.17+504.61

**О.М. Мандрик***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ПРИ  
ТРАНСПОРТУВАННІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**

*Наведено методологічну базу процедури оцінювання впливів магістральних газопроводів на безпеку життєдіяльності та навколишнє середовище. Оцінено екологічні впливи етапів будівництва та експлуатації газопроводів з констатацією основних різновидів екологічних факторів та можливими альтернативами для їх розгляду у проектах будівництва. Узагальнена класифікація впливів та наслідків газотранспортної інфраструктури за чинниками навколишнього середовища та методами їх зменшення. Як метод контролю за станом навколишнього середовища пропонується використовувати моніторингові дослідження з ГІС-технологіями.*

*Ключові слова:* екологічна безпека, навколишнє середовище, газопроводи.

*Табл. 1. Літ. 7.*

**О.М. Мандрык****ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ  
ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

*Приведена методологическая база процедуры оценивания влияния магистральных газопроводов на безопасность жизнедеятельности и окружающую среду. Оценены экологические влияния этапов строительства и эксплуатации газопроводов с констатацией основных разновидностей экологических факторов и возможными альтернативами для их рассмотрения в проектах строительства. Обобщенная классификация влияний и последствий газотранспортной инфраструктуры по факторам окружающей среды и методам их уменьшения. Как метод контроля за состоянием окружающей среды предлагается использовать мониторинговые исследования с ГИС-технологиями.*

*Ключевые слова:* экологическая безопасность, окружающая среда, газопроводы.

**О.М. Mandryk****EFFECT EVALUATION ON THE ENVIRONMENT AT NATURAL GAS TRANSPORTING**

*It has been given the methodology of main gas pipelines effect evaluation on the vital activity and environmentsafety. It has been evaluated the ecological influences of construction stages and gas pipelines operation with statement of the basic ecological factors and possible alternatives in the construction designs. It has been generalized the classification of gas-transport infrastructure effects due to the factors of environment and methods of its abatement. It has been suggested to use the monitoring research with GIS-technologies as the control method for the environment.*

*Keywords:* ecological safety, environment, gas-pipelines.

**Вступ.** Проблеми екологічної безпеки виникають в різних галузях промисловості та в різних економічних регіонах нашої держави [1]. До екологічно-небезпечних об'єктів у нафтогазовій галузі відноситься газотранспортна інфраструктура [2].

Базуючись на результатах досліджень, пропонується методологія проведення процедури оцінювання впливів на навколишнє середовище (ОВНС) для екологічного безпечного транспортування природного газу, а також алгоритм розрахунку еколого-економічних збитків наслідків надзвичайних ситуацій при транспортуванні природного газу.

Проекти в галузі будівництва та експлуатації газопроводів передбачають прокладку трубопроводів на суші, в прибережній зоні та відкритому морі. Діаметр труб може досягати 2,0 м. Протяжність трубопроводів коливається від кількох до сотень кілометрів. Трубопроводи, споруджені на суші і в прибережній зоні, як правило, заглиблені в ґрунт. Морські трубопроводи прокладаються на ділянках глибиною 350-450 м, проте в особливих випадках – на глибинах понад 1500 м [3-5].

**Матеріали дослідження.** До складу основних споруд газотранспортної інфраструктури входять: трубопроводи; головні та проміжні компресорні станції, прийомні й розподільні станції, а також станції управління; під'їзні дороги або дороги, призначені для технічного обслуговування [3]. Для підтримки робочого тиску природного газу вздовж траси магістрального газопроводу споруджують з відповідними інтервалами лінійні газокомпресорні станції.

Будівництво трубопроводів на суші включає наступні етапи: проведення інженерно-геологічних вишукувань, розчищення траси, прокладання траншей, укладання труб уздовж траси трубопроводу, згинання труб, зварювання, обгортання полімерними стрічками, нанесення ізоляційних покриттів, встановлення систем катодного захисту від корозії, укладку труб у траншеї,

засипку траншей. Такі ж заходи здійснюються при будівництві трубопроводів на території водно-болотних угідь, проте виникає необхідність у проведенні земельних робіт і вивезенні ґрунту. На ділянках, де ґрунти перенасичені вологою для нарощування секцій труб зварюванням і укладання трубопроводу в траншеї використовують спеціальні трубоукладальні баржі.

При прокладанні трубопроводів у відкритому морі їх розташовують на дні. Покладений на дно морський трубопровід може бути закріплений за допомогою анкерних пристроїв – бетонних блоків, плит і т.д. Якщо трубопровід заглиблений, то необхідна прокладка траншей. Для прокладання трубопроводів застосовують трубоукладальні судна. Для розкопки траншей в морському дні використовуються підводні землекопальні машини. Найчастіше при укладанні морських трубопроводів вважається, що траншеї будуть поступово засипатися в результаті впливу природних процесів – хвилювання і течій, однак можна проводити і штучну засипку підводних траншей. У прибережних районах акваторії, а також у районах, де існує ймовірність зсувів і обвалів, трубопроводи обов'язково повинні бути заглибленими.

Для забезпечення безперебійної роботи магістральних трубопроводів необхідно приділяти особливу увагу технічному обслуговуванню та перевірці обладнання. Для виявлення витоків необхідно проводити періодичні перевірки стану трубопроводу по всій трасі. Захист від корозії необхідний в більшості ґрунтів, особливо в районах з вологими або засоленими ґрунтами. Витоки з газопроводів або розриви труб можуть негативно вплинути на стан навколишнього середовища далеко за межами траси [6].

**Можливі різновиди впливу газопроводів на навколишнє середовище.** Вплив господарської діяльності на навколишнє середовище – це екологічні наслідки, які відбуваються у складових докільля при господарюванні об'єктів та поділяються на: прямі та непрямі, позитивні та негативні, коротко- та довгострокові, інтегральні та залишкові [2,6,7].

Вважають, що газопроводи сприяють покращенню якості навколишнього середовища, оскільки роблять більш доступними екологічно чисті види палива (наприклад, низько сірчистий природний газ замість високо сірчистого вугілля), що використовуються на електростанціях або у промислових процесах. Незаглиблені підводні трубопроводи можуть служити середовищем існування для морських організмів, яких приваблює новий „штучний риф”.

Але газопроводи, прокладені у відкритому морі, в прибережній зоні акваторії та на суші, негативно впливають на навколишнє середовище. Масштаб негативного впливу залежить від того, наскільки постраждали природні ресурси та погіршилися соціальні умови.

У процесі прокладання морського трубопроводу може відбутися тимчасове скаламучення осадів. У результаті перерозподілу і повторного відкладання осадів можуть змінитися характеристики водних середовищ існування та склад фауни. Ступінь впливу залежить від типу порушених водних організмів та їх ролі в екосистемі.

Якщо розкопка траншей для прокладання підводного трубопроводу здійснюється в тих районах прибережної зони або відкритого моря, де відбувалося накопичення токсичних хімічних речовин в донних осадах (наприклад, якщо порт розташований поблизу місць, куди промислові підприємства скидають різні отруйні речовини), прокладання трубопроводу може викликати скаламучення, перерозподіл цих забруднених осадів і тимчасове погіршення якості води. Може статися акумуляція забруднювачів тканинами водних організмів.

Прокладка трубопроводів здатна викликати ерозію ґрунтів на сусідніх ділянках. На гористій місцевості вона може викликати порушення стійкості ґрунтів, зсуви і обвали. Стік і відкладання мулу можуть погіршити якість річкової води під час виконання будівельних робіт [3,5].

Прокладка трубопроводів і будівництво доріг, необхідних для технічного обслуговування, можуть призвести до зміни умов природного дренажу, в тому числі перекриттю потоку води та підйому рівня ґрунтових вод з того боку трубопроводу, який проходить вгору по похилій поверхні; може також спостерігатися погіршення стану і загибель рослин. Якщо трубопровід прокладено через лісовий масив, збиток може виявитися досить серйозним.

У освоєних районах будівництво газопроводів може призвести до таких негативних наслідків, як втрата земель, порушення методів землекористування, необхідність переселення людей. Деякі види сільськогосподарської діяльності можуть виявитися порушеними лише протягом короткого часу, в період будівництва [2,6].

Виникнення тріщин, розривів і витоків, а також утворення відходів на магістральних газопроводах здатні викликати забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод. Масштаби збитків залежать від типу і розміру витоків, виду та кількості відходів, що утворюються, а також від того, наскільки постраждали природні ресурси [6]. Якщо відбудеться розрив газопроводу, який

перетинає річки та інші водні об'єкти або водно-болотні угіддя, то довіллю буде завдано величезної шкоди.

В результаті витоків газу з магістрального газопроводу або розриву труб можуть виникати пожежі та вибухи. У освоєних районах подібні аварії є серйозною небезпекою для життя і здоров'я людей.

Базуючись на власному досвіді проведення робіт з ОВНС була розроблена узагальнена класифікація впливів та наслідків за чинниками навколишнього середовища та методами зменшення впливу та наслідків газотранспортної інфраструктури (табл. 1).

**Таблиця 1. Узагальнена класифікація впливів та наслідків за чинниками навколишнього середовища та методами зменшення впливу та наслідків газотранспортної інфраструктури**

Види потенційного збитку	Заходи щодо запобігання або зменшення збитків
Прямий екологічний збиток	
<p>1. Скаламучення осадів, забруднених токсичними речовинами, при прокладці морських підводних трубопроводів.</p> <p>2. Створення перешкод для рибальства в результаті прокладки морських трубопроводів.</p>	<p>1. Вибір іншої ділянки для прокладки трубопроводу:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– використання альтернативних методів будівництва трубопроводу, що дозволяють зменшити скаламучення осадів (наприклад, не заглиблених морських трубопроводів замість їх укладання в підводні траншеї);</li> <li>– прокладка трубопроводу в період мінімальної циркуляції води.</li> </ul> <p>2. Прокладка траси трубопроводу осторонь від відомих районів рибного промислу:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– позначення місцезнаходження морських трубопроводів спеціальними буями та нанесення його па карти;</li> <li>– заглиблення трубопроводів в ґрунт, якщо вони знаходяться в найважливіших районах рибного промислу.</li> </ul>
<p>3. Пошкодження або знищення місць існування, загибель тварин, птахів, водних організмів на ділянках суші або акваторії, де розташовані трубопроводи, насосні та газокompресорні станції; полегшення доступу людей у райони первозданної природи.</p> <p>4. Ерозія, твердий стік, відкладення наносів в результаті будівництва трубопроводу і виробництва планувальнопрофільовочних робіт з метою будівництва під'їзних доріг та перекачувальних газокompресорних станцій.</p> <p>5. Зміна гідрологічних умов.</p> <p>6. Вторгнення видів-екзотів і розчленовування місць існування на малі ділянки.</p> <p>7. Порушення схеми землекористування в результаті будівництва</p>	<p>3. Прокладка траси трубопроводу осторонь від районів, що володіють цінними природними ресурсами:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– застосування найбільш підходящих методів розчищення траси від рослинності (наприклад, розчищення вручну замість механізованої розчистки), що дозволить зберегти рослинний покрив на ділянках, прилеглих до трубопроводу;</li> <li>– рекультивация пошкоджених ділянок;</li> <li>– використання альтернативних методів будівництва трубопроводу.</li> </ul> <p>4. Вибір траси трубопроводу з таким розрахунком, щоб не було завдано шкоди водним об'єктам і гористій місцевості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– облаштування пісковловлювачів або екранів для регулювання твердого стоку і боротьби з відкладенням наносів;</li> <li>– застосування альтернативних методів прокладки трубопроводів, що дозволяють звести збиток до мінімуму;</li> <li>– закріплення ґрунтів механічними або хімічними способами для зменшення ймовірності ерозії.</li> </ul> <p>5. Прокладка траси осторонь від водно-болотних угідь і заплав:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– мінімальне використання насипного ґрунту;</li> <li>– проектування дренажних споруд з таким розрахунком, щоб не було завдано шкоди сусіднім районам.</li> </ul> <p>6. Прокладка траси і пристрій смуги відчуження трубопроводу в стороні від найважливіших районів</p>



трубопроводів, перекачувальних і газокompресорних станцій.	первозданної природи і легковразливих місць існування: – збереження рослинного покриву над заглибленим трубопроводом; – створення умов для того, щоб не було порушено закономірний розподіл ландшафтних пожеж вчасно і на певній території.
<p>8. Проектування трубопроводу з таким розрахунком, щоб можна було зменшити ширину смуги відчуження.</p> <p>9. Зведення до мінімуму шкоди, завданої в процесі будівництва методом використання сусідніх ділянок.</p> <p>10. Рекультивация ділянок, пошкоджених при будівництві підземного трубопроводу.</p> <p>11. Створення перешкод для людей і тварин.</p> <p>12. Збільшення інтенсивності руху транспорту в результаті виконання будівельних робіт.</p> <p>13. Хімічне забруднення середовища, викликане утворенням відходів і випадковими або аварійними розливами нафти.</p> <p>14. Небезпека, викликана витоком газу з трубопроводу або розриву труб.</p> <p>15. Встановлення систем сигналізації, що сповіщають населення про аварії.</p>	<p>7. Вибір траси і облаштування смуги відчуження з таким розрахунком, щоб це не стало на заваді використанню сільськогосподарських угідь і не завдало шкоди використанню земельних ділянок в інших цілях.</p> <p>8. Прокладка траси трубопроводу осторонь від основних маршрутів пересування людей і диких тварин.</p> <p>9. Прокладка трубопроводу на високих опорах або естакадах чи заглиблення його в ґрунт.</p> <p>10. Поетапне проведення робіт з метою регулювання інтенсивності використання транспортних засобів.</p> <p>11. Складання планів заходів щодо запобігання розливів нафти і утворення відходів, а також з очищення територій: – використання методів локалізації нафтового розливу; – очищення та рекультивация постраждалих територій.</p> <p>12. Чітке позначення місцезнаходження підземних газопроводів в районах з високою щільністю населення та інтенсивним рухом транспорту: – розробка планів екстреної евакуації людей при аварійних ситуаціях. – моніторинг з метою виявлення витоків.</p>
Не прямий екологічний збиток	
<p>1. Стимульована (вторинна) забудова територій, розташованих поблизу району виконання будівельних робіт.</p> <p>2. Полегшення доступу в райони первозданної природи.</p>	<p>1. Складання комплексного плану розміщення споруд, що створюються в процесі стимульованої забудови.</p> <p>2. Будівництво будівель та споруд, надання фінансової допомоги існуючим об'єктам інфраструктури.</p> <p>3. Складання планів охорони і раціонального використання цих районів.</p> <p>4. Створення перешкод (наприклад, влаштування огорожі та парканів).</p>

**Можливі альтернативи для розгляду у проектах будівництва та експлуатації газопроводів.** За вітчизняними та міжнародними вимогами щодо проведення процедур ОВНС для кожного об'єкту проектування необхідним є генералізація комплексу альтернатив, які в загальному діють як засіб досягнення мети проекту [1, 7].

Екологічна оцінка газопроводів повинна включати в себе аналіз прийнятних альтернатив, які забезпечили б досягнення кінцевої мети проекту. Завдяки аналізу можна буде знайти рішення, більш сприятливі в економічному, соціальному та екологічному плані, ніж запропонований проект.

Ґрунтуючись на аналізі літературних джерел, а також власному досвіді пропонується у проектах, які стосуються газотранспортної системи України розглядати наступні альтернативи:

- 1) „нульовий” варіант (тобто вивчити можливості відмови від будь-яких заходів, спрямованих на забезпечення необхідної пропускної спроможності магістральних трубопроводів);
- 2) інший принциповий підхід до вирішення проблеми доставки природного газу (наприклад, танкерами або суднами для перевезення скрапленого газу);
- 3) покращення технічного стану магістральних трубопроводів;
- 4) вибір інших трас і ділянок під компресорні станції;
- 5) застосування альтернативних методів будівництва трубопроводів, що забезпечують, зокрема, скорочення витрат і підвищення експлуатаційної надійності обладнання;
- 6) внесення змін у конструкцію і використання інших матеріалів (наприклад, будівництво підземних трубопроводів замість надземних).

Питання про доцільність тієї чи іншої альтернативи необхідно розглядати з врахуванням екологічних та економічних чинників. З огляду на те, що газопроводи є лінійними спорудами, одна з найважливіших альтернатив – вибір траси. Завдяки ретельному і добре продуманому вибору траси, можна попередити або зменшити багато видів екологічного збитку, викликаного будівництвом і експлуатацією магістральних газопроводів.

**Комплексні природоохоронні заходи.** Вимоги щодо екологічного моніторингу повинні залежати від типу ресурсів навколишнього середовища, порушеннях у процесі будівництва та експлуатації газопроводів та ступенів завданої цим ресурсам шкоди. Екологічний моніторинг будівельних робіт може забезпечити використання найбільш раціональних методів і виконання всіх спеціальних вимог, які дозволять попередити або зменшити екологічний збиток, а при виявленні шкоди – негайно вжити заходів щодо його ліквідації. Необхідно також здійснювати моніторинг на складах матеріалів, ділянках для ремонту обладнання, в селищах будівельників. Методи моніторингу можуть бути різними – від зовнішнього огляду пристроїв і споруд, призначених для зменшення екологічного збитку (наприклад, пісковловлювачів і відстійників) до більш дорогої перевірки якості води при прокладанні трубопроводу через водні об'єкти або поблизу них. Якщо в процесі будівництва трубопроводу виникає вірогідність забруднення води, скаламученої токсичними речовинами, може знадобитися виконання великої програми біологічного та хімічного моніторингу.

**Висновки.** Екологічний моніторинг повинен проводитися до початку робіт з прокладання трубопроводу, в процесі цих робіт і протягом певного часу після їх закінчення. Мета цієї програми моніторингу буде залежати від ступеня і тривалості повторного забруднення водного об'єкту токсичними речовинами. Моніторинг експлуатаційних параметрів газопроводів необхідний для того, щоб можна було забезпечити безперебійну роботу обладнання або виявити несправності, які призводять до витоку газу або розриву труб.

Одним з видів екологічного менеджменту є географічна інформаційна система визначення сучасної екологічної ситуації в межах магістральних газопроводів та визначення ареалів забруднення і загазованості витоками з трубопроводів на математичних моделях, а також прогнозування екологічного ризику при аварії на ділянці магістрального газопроводу.

1. Оцінка регіональних еколого-ресурсних та еколого-техногенних загроз національній безпеці України / Є. О. Яковлев, Ю. М. Скалецький, С. П. Іванюта, Л. М. Якушенко. – 2-е вид. доп. – К.: НІСД, 2011. – 32 с.
2. Кесельман Г. С. Защита окружающей среды при добыче, транспорте и хранении нефти и газа / Г. С. Кесельман, Э. А. Махмудбеков. – М.: Недра, 1981. – 256 с.
3. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила: СНиП 2.05.06-85\*. – [Действителен с 1996-11-10]. – М.: ВНИИСТ Миннефтегазстроя, 1997. – 46 с.
4. Сучасні технології спорудження нафтогазопроводів / М. В. Панчук, Л. С. Шлапак, І. М. Сем'яник, [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ – 2009. – №3 (32) – С. 66–71.
5. Крижанівський Є. І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: [наук.-техн. посіб. у 3-х т.] / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ – Львів: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2012. – Т. 3: Деградація трубопроводів та її запобігання. – 2012. – 433 с.
6. Бородавкін П. П. Охрана окружающей среды при строительстве и эксплуатации магистральных трубопроводов / П. П. Бородавкін, Б. И. Ким – М.: Недра. 1981. – 170 с.
7. Основні принципи організації системи екологічного моніторингу довкілля у межах територій нафтогазових промислів Богородчанського району / Я. О. Адаменко, О. М. Мандрик, М. В. Знак [та ін.] // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2010. – №1. – С. 5-11.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2014.

УДК 621.822.681.2:369.64

**В.І. Марчук, Л.М. Равенець****МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОАКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЛИКОПІДШИПНИКА**

*Експлуатаційні властивості підшипників кочення залежать не тільки від якості матеріалу заготовок і розмірів складових деталей, а й від мікрогеометричних параметрів робочих поверхонь як то параметрів хвилястості та шорсткості доріжок кочення. В роботі розглядається методика моделювання вібрації підшипника та порівняння значень параметрів вібрації отриманих розрахунковим шляхом за допомогою математичного моделювання та шляхом експериментальних досліджень на віброакустичній установці DVK.*

*Наведена методика моделювання використовується для прогнозування віброакустичних підшипників на стадії характеристик технологічного проектування.*

*Ключові слова: вібропереміщення, віброшвидкості, віброприскорення.*

*Рис. 1. Табл. 1. Форм. 9. Літ. 4.*

**В.И. Марчук, Л.Н. Равенец****МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЛИКОПОДШИПНИКА**

*Эксплуатационные свойства подшипников качения зависят не только от качества материала заготовок и размеров составляющих деталей, но и от микрогеометрических параметров рабочих поверхностей то есть параметров волнистости и шероховатости дорожек качения. В работе рассматривается методика моделирования вибрации подшипника и сравнения значений параметров вибраций полученных расчетным путем с помощью математического моделирования и путем экспериментальных исследований на виброакустической установке DVK.*

*Приведенная методика моделирования используется для прогнозирования виброакустических подшипников на стадии характеристик технологического проектирования.*

*Ключевые слова: виброперемещения, виброскорости, виброускорения.*

**V.I. Marchuk, L.N. Ravenets****MODELING VIBROACOUSTICS CHARACTERISTICS ROLLER**

*Performance characteristics of rolling bearings depends not only on the quality of the material pieces and sizes of components parts, but also on working surfaces micro geometric parameters such as roughnesses and wavinesses parameters of the rolling track. In this paper describe the method of modeling vibration and bearing vibration compare parameter values obtained by calculations using mathematical modeling and by experimental research on vibro-acoustic installation DVK.*

*The technique of simulation is used to predict the vibroacoustic characteristics bearing on the stage of technological design.*

*Keywords: vibro moving, vibro speed, vibro acceleration.*

**Вступ.** Моделювання вібрацій будь-якої коливної системи передбачає розв'язок двох основних питань: по-перше, виявлення джерел та параметрів віброзбурення, тобто інформацію про сили, що викликають вібрацію; по-друге, про визначення динамічних властивостей коливної системи. В цьому зв'язку розглянемо вібрацію зовнішнього кільця роликового підшипника під час його випробування на віброакустичній установці DVK [3].

Опис постановки задачі про віброзбурення, що генерується роликовими підшипниками з технологічними похибками доріжок кочення кілець і роликів типу хвилястості в умовах осьового навантаження підшипника розглядається в [2]. Розв'язок задачі визначає зв'язок між спектрами хвилястості кілець і роликом з одного боку, і спектрами осьових, радіальних і кутових віброзбурень, що генеруються роликовими підшипниками, з іншого. Відповідні залежності для радіальних віброзбурень (спектр першого наближення) представлені в табл.1. На основі цілого ряду проведених експериментальних і теоретичних досліджень нами було встановлено, що радіальні віброзбурення викликають лише парні гармоніки хвилястості роликів і гармоніки хвилястості доріжок кочення кілець, номери яких відрізняються від кратних числу роликів  $z$  значень на  $\pm 1$ .

Опис задачі про динамічні властивості роликових підшипників у складі приводної установки розглядається в [1]. Показано, що вібрація, яка реєструється давачем, розташованим на зовнішньому кільці роликового підшипника, визначається коливаннями кільця, як абсолютно твердого тіла і його згинаючими коливаннями по перших формах, причому найбільш виражені резонанси, пов'язані із згинаючими коливаннями кільця. Отримана й експериментально перевірена наступна формула для власних частот коливань системи:

$$v_m^2 = \frac{5(m^2 - 1)^2}{36(1 + 1/m^2)} \tilde{v}_2^2 + \frac{\lambda}{1 + 1/m} \cdot \frac{C_x}{4\pi^2 M}, \text{кГц}^2,$$

де  $m$  - номер форми коливань ( $m=1$  відповідає коливанням кільця, як абсолютно твердого тіла);  $M$  – віброуюча маса, кг;  $\lambda=2$  при  $m \neq \frac{z}{2}q$ ;  $\lambda=0$  і  $\lambda=4$  при  $m = \frac{z}{2}q$ ;  $q=1,2,3,\dots$ ;  $\tilde{v}_2$  - власна частота другої форми згинаючих коливань вільного кільця, що розраховується за наступною наближеною формулою:

$$\tilde{v}_2^2 = 5,06 \cdot 10^3 \frac{D - d}{(D + d)^2}, \text{кГц}^2$$

де  $D, d$  - зовнішній і внутрішній діаметри зовнішнього кільця підшипника, мм;

$C_x$  - радіальна жорсткість підшипника, що розраховується по наступній наближеній формулі:

$$C_x = 3,75z^{2/3} D_p^{1/3} \sin^{5/3} \tau \text{ctg}^2 \tau (0,1F_0)^{1/3}, \text{Н/мкм},$$

де  $D_p$  – середній діаметр роликів, мм;

$F_0$  - осьове навантаження, Н.

Таблиця 1. Залежності для визначення радіальних вібрацій роликів підшипника

Елемент, що викликає збурювання	Номер гармоніки похибки	Частота збурювання	Амплітуда збурювання
Зовнішнє кільце	$\lambda = qz \pm 1$	$(\lambda \pm 1)\omega_1$	$C_x \alpha_\lambda$
Внутрішнє кільце	$x = qz \pm 1$	$\xi \omega_3 \pm \omega_1$	$C_x \alpha_x$
Ролик	$\xi = 2k$	$x\omega_2 \pm \omega_1$	$\frac{C_x}{\cos \tau} \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \alpha_\xi$

У табл.1  $\lambda, \chi, \xi$  – номери гармонік хвилястості доріжки кочення зовнішнього кільця, внутрішнього кільця і ролика;  $\alpha_\lambda, \alpha_\chi, \alpha_\xi$  - амплітуди відповідних гармонік;  $C_c$  – радіальна жорсткість підшипника;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  - кутові швидкості сепаратора відносно зовнішнього, внутрішнього кільця і ролика навколо власної осі.

Розглянемо радіальні коливання зовнішнього кільця, як абсолютно твердого тіла ( $m=1$ ). Якщо припустити, що амплітуди коливань малі щодо геометричного осьового натягу (для цього роликівий підшипник повинний бути навантажений досить великою осьовою силою  $F_0$ ), то систему можна вважати близькою до лінійної, рівняння радіальної вібрації кільця може бути представлено у вигляді:

$$\ddot{\chi} + 2h\dot{\chi} + \omega_p^2 \chi = \sum_j F_j \sin(\omega_j t + \Psi_j) / M, \quad (1)$$

де  $\chi$  – радіальне вібропереміщення кільця;

$\omega_p$  - власна частота,  $\omega_p^2 = (2\pi\nu_{m,1})^2 \cdot 10^6 = 10^6 K_\chi / M$ , рад/с;

$F_j, \omega_j, \psi_j$  – амплітуда, частота і фаза  $j$ -ої гармоніки віброзбурень, причому  $F_j$  і  $\omega_j$  зв'язані з хвилястістю доріжок кочення кільця і роликів залежностями, представленими в табл. 1.

Вібропереміщення зовнішнього кільця знаходиться розв'язком рівняння (1)

$$\chi = \sum_j F_j K_D(\omega_j) \sin(\omega_j t + \Psi'_j), \quad (2)$$

де  $K_D$  - коефіцієнт динамічності:

$$K_D(\omega_j) = \frac{1}{M \sqrt{(\omega_p^2 - \omega_j^2)^2 + 4h\omega_j^2}} \quad (3)$$

Апаратні засоби для контролю вібрації – аналізатори спектра – влаштовані таким чином, що дозволяють контролювати середньоквадратичні значення вібропереміщень, віброшвидкостей чи віброприскорень. З огляду на середньоквадратичний характер підсумовування окремих гармонік,

замість (2) варто використовувати наступні формули:

$$\begin{aligned} \xi &= \sqrt{\sum_j [F_j K_D(\omega_j)]^2}; \quad \xi = \sqrt{\sum_j [F_j K_D(\omega_j) \omega_j]^2}; \\ \xi &= \sqrt{\sum_j [F_j K_D(\omega_j) \omega_j]^2}; \end{aligned} \quad (4)$$

де підсумовування ведеться за всіма  $j$ , для яких  $\omega_j$  попадає в розглянутий діапазон частот.

Розглянемо радіальні коливання зовнішнього кільця з врахуванням його вигину. Середньоквадратичне значення віброприскорення зовнішнього кільця будемо розраховувати аналогічно (4):

$$\xi = \sqrt{\sum_j [F_j K_D(\omega_j) \omega_j]^2}; \quad (5)$$

де, однак, значення коефіцієнта динамічності  $K_D(\omega_j)$  будемо визначати не за формулою (3), а за наступною напівемпіричною залежністю:

$$\tilde{K}_D(\omega_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^{\ell} \frac{1}{M_m^2 [(\omega_m^2 - \omega_j^2)^2 + (2h_m \omega_j^2)]}}. \quad (6)$$

Тут  $\omega_m$  – власна частота  $m$ -ої форми коливань зовнішнього кільця  $\omega_m^2 = (2\pi\nu_m)^2 \cdot 10^6$ ;

$M_m$  – коефіцієнт, що характеризує інерційні властивості кільця ( $M_{m=1}=M$  – маса кільця з приєднаними до нього елементами);

$h_m$  – коефіцієнт демпфірування  $m$ -ої форми коливань;

$Q$  – число розглянутих форм коливань кільця.

У виразах для амплітуд гармонік віброзбурень  $F_j$  є постійний множник  $K_x$  – радіальна жорсткість роликів підшипника. Будемо вважати,

$$K_x / M_m = \omega_m^2,$$

що фізично виправдано для  $m=1$ , а для всіх інших значень  $m$  приймається гіпотетично. При цьому вираз для середньоквадратичного значення радіального віброприскорення кільця (5) буде мати вигляд:

$$\xi = \sqrt{\sum_j A_j^2 \sum_{m=1}^{\ell} \frac{1}{[(\omega_m / \omega_j - 1)^2 + (2h_m \omega_j)^2]}} \quad (7)$$

де  $A_j = F_j / K_x$ .

Моделювання амплітудного спектра віброприскорень роликів підшипника полягає в розрахунку значень  $\xi$  за формулою (7) для кожної частотної смуги спектра, тобто в підсумовуванні по  $j$ -тих амплітуд гармонік віброприскорень, частоти  $\omega_j$  яких попадають у відповідну смугу спектра. Невідомі коефіцієнти демпфування  $h_m$  варто визначати в ході обчислювального експерименту шляхом порівняння результатів моделювання з результатами вимірювань і відповідного корегування значень  $h_m$ .

За формулою (7) визначають вібраційну модель роликів підшипника, пов'язуючи між собою два типи спектрів. На вході моделі – амплітудні спектри технологічних похибок кілець  $\alpha_\lambda(\lambda)$ ,  $\alpha_\chi(\chi)$  і роликів  $\alpha_\xi(\xi)$ . Апаратним засобом вимірювання цих спектрів є кругломіри типу "Талиронд-73" з гармонійним аналізом круглограми.

Вихідним параметром моделі є амплітудний спектр радіальних віброприскорень зовнішнього кільця. Апаратними засобами вимірювання цього спектра є аналізатори спектра типів 2033 чи 2133 фірми "Брюль і К'єр" (Данія).

Основними труднощами, що виникають під час моделювання, є визначення амплітудних спектрів  $\alpha_\lambda(\lambda)$ ,  $\alpha_\chi(\chi)$  і  $\alpha_\xi(\xi)$ . Щоб задати ці спектри необхідно визначити амплітуди декількох десятків перших гармонік хвилястості поверхонь кілець і роликів, що на практиці

виявити проблематично через обмежену точність існуючих кругломірів (0,005 мкм) і спаданні амплітуд гармонік похибок з ростом їхніх номерів.

У зв'язку з цим задати спектри похибок можливо, використовуючи регресійні залежності наступного виду [4]:

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_1 / \lambda^{\beta_1}; \alpha_{\chi} = \alpha_2 / \chi^{\beta_2}; \alpha_{\xi} = \alpha_3 / \xi^{\beta_3}; \quad (8)$$

Коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  цих залежностей визначаються як коефіцієнти регресії шляхом статистичного оброблення результатів вимірювань профілів партій кілець і роликів і їхньої екстраполяції на високі номери гармонік, або на основі обчислювального експерименту шляхом порівняння результатів моделювання з результатами вимірювань спектрів вібрації конкретних роликів підшипників.

На основі такого підходу розроблені алгоритм і програма моделювання спектра радіальних віброприскорень зовнішнього кільця роликового підшипника в складі приводної установки "DVK" алгоритмічною мовою Бейсик. Приклад результатів моделювання спектра віброприскорень підшипника типу 7510 представлений на рис. 1а, на рис. 1б – експериментально встановлений спектр віброприскорень того ж підшипника, отриманий за допомогою аналізатора типу 2131 під час випробування підшипника в складі приводної установки DVK. Порівняння результатів моделювання з результатами вимірювання свідчить про їхню максимальну наближеність.

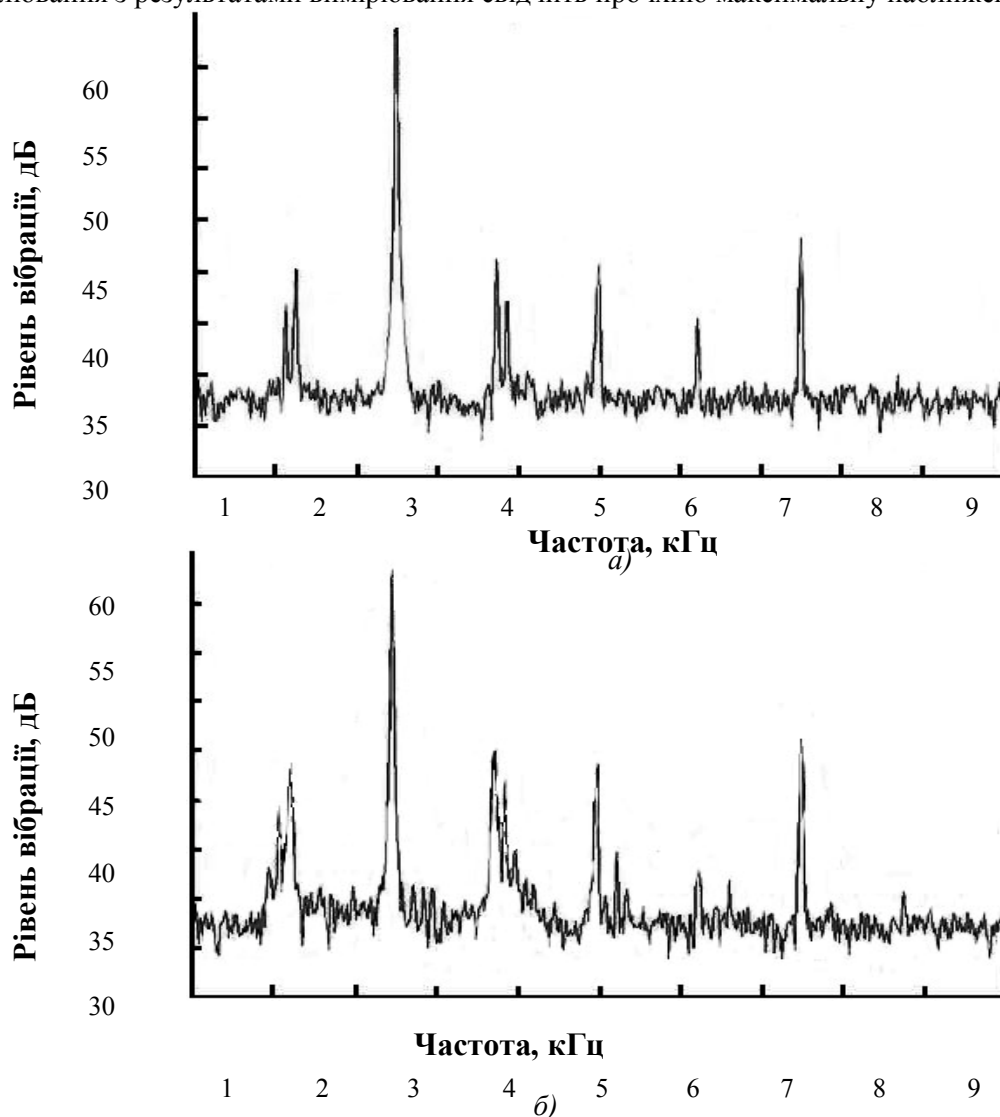


Рис. 1. Моделювання спектра віброприскорень

**Результати досліджень.** Проведено чисельне й експериментальне дослідження впливу частоти обертання на рівні вібрації підшипників типів 7505 і 7510 у стандартних октавних смугах частот і на загальний рівень вібрації в діапазоні частот 0-10 кГц. Моделювання спектрів вібрації в

октавних смугах частот проводилося з використанням модифікації програми "DVK", вимірювання спектрів вібрації в октавних смугах частот і загального рівня вібрації – на удосконаленій віброакустичній установці DVK, що забезпечує можливість регулювання частоти обертання в межах 600-3000 хв<sup>-1</sup>, з використанням аналізатора спектра типу 2131.

Аналіз результатів вимірювання спектрів віброприскорень роликів підшипників типів 7505 і 7510 дозволив одержати наступну регресійну залежність рівня вібрації від частоти обертання внутрішнього кільця:

$$A = A_0 \cdot N^{1,3}, \text{ м/с}^2, \quad (9)$$

де  $A_0$  – коефіцієнт, що залежить від конструкції і похибок підшипника, м/с<sup>2</sup>;

$N$  – частота обертання, хв<sup>-1</sup>.

Результати моделювання в певній мірі залежать від значень коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  (8), що апроксимує спектри похибок кілець і роликів. Безпосереднє визначення цих коефіцієнтів за результатами гармонійного аналізу круглограм виявилось неможливим у силу надзвичайно малих значень амплітуд високих гармонік спектрів похибок кілець і роликів високоточних підшипників. У той же час аналіз теоретичної моделі дозволив встановити наступну залежність між значеннями коефіцієнтів  $\beta$  залежностей (8) і ступенем залежності (9) рівня вібрації від частоти обертання кільця:

$$\delta = \beta - 0,5$$

У результаті для  $\delta=1,3$  маємо  $\beta=1,8$ .

Коефіцієнти  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  і  $\alpha_3$  вибиралися на основі чисельного експерименту, виходячи з того, щоб рівні вібрації, обумовленої похибками зовнішнього кільця, внутрішнього кільця і роликів, були приблизно однакові, а загальний рівень вібрації підшипників, одержаний у результаті моделювання, відповідав загальному рівню вібрації, який реєструється під час вимірювання.

Для наочності порівняння результати вимірювання і моделювання апроксимувалися різними видами регресійних залежностей з використанням стандартних підпрограм. Найкращий збіг з результатами експериментів і моделювання було отримано для регресійної залежності виду

$$y = a + b \ln x$$

Коефіцієнти кореляції регресійної залежності за результатами моделювання, а також регресійної залежності за результатами вимірювання близькі до одиниці. Відповідні регресійні залежності, а також дані моделювання й експериментів по трьох октавних смугах частот і загальному рівню вібрації представлені на рис. 2 На графіках значками + позначені результати моделювання, а значками 0 - результати вимірів.

Зіставлення представлених розрахункових і експериментальних залежностей свідчить про їхню максимальну наближеність, особливо в області високих частот. В області низьких частот результати моделювання і вимірювання узгоджуються значно гірше, ці недоліки пов'язані з тим, що у використаній програмі не враховується спектр вібрації першого наближення, який відіграє важливу роль в області низьких частот.

**Висновки.** Таким чином, за результатами виконаних досліджень можна констатувати:

– розроблений алгоритм і програма моделювання спектра віброприскорень зовнішнього кільця з врахуванням згинаючих коливань і різних відхилень основних параметрів доріжок і тіл кочення. Експериментальні дослідження підтвердили результати, отримані розрахунковим методом;

– отримана й експериментально перевірена формула розрахунку рівня вібрації при різних частотах обертання внутрішнього кільця.

Наведена методика моделювання вібрацій дозволяє прогнозувати експлуатаційні характеристики роликів підшипників ще на стадії механічного оброблення кілець та роликів за відомими параметрами хвилястості поверхонь кочення.

1. Бальмот В.Б., Самотин О.Н., Варламов Е.Б., Авдеев А.М. Вибрация и шум подшипников качения: Обзор. – М.: Цинтэиавтопром, 1987. – 125 с.
2. Журавлев В.Ф., Бальмот В.Б. Механика шарикоподшипников гироскопов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
3. Марчук В.І. Моделювання динамічної системи безцентрального врізного шліфування робочих поверхонь роликів підшипників // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"), вип.14, серпень 2004. – Луцьк, 2004. – С. 187-198.
4. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. – Житомир: ТПІ, 2001. – 612 с.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2014.

© В.І. Марчук, Л.М. Равенець

УДК 547-311

**Ю.Д. Михайлюк***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***МЕХАНІЗМ І ФАКТОРИ УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ НІТРОГЕНУ І КАРБОНУ  
ПРИ ЗГОРАННІ ПРИРОДНИХ ГАЗІВ**

*В статті наводяться результати досліджень утворення оксидів нітрогену та карбону при згоранні природних газів. Розглянуто моделі горіння природного газу в залежності від камер згорання. Наводяться рекомендації для прогнозування шкідливих викидів в атмосферне повітря.*

*Ключові слова:* оксиди нітрогену, оксиди карбону, згорання природного газу.

*Рис. 1. Табл. 1. Літ. 7.*

**Ю.Д. Михайлюк****МЕХАНИЗМ И ФАКТОРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ НИТРОГЕНА И КАРБОНА  
ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ**

*В статье проанализированы условия образования оксидов азота и углерода, рассмотрены модели процесса сжигания природного газа в зависимости от камер сжигания для прогнозирования концентраций и объемов вредных выбросов в атмосферный воздух.*

*Ключевые слова:* оксиды азота, оксид углерода, сжигание природного газа.

**Yu. D. Mykhailiuk****MECHANISM AND FACTORS OF NITROGEN AND CARBON OXIDES PRODUCTION AT  
NATURAL GAS COMBUSTION**

*The article focuses on the results of nitrogen and carbon oxides production investigation at natural gas combustion. It has been considered the pattern of natural gas combustion depending on the combustion chamber. It has been recommended the means for the prediction of harmful discharges into the atmosphere.*

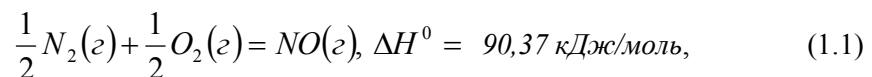
*Key words:* nitrogen oxide, carbon oxide, natural gas combustion.

**Вступ.** Під час роботи джерел енергії присутні такі фактори шкідливого впливу на навколишнє середовище: використання атмосферного кисню та викидання продуктів повного спалювання  $CO_2$ ,  $H_2O$ , теплові викиди, шум, шкідливі викиди в атмосферу.

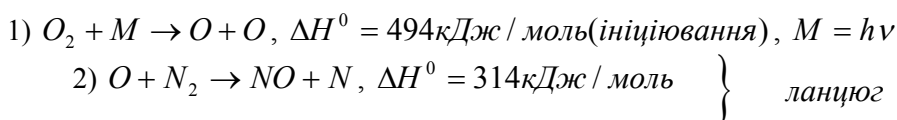
Шкідливими викидами в атмосферу під час спалювання палива є: частинки незгорілого палива; окисли азоту  $NO$  та  $NO_2$  (паливні, швидкі, термічні) окисли сульфуру  $SO_2$ ,  $SO_3$ ; сажа  $C$ ; зола; продукти неповного згорання  $CO$ ,  $C_mH_n$ ,  $H_2$  тощо; канцерогенні речовини (1,2 бенз(а)пірен  $C_{20}H_{12}$  та інші) [6].

Відомо, що забруднення атмосферного повітря окислами сульфуру і нітрогену, що пов'язані з діяльністю людини, складають лише 7% та 50% від загальної їх кількості, але штучні викиди характеризуються значною нерівномірністю розподілу, тому великим містам та промисловим центрам відповідають найбільші рівні забруднення атмосферного повітря.

**Матеріали дослідження.** Утворення оксидів нітрогену при спалюванні газів відбувається в основному в результаті окислення нітрогену повітря при високих температурах. Цей процес характеризується складною хімічною кінетикою та розроблений ще в недостатній мірі, для того, щоб прогнозувати концентрації та об'єми оксидів нітрогену в продуктах згорання на основі теоретичних розробок. Вивченням умов утворення оксидів нітрогену займалося багато дослідників (Бахіреєв В.І., Бурико Ю.Я., Єремін Н.В., Степанов О.А., Яковлев Є.І. та ін.). Встановлено, що формальна кінетика реакцій окислення атмосферного нітрогену вільним киснем досить добре описується рівнянням:

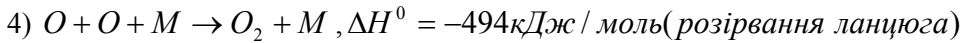
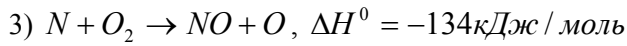


Я.Б. Зельдовичем [3] розроблена ланцюгова схема окиснення нітрогену, в якій активну роль відіграють вільні атоми нітрогену та карбону:



© Ю.Д. Михайлюк





Згідно цієї схеми вихід  $NO$  визначається реакцією між атомом кисню та молекулою нітрогену. При цьому кількість атомарного кисню визначається дисоціацією молекули  $O_2$ . Ці процеси мають дуже високий енергетичний бар'єр  $E^* = 561$  кДж / моль і, відповідно, визначаються температурою процесу.

Я.Б.Зельдович, П.Я. Садовніков і Д.А. Франк-Каменецький [3] розглянули швидкість зворотньої реакції-розкладу оксиду нітрогену. В результаті ними одержано рівняння для рівної кількості  $NO$ :

$$[C_{NO}] = 4,6 \sqrt{C_{O_2} C_{N_2} \exp(-21500/(RT))}. \quad (1.2)$$

де  $[C_{NO}]$ ,  $C_{O_2}$ ,  $C_{N_2}$  – концентрації  $NO$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  в зоні горіння [г/м<sup>3</sup>],  $T$  – температура горіння,  $R$  – універсальна газова стала.

Звідси слідує, що концентрації оксиду нітрогену дуже сильно (експоненціально) залежать від температури горіння. Так, при температурі 800 К масові частки концентрації  $[C_{NO}] = 0,00254$  г/м<sup>3</sup>, при температурі 1800 К  $[C_{NO}] = 4,7$  г/м<sup>3</sup>, а при температурі 2500 К вона досягає вже значення 31,7 г/м<sup>3</sup>.

Концентрації  $C_{O_2}$  і  $C_{N_2}$  в зоні горіння визначається надлишком повітря  $\alpha$  [5].

$$C_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_0 / (1 + \alpha L_0)$$

$$C_{N_2} = 0,78(\alpha - 1)L_0 / (1 + \alpha L_0)$$

де  $L_0$  – теоретично необхідна кількість повітря. Як бачимо, що з збільшенням  $\alpha$  величини  $C_{O_2}$  і  $C_{N_2}$  зростають, і тому зі збільшенням  $\alpha$  зростає і концентрація оксиду нітрогену  $[C_{NO}]$  в зоні горіння. Проте, ця залежність не носить експоненціального характеру і зі зростанням  $\alpha$  темпи зростання концентрації  $NO$  зменшуються.

Описаний механізм утворення оксидів нітрогену хоч і носить спрощений характер, проте межі його використання ще не встановлені.

Низкою авторів розглянуто інші моделі процесу горіння природних газів і утворення оксидів нітрогену і карбону. Вони враховують більше число компонентів – 11 в праці [4] та 32 в [1], які беруть участь в 7 по [4] і 196 в [1] елементарних реакціях. Ці моделі, звичайно, дозволяють дати більш детальну картину процесу горіння з описом нерівномірності розподілення температур і концентрацій компонентів в різних частинах полум'я. Однак, щодо концентрації оксиду нітрогену, то вони лише підтверджують експоненційну залежність від температури горіння і ступеневу залежність від надлишку повітря в зоні горіння.

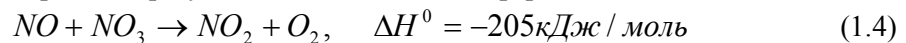
Є дослідники, які показують, що при спалюванні раніше підготовлених «збіднених» сумішей, які виміряні в дослідженні концентрації  $NO_x$  значно (в 2-5 разів) перевищують розрахунки по рівноваговим моделям. Проте моделі, які пояснюють це явище, ще не побудовано, і для розрахунку концентрації  $NO_x$  слугує півімперична методика, яка заснована на обліку температури горіння, надлишку повітря та швидкості окислення палива.

Слід відмітити, що після виходу оксиду нітрогену з димової труби в атмосферу, основна частина оксиду нітрогену переходить ще в більш токсичний діоксид нітрогену за двома основними реакціями:

а) при високих концентраціях в корінні факелу за рахунок окислення киснем в результаті екзотермічних реакцій



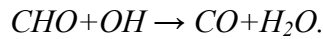
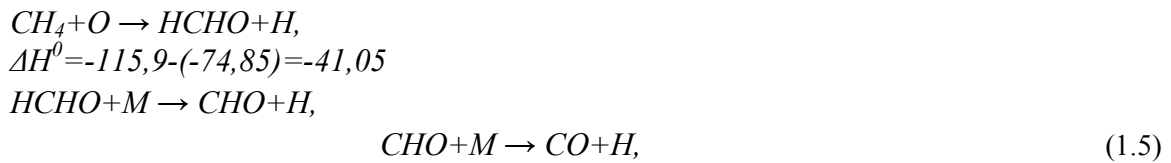
б) при низьких концентраціях в результаті окислення атмосферним озоном



Остання реакція при низьких концентраціях проходить в  $10^5$  разів швидше реакції (1.3) і є привелійованою.

Таким чином після виходу димових газів в атмосферу не тільки збільшується їхня токсичність (за рахунок збільшення частки  $NO_2$ ), але ще й проходить активне зниження концентрації атмосферного озону.

Утворення оксиду карбону при горінні природних газів проходить в результаті наступних швидких реакцій [5].



Поряд з цими реакціями йдуть реакції згорання  $CO$ :



Перша з цих реакцій є повільною і не відіграє значної ролі в вигоранні оксиду карбону.

Згідно розрахунків масові частки стану всіх компонентів реакції горіння, які проведені в [4], концентрація  $C_{CO}$  зростає зі збільшенням температури горіння і знижується при збільшенні надлишку повітря, тобто концентрації  $C_{O_2}$  в зоні горіння.

Незважаючи на те, що механізм утворення  $NO_x$  і  $CO$  при згоранні газів вивчений досить детально, ще не існує теоретичних методів оцінки об'ємів шкідливих викидів в вихідних газах газоперекачуючих агрегатів (ГПА).

Справа в тому, що розрахункові дані по меделям (1.1– 1.6) і по більш досконалим моделям [4] не враховують впливу конструкцій та аеродинаміки камер згорання. При вивченні концентрацій в печах котлів [5] було встановлено, що на концентрацію  $NO_x$  і  $CO$  в кінцевих продуктах згорання поряд з кінетичними факторами ( $C_{O_2}$ ,  $C_{N_2}$ ,  $C_{H_2O}$ ,  $T$ ) впливає також аеродинаміка пічкових камер; ефективність перемішування холодного газоповітряного потоку з рециркулюючими продуктами згорання; розміщення поверхні нагріву до полум'я; взаємне розміщення пальників і деякі інші фактори.

Так, за [5] (рис.1, табл.1) дійсний вихід оксиду нітрогену може зменшитися більш чим на порядок в залежності від надлишку повітря. Наприклад, при  $\alpha=2$ , яке є характерним для агрегату ГТК-10-4, дійсний вихід  $NO$  складає 0,05 від його рівноважної концентрації.

У зв'язку з цим, важливу роль в питаннях зниження шкідливих викидів ГПА відіграють стендові дослідження, які проводять на експериментальних частинах камер згорання авіаційних двигунів, а також, які виготовлені для стаціонарних ГТУ блочного та кільцевого згорання з різними конструкціями фронтного пристрою та розподіленням повітря по тракту [5].

Таблиця 1. Вихід оксиду нітрогену в залежності від надлишку повітря

Надлишок повітря	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2
Масові частки концентрації $NO$ , $г/м^3$	2,00	3,95	2,55	1,50	1,05	0,9	0,85
Концентрація на виході, $г/м^3$	0,075	0,25	0,15	0,10	0,0683	0,0045	0,0416
Співвідношення $C_{NO}/[C_{NO}]$	0,0375	0,0633	0,0588	0,0667	0,065	0,005	0,049

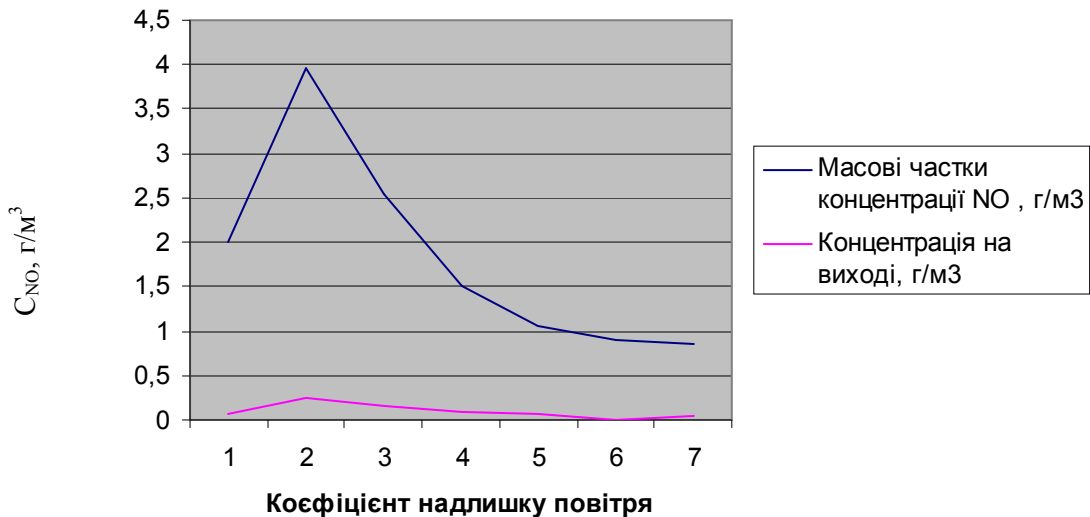


Рис. 1. Масові частки концентрації  $NO$  при максимальній температурі в зоні горіння та дійсний вихід оксиду нітрогену при різних надлишках повітря

Так, в [3] для камер згорання агрегату ГТК-10-4, в яких все початкове повітря поступає через фронтний пристрій, показано, що існує зворотня залежність концентрацій  $NO_x$  в вихідних газах від збільшення надлишку початкового повітря, що вступає в протиріччя з теоретичними висновками [4] про підвищення виходу  $NO$  при збільшенні надлишку повітря. Це пояснюється тим, що в камерах такої конструкції збільшення надлишку повітря призводить до значного зменшення температури полум'я, яка суттєво впливає на процес утворення оксиду нітрогену.

Експериментально було встановлено, що зниження концентрацій  $NO_x$  можна досягти шляхом скорочення часу перебування продуктів згорання в зонах з максимальними температурами [6]. Ці спостереження привели до утворення високофорсувальних камер згорання (ГПА-Ц-16), в яких частина початкового повітря подається через фронтний пристрій, а залишкове повітря – через систему радіальних отворів. Це дозволило скоротити вихід  $NO_x$  більш ніж вдвоє в порівнянні з нефорсувальними камерами згорання.

Емпірично було встановлено [7], що концентрація окислів нітрогену має тісний зв'язок з температурою газів за камерою згорання. Ці взаємозв'язки були в подальшому використані при розробці прогнозування шкідливих викидів по робочим параметрам ГТУ [2].

Дослідні дані отримані при спалюванні рідких і газоподібних палив [7], дозволили встановити, що концентрація  $NO_x$  на виході пов'язана з тиском в камері згорання, хоч як показали [4], на рівновагові концентрації тиск в діапазоні температур 1600 -2500 К, характерних для ГТУ, суттєво не впливає.

Загальні результати теоретичних досліджень (1.2) і стендових досліджень [7] пропонує наступне рівняння для розрахунку концентрації  $NO$  (%) на виході з камер згорання.

$$NO = 3,7 \cdot 10^{12} \cdot \sqrt{O_2} \cdot N_2 \cdot \exp(-129000/(R \cdot T_\phi)) / T_\phi \cdot \tau_{пр} \cdot \left( \frac{16 \cdot p_{КС} - 0,23}{6 \cdot p_{КС} + 0,77} \right) \cdot \left( \frac{1,15}{\sqrt{\alpha_1 + \alpha_{OB}}} \right), \quad (1.7)$$

де  $O_2$ ,  $N_2$  – об'ємна концентрація нітрогену в продуктах згорання, при  $\alpha=1,1$ ;  $T_\phi$  – ефективна температура факелу при  $\alpha=1,1$ ;  $T_\phi$  знаходиться в співвідношенні  $T_\phi/T_I=O$ ;  $O$  – коефіцієнт неадіабатичності;  $\tau_{пр} = V_{КС}/V$ ;  $V_{КС}$  – об'єм паливного простору камери згорання, м<sup>3</sup>;  $V$  – об'ємний розхід продуктів згорання м<sup>3</sup>/с;  $\alpha_{OB}$ ,  $\alpha_1$  – коефіцієнти надлишку загального і початкового повітря;  $R$  – газова стала.

Це рівняння хоча і враховує основні фактори утворення оксидів нітрогену, не може бути використано в практиці експлуатації ГПА, оскільки містить низку параметрів, які неможливо виміряти на промислових установках. У зв'язку з цим ряд авторів [4,5] намагалися спробувати побудувати моделі прогнозу концентрації  $NO$  по дотичним показникам, а власне по робочим параметрам агрегатів, які можливо виміряти в процесі їхньої експлуатації.

**Висновки.** Основними факторами, які визначають концентрації оксидів нітрогену та карбону в продуктах згорання є температура та надлишок повітря в зоні горіння. Конструктивні

особливості камер згорання визначають умови та тривалість перебування продуктів згорання в зонах максимальних температур і тим самим суттєво впливають на об'єми шкідливих викидів ГПА.

1. Бочков М.В. Утворення оксидів азоту NO при розповсюдженні ламінарного полум'я по гомогенній метаноповітряній суміші. / Бочков М.В., Ловачев С.Н., Хвисевич Б.Н. – М.: Вид-во ИММ РАН, 1996. – 98 с.
2. Єремін Н.В. Компресорні станції магістральних газопроводів (надійність і якість). / Єремін Н.В., Степанов О.А., Яковлев Є.І. – СПб.: Недра, 1995. – 336 с.
3. Зельдович Я.Б. Окислення азоту при згоранні. / Зельдович Я.Б., Садовніков П.Я., Франк-Каменецький Д.А. – М.: Наука, 1987. – 146 с.
4. Карп І.Н. Продукти згорання природного газу при високих температурах. / Карп І.Н., Сорока Б.С., Дашевський Л.Н.– Київ: Техніка, 1967. – 382 с.
5. Сігал І.Я. Оксиди азоту в продуктах згорання та їх перетворення в атмосфері / І.Я. Сігал. / Киев: Наукова думка, 1987. – 144 с.
6. Степанов Д.В. Котельні установки промислових підприємств: навч. посіб. / Степанов Д. В., Корженко Є.С., Боднар Л.А. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 119 с.
7. Тумановський А.Г. Зниження викидів NO та вуглеводнів на пускових і змінних режимах енергетичних ГТУ при згоранні рідких та газоподібних палив / А.Г. Тумановський, М.Н. Гутник, К.Ю. Соколов // Електричні станції. – 1991. – № 11. – С. 2-6.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2014.

**В.Т. Михалевич**

*Луцький національний технічний університет*

### **КОРЕЛЯЦІЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ТА ВИПАДКОВИХ ЧИННИКІВ У СИСТЕМАХ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ РОЗМІРІВ ДЕТАЛЕЙ**

*Основне призначення систем активного контролю – забезпечення заданої розмірної точності механічного оброблення деталей. На точність процесів розмірного оброблення деталей впливає ряд систематичних та випадкових чинників. Для аналізу та прогнозування їх проявів пропонується методика синтезу та моделювання систем активного контролю на стадії проектування.*

*Ключові слова: активний контроль, розмір, точність, управління, лінеаризація.*

*Рис. 6. Форм. 10. Літ. 2.*

**В.Т. Михалевич**

### **КОРЕЛЯЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ И СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ**

*Основное назначение систем активного контроля – обеспечение заданной размерной точности механической обработки деталей. На точность процессов размерной обработки деталей влияет ряд систематических и случайных факторов. Для анализа и прогнозирования их проявления предлагается методика синтеза и моделирования систем активного контроля на стадии проектирования.*

*Ключевые слова: активный контроль; размер, точность, управление, линеаризация.*

**V.T. Mykhalevych**

### **CORRELATION OF SYSTEMATIC AND RANDOM FACTORS IN THE SYSTEMS OF ACTIVE MONITORING OF THE SIZES OF THE COMPONENTS**

*Basic purpose of the systems of active monitoring - guarantee of the assigned dimensional accuracy of mechanical processing of components. The combination of equipment with the means of active monitoring forms automated control system of the accuracy of working. Into its composition enters the number of the elements, each of which has the characteristic transmitting of characteristics, that in the combination is formed the general dynamic characteristic of process. The block diagram of process can be represented in the form locked outline. On the separate components of structure act both the external and internal factors, which influence the course of the process. The accuracy of the dimensional machining of components always depends on the influence of systematic and random factors. For analysis and predicting their manifestation the procedure of synthesis and simulation of the systems of active monitoring at the stage of design is proposed.*

*The keywords: active monitoring; size, accuracy, control, the linearization.*

Ефективне використання систем активного контролю пов'язане з комплексною оцінкою точності цих систем, що враховує сумарний вплив метрологічних та технологічних чинників. Для аналізу точності систем активного контролю доцільно використати узагальнену модель системи оброблення та управління, що включає нелінійні елементи та ланки запізнення.

Під час механічного оброблення на верстатах діють різні чинники, що приводять до виникнення похибок оброблення і, відповідно, до відхилення розмірів від заданого значення. Похибки оброблення можна поділити на систематичні та випадкові. Відповідно до цього всі чинники, які впливають на процес оброблення, теж можна розділити на систематичні та випадкові.

Загальну дію всіх чинників  $E(p)$  можна подати у вигляді

$$E(p) = Q(p) + \mu(p) + h_0(p). \quad (1)$$

Таким чином, при аналізі систем активного контролю необхідно враховувати як систематичні чинники  $Q(t)$ , так і випадкові  $\mu(p)$ . Дію систематичних чинників можна врахувати як сумарно, так і диференційовано. Значення поточного розміру деталі відрізняється від рівня налагодження похибкою  $\varepsilon(p)$ , за рахунок дії систематичних і випадкових чинників:

$$\varepsilon(t) = x(t) - h(t) \quad (2)$$

Систему управління механічним обробленням можна подати у вигляді замкнутої структурної схеми (рис. 1).

На схемі позначено:  $W_s(p)$  – передатна функція пристрою подачі інструменту;  $\Sigma$  – позиція оброблення;  $F(\varepsilon)$  – нелінійний елемент системи – вимірювальний пристрій з підсилювачем та перетворювачем;  $e^{-p\beta_1}$  – ланка транспортного запізнення;  $e^{-p\beta_2}$  – ланка запізнення команди управління;  $h_0(p)$  – рівень заданого значення розміру;  $\beta_1$  – час транспортного запізнення;  $\beta_2$  – час

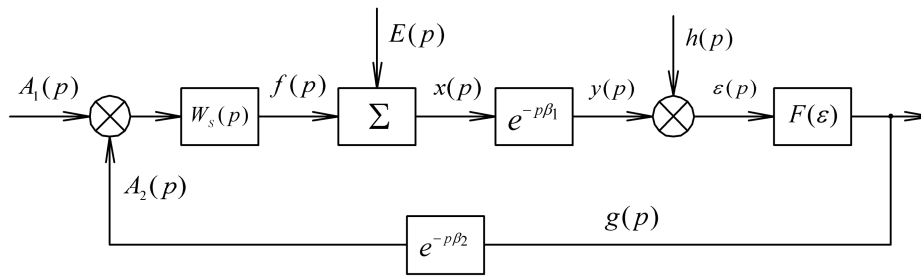


Рис. 1. Структурна схема системи активного контролю розмірів

розміру з врахуванням транспортного запізнення;  $g(p)$  – команда управління;  $A_1(p)$  – команда включення системи оброблення і управління;  $\varepsilon(p)$  – похибка поточного розміру деталі;  $A_2(p)$  – команда управління з врахуванням запізнення;  $Q(p)$  – дія систематичних чинників;  $\mu(p)$  – дія випадкових чинників;  $f(p)$  – дія подачі інструменту.

У системах активного контролю фіксування кінцевого значення розміру вимірювальним пристроєм і наступне управління процесом оброблення здійснюється з похибкою  $\Delta$ . У такому випадку система управління, що переключає подачу в залежності від розміру деталі є нелінійною, а  $\Delta$  – похибкою нелінійного елемента. З цього випливає, що вимірювальний пристрій з підсилювачем та перетворювачем команди є нелінійним безінерційним елементом з граничною похибкою  $\Delta$ . Похибка  $\Delta$  включає всі похибки, що виникають під час оброблення.

Нелінійний елемент у замкнутій системі викликає спотворення вхідного сигналу та змінює закон його розподілу. Тому у нелінійному елементі характеристики на виході – математичне очікування  $m_x$  і дисперсія  $\sigma_x$  виміряних деталей, – виявляються залежними від тих же характеристик на вході – оброблених або необроблених, але не виміряних деталей. Безінерційні елементи мають суттєві нелінійності, характеристики яких не мають у кожній точці похідних і не можуть бути розкладені у ряд Тейлора. Це створює значні складності у розрахунку і моделюванні систем з подібними елементами. Залежність між вхідною і вихідною величинами за таких нелінійностей може бути наближено подана у вигляді кусково-лінійної функції.

Як випливає з рис. 1, є три вхідних дії, що діють у різних частинах схеми:  $A_1(p)$ ,  $E(p)$  і  $h(p)$ . Враховуючи, що на точність оброблення впливає величина  $E(p)$ , структурну схему активного контролю можна подати у вигляді, показаному на рис. 2. У відповідності з цією структурною схемою чинники збурення, які діють у системі, розташовані зліва, а розмір обробленої деталі – справа на виході системи.

Для лінеаризації і моделювання передатної характеристики системи, у яку входить і нелінійний елемент і елемент запізнення, найбільш ефективним є метод статистичної лінеаризації. Цей метод застосовується у випадку, коли нелінійні характеристики описуються недиференціальними функціями, що характерно для кусково-лінійної апроксимації.

Обмеження у застосуванні методу статистичної лінеаризації зумовлені вимогами нормального розподілу випадкової функції на вході нелінійного елемента і наявності інерційної ланки на його виході. Такі обмеження для системи (рис. 2) знімаються, бо на вході діючі завади підпорядковуються нормальному закону розподілу, а сигнал з виходу подається на інерційний виконавчий пристрій верстату.

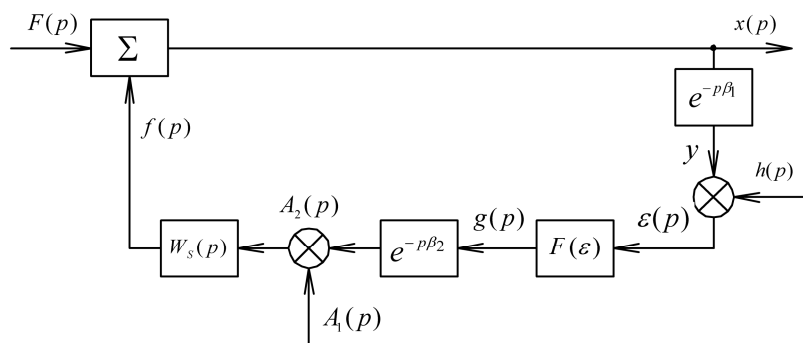


Рис. 2. Блок-схема системи активного контролю розмірів

На основі викладених положень та враховуючи нормальний закон розподілу, блок-схему системи активного контролю можна подати у вигляді, як показано на рис. 3, 4:

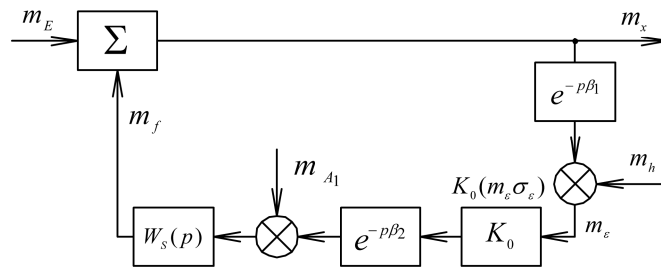


Рис. 3. Еквівалентна блок-схема системи активного контролю по математичному очікуванню

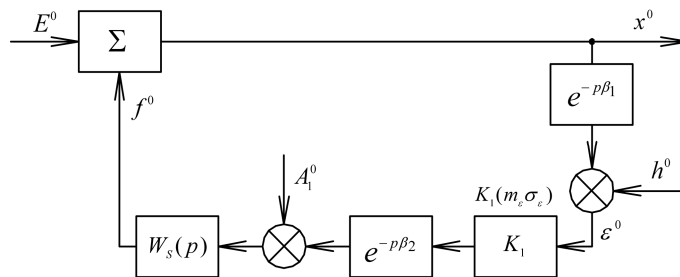


Рис. 4. Еквівалентна блок-схема системи активного контролю по дисперсії

Тепер нелінійний елемент  $F(\varepsilon)$  може бути поданий у вигляді апроксимуючої функції

$$F(\varepsilon) = K_0 m_\varepsilon + K_1 \varepsilon^0, \quad (3)$$

де  $K_0$  – еквівалентний статистичний коефіцієнт підсилення нелінійного елемента по математичному очікуванню;  $K_1$  – еквівалентний статистичний коефіцієнт підсилення по випадковій складовій;  $\varepsilon^0$  – центрове значення дисперсії випадкової складової.

Для заміни нелінійного елемента лінійною функцією повинні забезпечуватись умови:

$$m_g = K_0 m_\varepsilon, \quad (4)$$

де  $m_g$  – математичне очікування команди управління; відповідно

$$K_0 = m_g / m_\varepsilon, \quad (5)$$

а також

$$\sigma_g^2 = K_1 \sigma_\varepsilon^2, \quad (6)$$

відповідно

$$K_1 = \sigma_g^2 / \sigma_\varepsilon^2, \quad (7)$$

де  $\sigma_g$  – середнє квадратичне відхилення команди управління;  $\sigma_\varepsilon$  – середнє квадратичне відхилення похибки розміру.

Умови (5) і (7) відповідають лінійній похибці при апроксимації нелінійного елемента лінійною функцією. Це забезпечує управління процесом з мінімальною похибкою  $\varepsilon(t)$  після лінеаризації.

Як систематичні чинники впливу на процес можна взяти, наприклад, знос інструменту, силові і теплові деформації.

Розмірний знос різального інструменту може підпорядковуватись як лінійному закону, так і нелінійному. Характер зносу інструменту, наприклад, на токарних операціях буде близьким до лінійного.

У якості систематичного чинника зносу інструменту може бути використано рівняння лінійної регресії з визначеними постійними.

Законозміни силових та теплових деформацій складні і залежать від великої кількості чинників. Експериментальні дослідження процесів різання показують, що характер зміни пружних деформацій залежить від глибини різання та подачі і теж близький до лінійного.

Таким чином, залежність пружних силових деформацій від подачі, затуплення інструменту та іншого можна подати графічно лінійною залежністю (рис. 5).

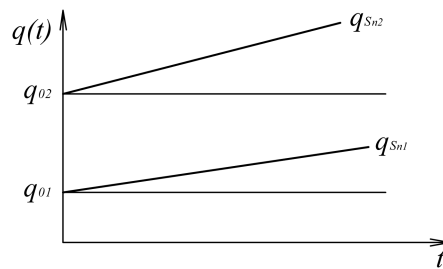


Рис. 5. Зміна пружних деформацій під час оброблення

Ці деформації  $q$  будуть визначатись як

$$q(t) = q_0 + bt, \quad (8)$$

де  $q(t)$  – закон зміни пружних силових і теплових деформацій;  $q_0$  – початкова деформація;  $b$  – швидкість зміни деформації.

Початкову деформацію  $q_0$  можна виразити у вигляді

$$q_0 = b_0 S_s, \quad (9)$$

де  $b_0$  – коефіцієнт, що визначає функціональну залежність між  $q_0$  і  $S$ .

У випадку нелінійної залежності пружних силових і теплових деформацій параметри  $q(t)$  і  $b$  можуть бути визначені наступним чином.

Для врахування систематичних чинників і підстановки їх у передатну функцію системи управління використовується перетворення Лапласа. У цьому випадку слід знайти відповідності, виражені в операторній формі, для функції, що змінюється лінійно або нелінійно. Таким чином, важливо лише встановити апроксимуючий характер зміни зносу інструменту, теплових або силових деформацій та інших чинників, що попадають в розряд систематичних. Характер впливу цих чинників можна врахувати їх алгебраїчним додаванням у кожен момент часу.

У процесі оброблення на деталь діють не тільки систематичні, а й випадкові чинники, що викликають розсіювання розмірів деталей. Дія випадкових чинників повинна враховуватись відповідними статистиками.

Команда управління процесом механічного оброблення подається на пристрій подачі  $W_S(p)$  (рис. 1) по двох каналах – у момент включення всієї системи оброблення  $A_1$  і від подачі управляючого імпульсу по каналу управління  $A_2$ . Абсолютно очевидно, що управляти процесом оброблення можна лише за допомогою  $A_2$ .

У системах операційного активного контролю команда управління здійснює переключення подачі і відвід інструменту. Похибка управління визначається тут похибкою налагодження вимірювального пристрою, нестабільністю спрацювання команд управління, запізненням команди управління тощо. Похибка управління у цьому випадку є незначною порівняно з похибками процесу оброблення і може бути врахована під час налагодження верстату та вимірювального пристрою. Як правило, похибка управління операційної системи входить в граничну похибку оброблення і оцінюється сумарно. У цьому випадку відвід інструменту, наприклад, для врізного шліфування повинен виконуватись на величину, рівну полю допуску на оброблення. Це мінімальна величина відводу інструменту. Тому часто для операційних систем похибку команди управління  $A_2$  визначають статичним опрацюванням результатів контролю оброблених деталей з наступним визначенням статистик оброблення.

Похибка команди управління може бути визначена як похибка переміщення виконавчого органу верстату. Похибка управління також може бути визначена статистичним обробленням результатів контролю оброблених деталей. Але для різних видів систем команда управління повинна відповідати оптимальному значенню підналагоджувального імпульсу.

Використавши наведену методику можна визначити параметри  $m_\varepsilon$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $K_0$  і  $K_1$ , що характеризують точність роботи системи. Але вирішення такої задачі ускладнюється через те, що параметри  $m_\varepsilon$  і  $\sigma_\varepsilon$  взаємопов'язані. Тут зручно використати коефіцієнти  $\Psi_0$  і  $\Psi_1$ , які можуть бути



отримані з експериментальних статистик. Статичні коефіцієнти лінеаризації  $K_0$  і  $K_1$  пов'язані з коефіцієнтами  $\psi_0$  і  $\psi_1$  залежностями:

$$K_0 = \frac{A}{m_\varepsilon} \psi_0; \quad K_1 = \frac{A}{\sigma_\varepsilon} \psi_1. \quad (10)$$

Для визначення значення  $\psi_0$  побудовано експериментальний розрахунковий графік (рис. 6, а). За допомогою цього графіка за отриманими експериментальними статистиками  $\Delta$ ,  $\sigma_\varepsilon^*$ ,  $m_\varepsilon^*$  можна визначити коефіцієнт  $\psi_0$ . Таким же чином, знаючи значення  $\Delta$ ,  $\sigma_\varepsilon^*$ ,  $m_\varepsilon^*$  визначається коефіцієнт  $\psi_1$  (рис. 6, б).

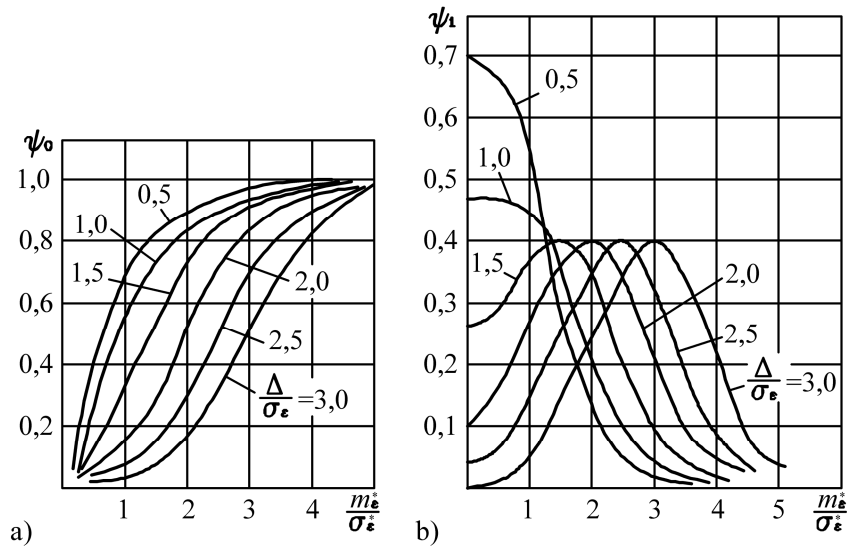


Рис. 6. Розрахункові графіки для визначення  $\psi_0$  (а) і  $\psi_1$  (б)

Таким чином, процедура визначення точнісних параметрів процесу оброблення  $m_\varepsilon$  і  $\sigma_\varepsilon$ ,  $m_g$  і  $\sigma_g$  складається з наступних етапів:

1. На основі експериментально визначених статистик розраховується значення  $\Delta/\sigma_\varepsilon^*$  і  $m_\varepsilon^*/\sigma_\varepsilon^*$ .

2. За значеннями  $\Delta/\sigma_\varepsilon^*$  і  $m_\varepsilon^*/\sigma_\varepsilon^*$  та графіками на рис. 6 визначаються значення  $\psi_0$  і  $\psi_1$ .

3. За формулами (10) визначаються значення  $K_0$  і  $K_1$ .

4. За знайденими значеннями  $K_0$  і  $K_1$  визначаються параметри управління  $m_g$  і  $\sigma_g$ .

Висновки:

– всі процеси розмірного оброблення деталей супроводжуються дією систематичних та випадкових чинників, що приводять до відхилень розмірів від заданого значення;

– ймовірність прояву збурюючих чинників та величину відхилень розмірів у технологічній системі можна прогнозувати шляхом математичного моделювання системи активного контролю розмірів.

1. Активный контроль размеров / С.С. Волосов, М.Л. Шлейфер, В.Я. Рюмкин и др.; Под ред. С.С. Волосова. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

2. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Под ред. А.Н. Гаврилова. М., «Машиностроение», 1973. – 567 с.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2014.

УДК 621.822

**С.А. Мороз, В.В. Пташенчук**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ**  
**ДЛЯ ОПЕРАЦІЇ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ**

*В статті наведені експериментальні дослідження процесу алмазного вигладжування з використанням вигладжуючих інденсторів з синтетичного алмазу типу АКТМ. Проведений чотирьохфакторний експеримент та побудована регресійна модель взаємозв'язку шорсткості поверхні та технологічних режимів алмазного вигладжування.*

*Ключові слова:* алмазне вигладжування, шорсткість, технологічні режими.

*Рис. 2. Табл. 3. Форм. 9. Літ. 10.*

**С.А. Мороз, В.В. Пташенчук**  
**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ**  
**ДЛЯ ОПЕРАЦИИ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ**

*В статье приведены экспериментальные исследования процесса алмазного выглаживания индентором с синтетического алмаза типа АКТМ. Проведенный четырёхфакторный эксперимент и построена регрессионная модель взаимосвязи шероховатости поверхности с технологическими режимами алмазного выглаживания.*

*Ключевые слова:* алмазное выглаживание, шероховатость, технологические режимы.

**S.A. Moroz, V. V. Ptashenchuk**  
**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE QUALITY OF SURFACE**  
**SMOOTHING OPERATION**

*The paper presents the experimental research of smoothing operation using synthetic diamond indenter type AKTM. Four-factory experiment conducted and constructed regression model the relationship of surface roughness and technological modes of smoothing operation.*

*Keywords:* smoothing operation, roughness, technological regimes.

**Аналіз досліджень і публікацій, в яких вирішувалася дана проблема.** Практичними дослідженнями процесу алмазного вигладжування для синтетичних алмазів типу АСБ та АСПК було встановлено ряд експериментальних залежностей, що пов'язували між собою величини технологічних режимів, параметри початкового мікропрофілю поверхні та вигладженої поверхні [3], [6] – [8], [10]. Однак, взаємозв'язки між якістю вигладженої поверхні інструментом із синтетичного алмазу типу АКТМ та режимами алмазного вигладжування невідомі.

**Постановка проблеми.** Надійність та довговічність роботи машин та механізмів у великій мірі пов'язана з якісним станом поверхневого шару деталей. Від параметрів поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості – опір втомі, зносостійкість, корозійна стійкість, опір контактній втомі тощо. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна (з огляду підвищення експлуатаційних властивостей деталей) поверхня повинна бути достатньо твердою, мати залишкові напруження стиску, дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з великою площею опорної поверхні [4]. Одним із способів отримання необхідної величини мікрогеометрії робочої поверхні є оброблення алмазним вигладжуванням, при якому стружка не утворюється, а відбувається тонка поверхнева пластична деформація (ППД) поверхневого шару [6] – [8], [10].

На сучасному етапі розвитку науки і виробництва створюються нові зразки синтетичних алмазних матеріалів. Одним з таких синтетичних матеріалів є алмаз типу АКТМ. Його характеристики по твердості, міцності на стиск, модулю пружності, теплопровідності та термостабільності є кращими у порівнянні з аналогами (АСБ та АСПК) (табл. 1).

*Таблиця 1. Характеристики фізико-механічних властивостей синтетичного алмазу типу АКТМ*

Густина, г/см <sup>3</sup>	3,45	Модуль Юнга, ГПа	970
Твердість за Кнупом, ГПа	50-55	Теплопровідність, Вт/(м·К)	250-300
Трещиностійкість, МПа·м <sup>1/2</sup>	10-12	Зносостійкість при правці корундового круга, мг/кг	~ 4,4
Міцність на стиск, ГПа	2,2-3,1	Термостабільність, К	~ 1500

Однак для вигладжувального інструменту з вказаного матеріалу не відомо чітких залежностей між технологічними режимами та якістю поверхні після оброблення. Очевидно, що технологічні режими для алмазного вигладжування потрібно інтенсифікувати для підвищення продуктивності оброблення.

**Формулювання цілей статті.** Для реалізації багатофакторної регресійної моделі  $R_a = f(P_6, s_6, V_6, R_{an})$  процесу алмазного вигладжування, яка відображає кількісні зв'язки між силою вигладжування ( $P_6$ ), подачею ( $s_6$ ), швидкістю вигладжування ( $V_6$ ), вихідними параметрами якості поверхневого шару  $R_{an}$  (середнє арифметичне відхилення профілю, початкове) і параметром якості поверхневого шару ( $R_a$ ), був спланований і поставлений практичний експеримент. Вказані фактори експерименту вибирались з наступних міркувань: подача ( $s_6$ ) впливає на величину шорсткості поверхні, яка обробляється й на рівномірність та повторюваність деформації в напрямі подачі (осьовому напрямі); від швидкості ( $V_6$ ) залежить протікання процесу деформації в осередку, глибина зміцненого шару та кількість теплоти, яка утворюється при обробці; від сили вигладжування ( $P_6$ ) залежить величина пластичної деформації та згладжування мікронерівностей; початкова шорсткість ( $R_{an}$ ) впливає на величину контактних тисків, які необхідні для пластичної деформації початкового профілю поверхні.

В рамках дослідження було взято циліндричні зразки зі сталі ШХ-15, які попередньо піддавались токарному обробленню ( $R_{an}=0,8$  мкм). В якості змащувально-охолоджувальної рідини, відповідно до рекомендацій [3], в процесі алмазного вигладжування застосовувалось індустріальне мастило ИГА-32.

**Основні результати дослідження.** Найбільш поширеним описом функції відгуку є подання її поліномом [9]. На першому етапі висувається гіпотеза про лінійність моделі, тобто:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i, \quad (1)$$

де  $k$  - число контрольованих факторів.

Як функцію відгуку прийнято значення  $R_a$ . Проводиться експеримент, необхідний для визначення її параметрів [1], [2], [5].

Перевіряється адекватність моделі. Якщо лінійна модель неадекватна, то висувається гіпотеза про пріоритетний вплив взаємодіючих факторів.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j. \quad (2)$$

Обчислюються параметри моделі та проводиться перевірка її адекватності. Якщо модель типу (2) неадекватна, то виконані раніше дослідження доповнюються новою серією, що дозволяє обчислювати коефіцієнти  $b_{ij}$  квадратичної моделі (полінома другого ступеня):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \cdot x_i^2. \quad (3)$$

З метою полегшення оброблення результатів експерименту фактори нормалізують. Для визначення параметрів лінійної моделі достатньо в досліді кожен фактор фіксувати на одному з двох рівнів: верхньому або нижньому. Верхній рівень нормалізованого фактору позначають (+), а нижній (-).

Інтервали варіювання приймалися, виходячи з реальних меж коливання значень факторів, визначених в результаті попередніх пошукових експериментів.

Фактори, рівні та інтервали варіювання факторів наведено в таблиці 2.

Кількість дослідів в експерименті, які необхідні для реалізації всіх можливих варіацій рівнів факторів визначались за наступною залежністю:

$$N = 2^n = 2^4 = 16 \quad (4)$$

де  $N$  – кількість експериментів,  $n=4$  – кількість факторів експерименту.

План експерименту задано таблицею – матрицею планування експерименту, що включає в себе значення факторів та ефектів їх взаємодій, а також значення досліджуваної функції (табл. 3).

Коефіцієнти рівняння регресії (2) визначено за формулами ( $i$  - номер факторів,  $j$  - номер рядка в матриці планування):

Таблиця 2. Рівні та інтервали варіювання факторів

Рівень фактору	Фактори			
	Сила вигладжування $P_6, \text{Н}$	Подача $s_6, \text{мм/об}$	Швидкість вигладжування $V_6, \text{м/хв}$	Середнє арифметичне відхилення профілю, початкове, $R_{a n}, \text{мкм}$
Кодоване позначення	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Верхній (+)	400	0,12	80	1,0
Основний (0)	300	0,08	60	0,8
Нижній (-)	200	0,04	40	0,6

Таблиця 3. Матриця планування повнофакторного експерименту типу  $2^4$  з ефектом взаємодії першого порядку і результати досліджень (сталь ШХ15)

№ дос.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$R_a$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,163
2	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,185
3	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,152
4	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,154
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	0,168
6	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0,185
7	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	0,135
8	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0,155
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,198
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,125
11	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,217
12	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,216
13	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,205
14	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0,145
15	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0,147
16	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,174
$b_0,$ $b_i,$ $b_{ij}$	-0,0013	0,0003	0,0005	0,001	0,0004	0,0002	0,00042	-0,0002	-0,0004	0,0011	0,011

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u, \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot y_u, \quad b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u, \quad (5)$$

де  $n$  – число дослідів;  $y_u$  – середнє арифметичнє значення вихідного параметра в  $n$ -му досліді;  $x_{iu}$  – значення  $i$ -го кодового фактора в рядку матриці в  $u$ -му досліді;  $x_{ju}$  – значення  $j$ -го кодового фактора в рядку матриці в  $u$ -му досліді.

З урахуванням усіх знайдених коефіцієнтів основнє рівняння регресії згідно виразу (2) для повного факторного експерименту буде виглядати наступним чином:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 = 0,011 - 0,0013 \cdot x_1 + 0,0003 \cdot x_2 + 0,0005 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_4 + 0,0004 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0002 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,00042 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,0002 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0004 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,0011 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Для перевірки адекватності рівняння регресії та визначення дисперсії коефіцієнтів необхідно визначити дисперсію  $s^2\{y\}$  відтворюваності експерименту.

Дисперсію  $s^2\{y\}$  визначали за шістьма паралельними дослідженнями в центрі плану, тобто за результатами досліджень, виконаних для знаходження факторів на основних рівнях (таблиця 2)

з використанням наступної залежності:

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y - \langle y \rangle)^2}{n_0 - 1}, \quad (6)$$

де  $n_0$ -число паралельних дослідів в центрі плану;  $y$  - значення функції відгуку в  $i$  - досліді;  $\langle y \rangle$  - середнє арифметичне значення функції відгуку в  $n_0$  дослідженнях;  $i$  - номер паралельного дослідження в центрі плану. Згідно виразу (6) отримали наступне значення дисперсії:

$$s^2(y) = 0,000001.$$

Середня квадратична похибка у визначенні коефіцієнтів рівняння регресії для  $y$  виявилася наступною:

$$s\{b_i\} = + \frac{\sqrt{s^2\{y\}}}{N} = + \frac{\sqrt{0,000001}}{16} = 0,000062.$$

Довірчий інтервал для коефіцієнтів рівняння регресії  $\Delta b_i = \pm 3,2 \cdot 0,000062 = \pm 0,00019$ .

Всі коефіцієнти відповідно до довірчого інтервалу повинні бути враховані в рівнянні регресії.

Для перевірки адекватності рівняння регресії обчислено дисперсію  $S_{ad}^2$  адекватності:

$$S_{ad}^2 = 0,00018.$$

Адекватність рівняння регресії перевіряємо по  $F$ -критерію. Знаходимо розрахункове значення  $F$ -критерію:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,00018}{0,00015} = 1,2. \quad (7)$$

Табличне значення  $F_m$ -критерію при 5%-вому рівні значимості дорівнює 4,9, так як  $F_p < F_m$ , то модель є адекватною.

Перехід від кодованих ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ) до натуральних ( $P_g, s_g, V_g, R_{an}$ ) значень чинників здійснюється відповідно до умов експерименту (табл. 2) за формулою:

$$x_i = \frac{x - x_0}{\Delta x}, \quad (8)$$

де  $x_i$  - натуральне значення;  $x_0$  - натуральне значення чинників на основних рівнях,  $\Delta x$  - значення інтервалів варіювання.

Рівняння (2) з урахуванням відношення (8) можна представити наступним виразом:

$$y = 0,011 - 0,0013 \cdot P_g + 0,0003 \cdot s_g + 0,0005 \cdot V_g + 0,001 \cdot R_{an} + 0,0004 \cdot P_g \cdot s_g + 0,0002 \cdot P_g \cdot V_g + 0,00042 \cdot P_g \cdot R_{an} - 0,0002 \cdot s_g \cdot V_g - 0,0004 \cdot s_g \cdot R_{an} + 0,0011 \cdot V_g \cdot R_{an} \quad (9)$$

За отриманими експериментальними даними і остаточним рівнянням регресії в програмі Microsoft Office Excel було побудовано дві поверхні відгуку (рис. 1, 2.)

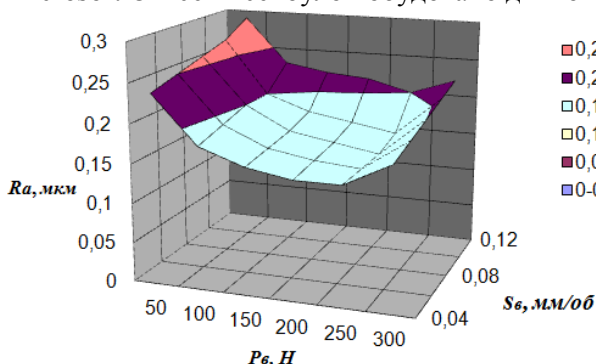


Рис. 1. Поверхня відгуку з двома факторами ( $P_g$  та  $s_g$ ) і одним параметром  $R_a$

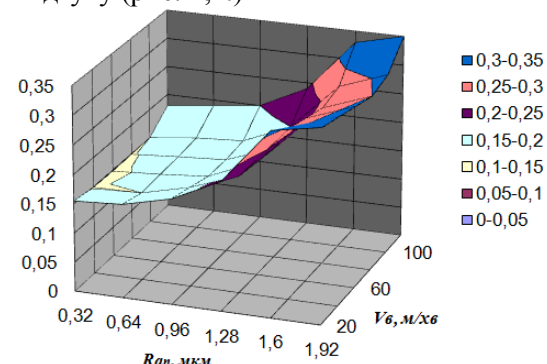


Рис. 2. Поверхня відгуку з двома факторами ( $R_{an}$  та  $V_g$ ) і одним параметром  $R_a$

**Висновки.** В результаті аналізу отриманого рівняння регресії та поверхонь відгуку для операції алмазного вигладжування встановлено, що при обробленні сталі ШХ-15 алмазним вигладжувальним інструментом з робочою частиною із синтетичного алмазу типу АКТМ найбільш раціональними є наступні режимні параметри:  $P_g = 350$  Н;  $s_g = 0,1$  мм/об;  $V_g = 60$  м/с для

початкової шорсткості поверхні  $R_{an} = 0,8$  мкм. В результаті оброблення з рекомендованими режимами досягається шорсткість  $R_a = 0,16$  мкм, що відповідає фінішній операції шліфування.

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.А. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1971. – 284 с.
2. Джонсон Н. Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лиан – М.: Мир, 1980. – 312 с.
3. Ермаков Ю.М. Перспективы алмазного выглаживания / Ю.М. Ермаков, А.А. Ершов – М.: НИИМАШ, 1984. – 64 с.
4. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
5. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
6. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
7. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко, Л.И. Ивченко – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
8. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
9. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа: монография / С.Г. Радченко. – К.: "Корнийчук", 2011. – 376 с.
10. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 05.02.2014.

УДК 536.2

Б.С. Окрепкий, Ф.М. Мигович

## ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ СИСТЕМИ ДВОХ КОНТАКТУЮЧИХ ШАРІВ

*Побудовано розв'язок осесиметричної температурної задачі для системи двох ізотропних шарів скінченної товщини з урахуванням ідеального теплового контакту.*

*Одержано формули для визначення температури в будь-якій точці системи двох тіл. Досліджено вплив коефіцієнтів теплообміну із зовнішнім середовищем і теплопровідності на розподіл температурних полів по товщині двох шарів.*

*Ключові слова:* теплопровідність, теплообмін, осесиметрична температурна задача, ізотропні матеріали, шар, ідеальний тепловий контакт.

*Рис. 4. Форм. 20. Літ. 5.*

Б.С. Окрепкий, Ф.М. Мигович

## ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВІДНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДВУХ КОНТАКТИРУЮЩИХ СЛОЕВ

*Построено решение осесиметричной температурной задачи для системы двух изотропных слоев конечной толщины с учетом идеального теплового контакта.*

*Получены формулы для определения температуры в любой точке системы двух тел. Исследовано влияние коэффициентов теплообмена с внешней средой и теплопроводности на распределение температурных полей по толщине двух слоев.*

*Ключевые слова:* теплопроводность, теплообмен, осесиметричная температурная задача, изотропные материалы, слой, идеальный тепловой контакт.

B.S. Okrepkiy, F.M. Mugovuh

## PROBLEM OF THERMAL CONDUCTIVITY FOR TWO CONTACT LAYERS

*The solution of the axes-symmetric temperature task for system of two isotropic layers taking into account ideal thermal contact between the bodies was built.*

*Formulas for determination of the temperature in the arbitrary point of the system bodies have been obtained.*

*Investigation was made on the influence of the coefficients heat exchange with the outside medium and heat conductivity on distributing of the temperature fields over thickness of two layers.*

*Keywords:* axes-symmetric, temperature, isotropic materials, layer, ideal contact, heat conductivity, heat exchange.

**Постановка проблеми.** Проблема визначення контактних деформацій і напружень, з урахуванням температурних полів, є важливою задачею для дослідження міцності деталей машин і елементів конструкцій у місцях їхньої взаємодії, при розрахунку конструкцій на пружній основі з метою раціонального використання матеріалу конструкції і несучої здатності основи.

**Аналіз остатніх досліджень і публікацій.** В праці [1] досліджено вплив температурних факторів на характер контактної взаємодії тіл. Зокрема в роботах [2,3] розв'язані задачі теплопровідності для системи двох контактуючих циліндрів як для ізотропних так і трансверсально ізотропних матеріалів. Проте недостатньо вивченими є задачі теплопровідності для системи двох контактуючих шарів.

**Мета роботи.** Побудувати розв'язок осесиметричної температурної задачі для системи двох контактуючих ізотропних шарів скінченної товщини з урахуванням ідеального теплового контакту. Дослідити вплив коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну на розподіл температурного поля в системі тіл.

**Постановка задачі.** Нехай задано два ізотропні шари скінченної товщини  $L$  і  $L_1$ , які знаходяться в ідеальному тепловому контакті. На вільних поверхнях шарів здійснюється теплообмін із зовнішнім середовищем по закону Ньютона. При заданих припущеннях необхідно визначити температурне поле в будь-якій точці системи тіл.

Введемо циліндричну систему координат  $r, \theta, z$ , центр якої лежить на нижній основі верхнього шару, а вісь  $OZ$  спрямована вертикально вгору вздовж осі симетрії. Всі величини, які позначені верхнім індексом «1» відносяться до нижнього шару, без індексів – до верхнього.

Таким чином запропонована задача розв'язується при наступних граничних умовах.

Граничні умови для температури мають вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial z} + H(T - T_c) = 0 \quad (z = L; 0 \leq r \leq \infty); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T^1}{\partial z} + H_1(T_c^1 - T^1) = 0 \quad (z = -L_1, 0 \leq r \leq \infty); \quad (2)$$

$$T = T^1 \quad (z = 0; 0 \leq r \leq \infty); \quad (3)$$

$$\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_z^1 \frac{\partial T^1}{\partial z} \quad (z = 0; 0 \leq r \leq \infty); \quad (4)$$

Тут  $\lambda_z, \lambda_z^1$ - коефіцієнти теплопровідності;  $H, H_1$  - коефіцієнти теплообміну;  $T_c, T_c^1$  - температура зовнішнього середовища.

Розв'язування крайової задачі для рівняння теплопровідності.

Відомо [4], що в осесиметричному випадку температурне поле для стаціонарного ізотропного тіла визначається із рівняння:

$$\nabla^2 T = 0. \quad (5)$$

Для визначення температурного поля в шарі введемо транс форманту Ганкеля функції  $T(r, z)$  нульового порядку:

$$\overline{T(\xi, z)} = \int_0^\infty r T(r, z) J_0(\xi r) dr, \quad (6)$$

за допомогою якої знаходимо вираз для  $T(\rho, \zeta)$  через дві довільні функції  $\varphi_1(\eta)$  і  $\varphi_2(\eta)$  для верхнього шару:

$$T(\rho, \zeta) = \int_0^\infty [\varphi_1(\eta) e^{\eta \zeta} + \varphi_2(\eta) e^{-\eta \zeta}] J_0(\eta \rho) d\eta \quad (7)$$

і через дві довільні функції  $\psi_1(\eta), \psi_2(\eta)$  для нижнього шару:

$$T^1(\rho, \zeta) = \int_0^\infty [\psi_1(\eta) e^{\eta \zeta} + \psi_2(\eta) e^{-\eta \zeta}] J_0(\eta \rho) d\eta. \quad (8)$$

Задовільнивши граничні умови (1) – (4) з урахуванням (7), (8), одержимо систему інтегральних рівнянь відносно функцій  $\varphi_1(\eta), \varphi_2(\eta)$  і  $\psi_1(\eta), \psi_2(\eta)$ :

$$\int_0^\infty [(K + \eta) e^\eta \varphi_1(\eta) + (K - \eta) e^{-\eta} \varphi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta = K T_c, \quad (9)$$

$$\int_0^\infty [(K_1 - \eta) e^{-\eta l_1} \psi_1(\eta) + (K_1 + \eta) e^{\eta l_1} \psi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta = K_1 T_c^1, \quad (10)$$

$$\int_0^\infty [\varphi_1(\eta) + \varphi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta = \int_0^\infty [\psi_1(\eta) + \psi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta, \quad (11)$$

$$\lambda_z \int_0^\infty \eta [\varphi_1(\eta) - \varphi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta = \lambda_z^1 \int_0^\infty \eta [\psi_1(\eta) - \psi_2(\eta)] J_0(\eta \rho) d\eta \quad (0 \leq \rho < \infty), \quad (12)$$

де  $K = HL, K_1 = H_1 L, l_1 = \frac{L_1}{L}$ .

Застосувавши формулу обернення інтегрального перетворення Ганкеля [5] до рівнянь (9)-(12), одержимо систему рівнянь відносно функцій  $\varphi_i(\eta), \psi_i(\eta)$  ( $i = 1, 2$ ):

$$(K + \eta) e^\eta \varphi_1(\eta) + (K - \eta) e^{-\eta} \varphi_2(\eta) = K T_c \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta),$$

$$(K_1 - \eta) e^{-\eta l_1} \psi_1(\eta) + (K_1 + \eta) e^{\eta l_1} \psi_2(\eta) = K_1 T_c \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta), \quad (13)$$

$$\varphi_1(\eta) + \varphi_2(\eta) = \psi_1(\eta) + \psi_2(\eta), \quad \lambda_z [\varphi_1(\eta) - \varphi_2(\eta)] = \lambda_z^1 [\psi_1(\eta) - \psi_2(\eta)],$$



де  $\delta(\alpha - \beta) = \alpha \int_0^\infty \xi J_m(\alpha\xi) J_m(\beta\xi) d\xi$  - дельта-функція Дірака.

Із системи рівнянь (13) одержимо:

$$\varphi_2(\eta) = -\frac{K + \eta}{K - \eta} e^{2\eta} \varphi_1(\eta) + \frac{K T_c}{K - \eta} e^\eta \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \psi_2(\eta) &= -\frac{K_1 - \eta}{K_1 + \eta} e^{-2\eta l_1} \psi_1(\eta) + \frac{K_1 T_c^1}{K_1 + \eta} e^{-\eta l_1} \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta), \\ \frac{e^\eta}{K - \eta} (\eta \operatorname{ch} \eta + K \operatorname{sh} \eta) \varphi_1(\eta) + \frac{e^{-\eta l_1}}{K_1 + \eta} (\eta \operatorname{ch} \eta l_1 + K_1 \operatorname{sh} \eta l_1) \psi_1(\eta) &= \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{K T_c}{K - \eta} e^\eta - \frac{K_1 T_c^1}{K_1 + \eta} e^{-\eta l_1} \right) \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_z e^\eta}{K - \eta} (\eta \operatorname{sh} \eta + K \operatorname{ch} \eta) \varphi_1(\eta) - \frac{\lambda_z^1}{K_1 + \eta} e^{-\eta l_1} (\eta \operatorname{sh} \eta l_1 + K_1 \operatorname{ch} \eta l_1) \psi_1(\eta) &= \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_z K}{K - \eta} T_c e^\eta - \frac{\lambda_z^1}{K_1 + \eta} K_1 T_c^1 e^{-\eta l_1} \right) \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta). \end{aligned} \quad (16)$$

Розв'язок систем рівнянь (16) матиме вигляд:

$$\varphi_1(\eta) = \frac{\Delta_1(\eta)}{\Delta(\eta)}, \quad \psi_1(\eta) = \frac{\Delta_2(\eta)}{\Delta(\eta)}, \quad (17)$$

де 
$$\Delta(\eta) = \frac{4 e^{(1-l_1)\eta} \lambda_z^1}{(K - \eta)(K_1 + \eta)} Q(\eta),$$

$$Q(\eta) = (\eta \operatorname{ch} \eta + K \operatorname{sh} \eta)(K_1 \operatorname{ch} \eta l_1 + \eta \operatorname{sh} \eta l_1) + \frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} (K_1 \operatorname{sh} \eta l_1 + \eta \operatorname{ch} \eta l_1)(K \operatorname{ch} \eta + \eta \operatorname{sh} \eta),$$

$$\Delta_1(\eta) = \frac{2e^{-\eta l_1} \lambda_z^1}{K_1 + \eta} P(\eta), \quad \Delta_2(\eta) = \frac{2e^\eta \lambda_z}{K - \eta} \frac{\lambda_z^1}{\lambda_z^1} P_1(\eta), \quad (18)$$

$$P(\eta) = A_1(\eta)(K_1 \operatorname{ch} \eta l_1 + \eta \operatorname{sh} \eta l_1) + A_2(\eta)(\eta \operatorname{ch} \eta l_1 + K_1 \operatorname{sh} \eta l_1),$$

$$P_1(\eta) = \frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} A_1(\eta)(K \operatorname{ch} \eta + \eta \operatorname{sh} \eta) - A_2(\eta)(K \operatorname{sh} \eta + \eta \operatorname{ch} \eta),$$

$$A_1(\eta) = \frac{K_1(K - \eta)e^{-\eta l_1} T_c^1 - K(K_1 + \eta)e^\eta T_c}{(K_1 + \eta)(K - \eta)} \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta),$$

$$A_2(\eta) = \frac{\frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} K(K_1 + \eta)e^\eta T_c - K_1(K - \eta)e^{-\eta l_1} T_c^1}{(K_1 + \eta)(K - \eta)} \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta(\eta - \Delta).$$

Температурне поле в системі тіл, згідно (7), (8), (14), (17), (18) знаходиться за формулами:

а) температура у верхньому шарі:

$$\begin{aligned} T(\rho, \eta) &= T_c + \int_0^\infty \frac{G(\eta, \zeta)}{K - \eta} \frac{\Delta_1(\eta)}{\Delta(\eta)} J_0(\eta \rho) d\eta = \\ &= T_c + \frac{K_1(T_c - T_c^1)}{(K + 1)K_1 + \frac{\lambda_z}{\lambda_z^1}(1 + K_1 l_1)K} [K(\zeta - 1) - 1] \quad (0 \leq \zeta \leq 1, \quad 0 \leq \rho < \infty), \end{aligned} \quad (19)$$

де  $G(\eta, \zeta) = e^\eta [K \operatorname{sh}(\zeta - 1)\eta - \eta \operatorname{ch}(\zeta - 1)\eta]$ ;

б) температура в нижньому шарі:

$$T^1(\rho, \zeta) = T_c^1 + \int_0^\infty \frac{G_1(\eta, \zeta) \Delta_2(\eta)}{K_1 + \eta \Delta(\eta)} J_0(\eta \rho) d\eta =$$

$$= T_c + \frac{K \frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} (T_c - T_c^1)}{K_1(1+K) + \frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} (1+K_1 l_1) K} [K_1(\zeta + l_1) + 1] \quad (-l_1 \leq \zeta \leq 0, \quad 0 \leq \rho < \infty), \quad (20)$$

де  $G_1(\eta, \zeta) = e^{-\eta l_1} [K_1 sh(\zeta + l_1) \eta + \eta ch(\zeta + l_1) \eta]$ .

Зроблено числові підрахунки і побудовано графіки для температур  $\frac{T}{T_0}$ ,  $\frac{T^1}{T_0}$  (пунктирною лінією для позначення  $\frac{T^1}{T_0}$ ) при фіксованих значеннях:  $T_c = T_0$ ,  $T_c^1 = 0$ ,  $l_1 = \frac{1}{2}$ .

На рис. 1 показано розподіл температури по товщині шарів при фіксованих  $\frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} = 0,5$ ;  $K_1 = \infty$ ,  $K = \infty$ .

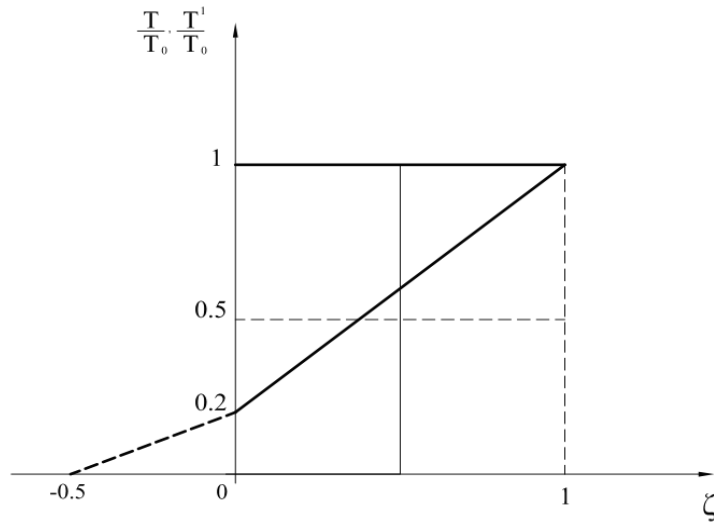


Рис. 1. Розподіл температури по товщині шарів

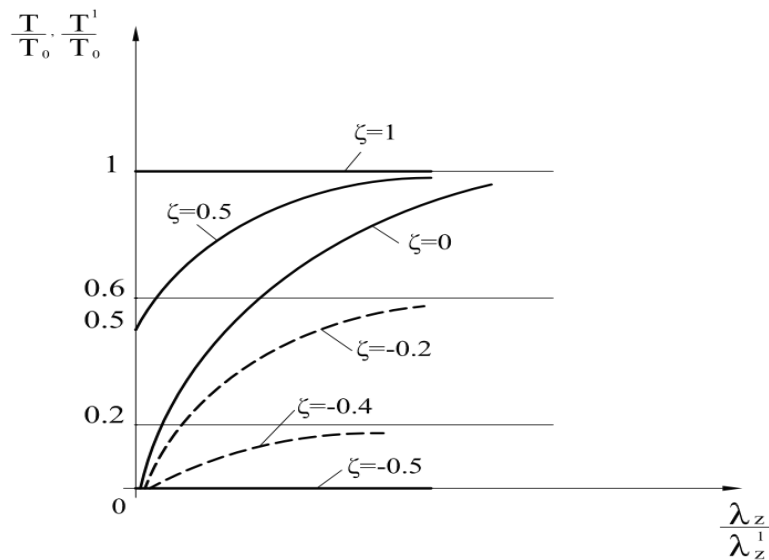


Рис. 2. Розподіл температури по товщині шарів в залежності від параметра  $\frac{\lambda_z}{\lambda_z^1}$

На рис. 2 відображає розподіл температури по товщині шарів при фіксованому  $K_1 = \infty$ ,  $K = \infty$  в залежності від параметра  $\frac{\lambda_z}{\lambda_z^1}$ .

На рис. 3 показано розподіл температури по товщині шарів при фіксованих  $\frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} = 0,5$ ,  $K_1 = \infty$  в залежності від параметра  $K$ .

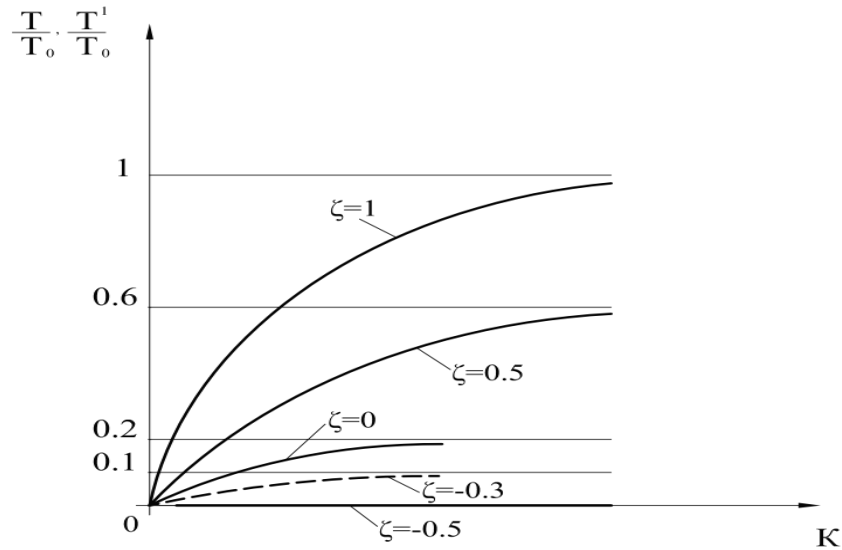


Рис. 3. Розподіл температури по товщині шарів в залежності від параметра  $K$

На рис. 4 відображає розподіл температури по товщині шарів при фіксованому  $\frac{\lambda_z}{\lambda_z^1} = 0,5$ ,  $K = \infty$  в залежності від параметра  $K_1$ .

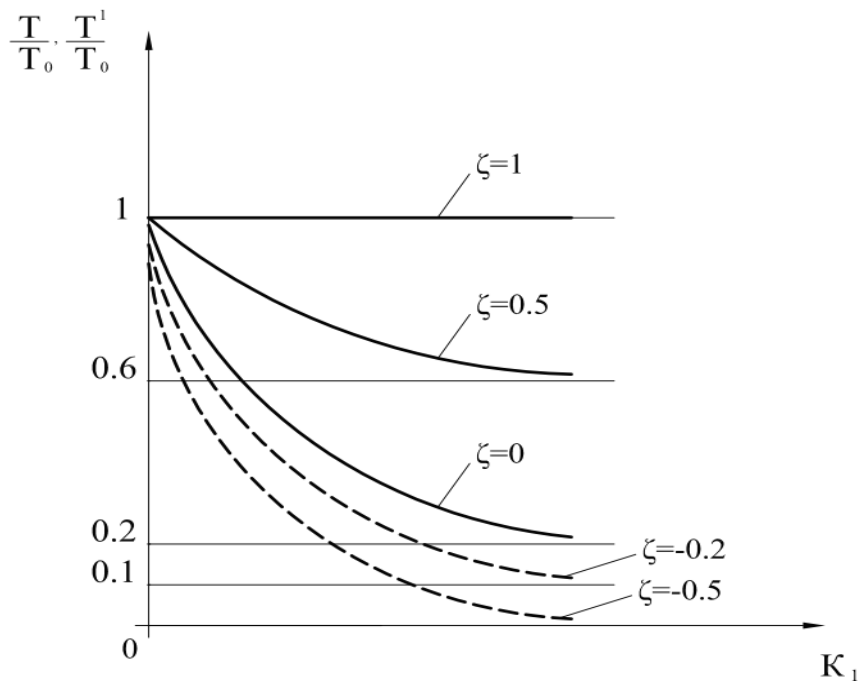


Рис. 4. Розподіл температури по товщині шарів в залежності від параметра  $K_1$

**Висновок.** Застосовуючи інтегральне перетворення Ганкеля температурна задача зведена до визначення деяких функцій із системи лінійних алгебраїчних рівнянь, через які знаходяться температурні поля в будь-якій точці системи двох тіл.

Результати розрахунків показують, що коефіцієнти теплопровідності і теплообміну значно впливають на розподіл температури в системі двох тіл.

1. Грилицкий Д.В. Осесиметричные контактные задачи теории упругости и термоупругости /Д.В. Грилицкий, Я.М. Кизыма. – Львов: Изд.-во при Львов. ун.те, 1981, – 135 с.
2. Окрепкий Б.С., Новосад І.Я. Осесиметрична температурна задача для системи двох контактуючих циліндрів. // Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». – ЛНТУ. – Вип. № 28, – Луцьк. – 2010. – С. 367-379.
3. Окрепкий Б.С., Новосад І.Я. Задача теплопровідності для системи двох контактуючих трансверсально-ізотропних циліндричних тіл. // Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка» «Наукові нотатки», ЛНТУ, Вип. №30. Луцьк, 2011. – С. 131-140.
4. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / – К.: Наук. думка, 1970, – 304 с.
5. Снеддон И.Н. Преобразование Фурье. – М.: ИЛ., 1956, – 668 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

**Б.С. Окрепкий, І.Я. Новосад**  
**ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ КРУГОВОГО ЦИЛІНДРА**  
**З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛООБМІНУ ЧЕРЕЗ ТОНКИЙ ПРОМІЖКОВИЙ ШАР**

*Побудовано розв'язок осесиметричної температурної задачі для ізотропного циліндра з урахуванням теплообміну між циліндром і зовнішнім середовищем через тонкий проміжковий шар. Отримано формули для визначення температурного поля в кожній точці циліндра. Досліджено вплив коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну, а також контактної провідності проміжкового шару на розподіл температури в циліндрі.*

*Ключові слова: теплопровідність, осесиметрична температурна задача, круговий циліндр, тонкий проміжковий шар, неідеальний тепловий контакт, ізотропні матеріали, теплообмін.*

*Рис. 5. Форм. 20. Літ. 7.*

**Б.С. Окрепкий, И.Я. Новосад**  
**ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА**  
**С УЧЕТОМ ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ ТОНКИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ**

*Построено решение осесиметричной температурной задачи для изотропного цилиндра с учетом теплообмена между цилиндром и внешней средой через тонкий промежуточный слой. Получены формулы для определения температурного поля в каждой точке цилиндра. Исследовано влияние коэффициентов теплопроводности и теплообмена, а также контактной проводимости промежуточного слоя на распределение температуры в цилиндре.*

*Ключевые слова: теплопроводность, осесиметричная температурная задача, круговой цилиндр, тонкий промежуточный слой, неидеальный тепловой контакт, изотропные материалы, теплообмен.*

**B.S. Okrepkiy, I.Y. Novosad**  
**PROBLEM OF THERMAL CONDUCTIVITY FOR CIRCULAR CYLINDER**  
**IN VIEW OF HEAT EXCHANGE THROUGH THIN INTERMEDIATE LAYER**

*The article suggests the solution to axially symmetrical thermal problem for an isotropic cylinder considering heat transfer between the cylinder and the environment through a thin intermediate layer. Formulas for determining the temperature field at each point of the cylinder have been received. The influence of thermal conductivity and heat transfer coefficient, as well as, contact conductance of the intermediate layer on the temperature distribution in the cylinder has been investigated.*

*Keywords: thermal conductivity, axially symmetrical temperature problem, a circular cylinder, a thin intermediate layer, imperfect thermal contact, isotropic materials, heat transfer.*

**Постановка проблеми.** Визначення деформацій і напружень з урахуванням температурних факторів є важливим завданням для дослідження міцності деталей машин і елементів конструкцій у місцях їхньої взаємодії, при розрахунку конструкцій на пружній основі для раціонального використання конструкції і несучої здатності основи.

**Аналіз остатніх досліджень і публікацій.** В праці [1] досліджено вплив температурних факторів на характер взаємодії тіл. В статтях [2,3] розв'язані осесиметричні температурні задачі для системи двох контактуючих циліндрів з урахуванням неідеального теплового контакту між тілами. Зокрема в праці [4] розв'язана задача теплопровідності для двох контактуючих циліндрів з урахуванням неідеального теплового контакту через тонкий проміжковий шар.

Проте недостатньо вивчені задачі теплопровідності для кругового циліндра з урахуванням теплообміну через тонкий проміжковий шар між циліндром і зовнішнім середовищем.

**Мета роботи.** Побудувати розв'язок осесиметричної температурної задачі для кругового ізотропного циліндра з урахуванням теплообміну через тонкий проміжковий шар між циліндром і зовнішнім середовищем. Дослідити вплив коефіцієнтів теплообміну і теплопровідності, а також контактної провідності проміжкового шару на розподіл температурного поля в циліндрі.

**Постановка задачі.** Нехай задано круговий ізотропний циліндр радіуса  $R$  і довжини  $L$ . На верхній основі і бічній поверхні циліндра здійснюється теплообмін із зовнішнім середовищем по закону Ньютона. На нижній поверхні циліндра здійснюється теплообмін із зовнішнім середовищем через тонкий проміжковий шар [6]. При заданих припущеннях необхідно визначити температурне поле в циліндрі.

Введемо циліндричну систему координат  $r, \theta, z$  центр якої лежить на нижній поверхні циліндра, а вісь  $OZ$  спрямована вздовж осі циліндра. Таким чином запропонована задача розв'язується при наступних граничних умовах.

Граничні умови для температури мають вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial z} + H_1(T - T_{01}) = 0 \quad (z = L; 0 \leq r \leq R) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} + H_2(T - T_{02}) = 0 \quad (0 \leq z \leq L; z = R) \quad (2)$$

$$\lambda_0 \left[ \left( 1 + \frac{\alpha_0}{2h_0} \right) T - \frac{\lambda_z}{2h_0} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \lambda_z \left( 1 + \frac{\alpha_0}{h_0} \right) \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_0(T_c - T) = 0 \quad (z = 0; 0 \leq r \leq R) \quad (3)$$

Тут  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$  - оператор Лапласа;  $\lambda_z$  - коефіцієнт теплопровідності циліндра,

$\lambda_0, \alpha_0$  - коефіцієнти теплопровідності і теплообміну проміжкового шару;  $h_0$  - контактна провідність;  $T_c, T_{01}, T_{02}$  - температура зовнішнього середовища.

Розв'язування крайової задачі для рівняння теплопровідності.

Відомо [7], що в осесиметричному випадку температурне поле для ізотропного тіла визначається із рівняння:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4)$$

Температурне поле в циліндрі знаходимо методом Фур'є. Загальний розв'язок має вигляд:

$$T(r, z) = A_0 z + B_0 + D_0(r^2 - 2z^2) + \sum_{k=1}^{\infty} J_0(\beta_k r) (A_k \operatorname{sh} \beta_k z + B_k \operatorname{ch} \beta_k z) + \sum_{k=1}^{\infty} I_0(\gamma_k r) (C_k \sin \gamma_k z + D_k \cos \gamma_k z) \quad (5)$$

де  $A_k, B_k, C_k, D_k, (k = \overline{0, \infty})$  - довільні постійні;  $J_0(\beta_k r)$  функція Бесселя першого роду дійсного аргументу;  $I_0(\gamma_k r)$  функція Бесселя першого роду уявного аргументу;

$\beta_k = \frac{\mu_k}{R}, \gamma_k = \frac{k\pi}{L}$  - власні значення задачі, які являються коренями характеристичних рівнянь

$$\sin \gamma_k L = 0, \quad J_1(\beta_k R) = 0 \quad (6)$$

В формулі (5) для поставленої задачі можна покласти  $C_k = 0 (k = \overline{0, \infty})$ . Інші постійні необхідно визначити із граничних умов.

Задовольнивши граничній умові (1), маємо співвідношення які зв'язують невідомі  $A_k, B_k, D_k, (k = \overline{0, \infty})$ :

$$A_0 - 4D_0 l R + \frac{1}{R} \sum_{k=1}^{\infty} \mu_k J_0(\mu_k \rho) (A_k \operatorname{ch} \mu_k l + B_k \operatorname{sh} \mu_k l) + H_1 [A_0 l R + B_0 + D_0 R^2 (\rho^2 - 2l^2) + \sum_{k=1}^{\infty} J_0(\mu_k \rho) (A_k \operatorname{sh} \mu_k l + B_k \operatorname{ch} \mu_k l) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k I_0\left(\frac{k\pi}{l} \rho\right) D_k] = H_1 T_{01} \quad (7)$$

де  $l = \frac{L}{R}, \rho = \frac{r}{R}$ .

Помноживши (7) на  $\rho, \rho J_0(\mu_n \rho)$  і про інтегрувавши їх по  $\rho$  в межах від 0 до 1 з урахуванням ортогональності функцій Бесселя :

$$а) \int_0^1 \rho J_0(\mu_k \rho) d\rho = 0$$

$$б) \int_0^1 \rho J_0(\mu_n \rho) J_0(\mu_k \rho) d\rho = \begin{cases} 0, & \mu_k \neq \mu_n \\ \frac{1}{2} J_0^2(\mu_n), & \mu_k = \mu_n \end{cases}$$

і значень інтегралів

$$в) \int_0^1 \rho I_0\left(\frac{k\pi}{l} \rho\right) d\rho = \frac{l}{k\pi} I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right)$$

$$г) \int_0^1 \rho J_0(\mu_n \rho) I_0\left(\frac{k\pi}{l} \rho\right) d\rho = \frac{k\pi}{l} J_0(\mu_n) \frac{I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right)}{\mu_n^2 + \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2}$$

$$д) \int_0^1 \rho^3 J_0(\mu_n \rho) d\rho = \frac{2J_0(\mu_n)}{\mu_n^2}$$

одержимо зв'язок між невідомими постійними  $B_k (k = \overline{0, \infty})$  і  $A_k, D_k (k = \overline{0, \infty})$

$$B_0 = T_{01} - \left(\frac{1}{k_1} + l\right) A_0 R - D_0 R^2 \left(\frac{1}{2} - 2l^2 - \frac{4l}{k_1}\right) - \frac{2l}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right)}{k} D_k, \quad (9)$$

$$B_n = \frac{k_1}{\mu_n sh \mu_n l + k_1 ch \mu_n l} \left\{ - \left(\frac{\mu_n}{k_1} ch \mu_n l + sh \mu_n l\right) A_n - \frac{4R^2 D_0}{\mu_n^2 J_0(\mu_n)} - \frac{2\pi}{l J_0(\mu_n)} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k k t_{n,k} I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right) D_k \right\} \\ (n = \overline{1, \infty})$$

$$\text{де } k_1 = H_1 R, \quad t_{n,k} = \frac{1}{\mu_n^2 + \left(\frac{k\pi}{l}\right)^2}.$$

Задовольнивши граничній умові (2), маємо:

$$2D_0 R + \frac{\pi}{l R} \sum_{k=1}^{\infty} k I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right) \cos \frac{k\pi}{l} \zeta D_k + H_2 [A_0 R \zeta + B_0 + D_0 R^2 (1 - 2\zeta^2) + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} J_0(\mu_k) (A_k sh \mu_k \zeta + B_k ch \mu_k \zeta) + \sum_{k=1}^{\infty} I_0\left(\frac{k\pi}{l}\right) \cos \frac{k\pi}{l} \zeta D_k] = H_2 T_{02} \quad (0 \leq \zeta \leq l) \quad (10)$$

Помноживши (10) на  $\cos \frac{\pi n}{l} \zeta$  ( $n = \overline{1, \infty}$ ) і про інтегрувавши по  $\zeta$  в межах від 0 до  $l$  з урахуванням ортогональності тригонометричних функцій і формул (9), одержимо співвідношення, які зв'язують невідомі  $A_k$  і  $D_k (k = \overline{0, \infty})$ :

$$e_{0,0} D_0 R^2 - \frac{2l^2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right)}{k} D_k - \frac{2\pi k_1}{l} \sum_{k=1}^{\infty} e(\mu_k) \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m m I_1\left(\frac{m\pi}{l}\right) t_{k,m} D_m - \\ - A_0 R l \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{2} l\right) - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_k) u_{k,0}}{\mu_k} A_k = l (T_{02} - T_{01}), \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 & e_{n,0} R^2 D_0 + \left[ \frac{\pi}{2k_2} n I_1 \left( \frac{\pi n}{l} \right) + \frac{1}{2} l I_0 \left( \frac{\pi n}{l} \right) \right] D_n - \frac{2\pi}{l} k_1 (-1)^n \sum_{k=1}^{\infty} \mu_k^2 e(\mu_k) l(\mu_k) t_{k,n} \times \\
 & \times \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m m I_1 \left( \frac{m \pi}{l} \right) t_{k,m} D_m + A_0 R \frac{l^2}{\pi^2 n^2} [(-1)^n - 1] - \sum_{k=1}^{\infty} \mu_k u_{k,n} t_{k,n} J_0(\mu_k) A_k = 0
 \end{aligned}$$

де  $k_2 = H_2 R$ ,  $e_{0,0} = \frac{2l}{k_2} + \frac{1}{2} l + \frac{4}{3} l^3 + \frac{4l}{k_1} - 4k_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e(\mu_k)}{\mu_k^2}$ ,  $e(\mu_k) = \frac{th\mu_k l}{\mu_k (\mu_k th\mu_k l + k_1)}$ ,

$$u_{k,0} = 1 - \frac{k_1}{\mu_k sh\mu_k l + k_1 ch\mu_k l}, \quad u_{k,n} = 1 - \frac{(-1)^n k_1}{\mu_k sh\mu_k l + k_1 ch\mu_k l},$$

$$e_{n,0} = -\frac{4 l^3 (-1)^n}{\pi^2 n^2} - 4(-1)^n k_1 \sum_{k=1}^{\infty} e(\mu_k) t_{k,n} \tag{12}$$

Задовільнивши граничну умову (3) і врахувавши формули (9), одержимо співвідношення, які зв'язують невідомі  $D_k(k = \overline{0, \infty})$  і  $A_k(k = \overline{0, \infty})$ .

$$\begin{aligned}
 & \left[ 4\gamma_2 + \gamma_0 \left( \frac{1}{2} - \rho^2 - 2l^2 - \frac{4l}{k_1} \right) + 4k_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\gamma_0 + \gamma_3 \mu_k^2) J_0(\mu_k \rho)}{\mu_k^2 J_0(\mu_k) (\mu_k sh\mu_k l + ch\mu_k l)} \right] D_0 R^2 + \\
 & + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2l(-1)^k I_1 \left( \frac{k\pi}{l} \right)}{\pi k} \gamma_0 + \frac{2\pi}{l} k_1 (-1)^k k I_1 \left( \frac{k\pi}{l} \right) \times \right. \\
 & \times \sum_{m=1}^{\infty} t_{m,k} (\gamma_2 \mu_m^2 + \gamma_0) J_0(\mu_m \rho) + \left. \left( \frac{\pi^2}{l^2} \gamma_2 k^2 - \gamma_0 \right) I_0 \left( \frac{k\pi}{l} \rho \right) \right\} D_k + \left[ \gamma_1 + \left( \frac{1}{k_1} + l \right) \gamma_0 \right] A_0 + \\
 & + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \mu_k^3 + \gamma_1 \mu_k + k_1 (\gamma_2 \mu_k^2 + \gamma_0) \frac{\mu_k - th\mu_k l}{\mu_k th\mu_k l + k_1} \right] J_0(\mu_k \rho) A_k = \gamma_0 [T_{01} - T_c] \tag{13}
 \end{aligned}$$

де,  $\gamma_0 = 2 h_0^1 r_1$ ,  $\gamma_1 = 2(r_0 h_0^1 + r_1)$ ,  $h_0^1 = \frac{h_0 R}{\lambda_z}$ ,  $r_0 = \frac{\lambda_z}{\lambda_0^*} = \frac{\lambda_z R}{\lambda_0}$ ,

$$r_1 = \frac{\alpha_0}{\lambda_0^*} = \frac{\alpha_0 R}{\lambda_0}, \quad \gamma_2 = 2 \left( h_0^1 + \frac{1}{2 r_0} \right), \quad \gamma_3 = 2 \left( 1 + h_0^1 + \frac{1}{r_0} \right).$$

Помноживши обидві частини рівності (13) на  $\rho$ ,  $\rho J_0(\mu_n \rho)$ , і проінтегрувавши їх по  $\rho$ , в межах від 0 до 1, з урахуванням ортогональності функцій Бесселя і значень інтегралів(8), знайдемо співвідношення, які зв'язують невідомі  $A_k$  і  $D_k(k = \overline{0, \infty})$ :

$$\begin{aligned}
 \text{а) } & \left[ 2\gamma_2 - \gamma_0 \left( l^2 + \frac{2l}{k_1} \right) \right] R^2 D_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{l}{\pi} \gamma_0 \frac{[(-1)^k - 1]}{k} + \frac{\pi}{l} \gamma_2 k \right\} I_1 \left( \frac{k\pi}{l} \right) D_k + \\
 & + \frac{1}{2} \left[ \gamma_1 + \left( \frac{1}{k_1} + l \right) \gamma_0 \right] A_0 = \frac{1}{2} \gamma_0 [T_{01} - T_c]. \tag{15}
 \end{aligned}$$

$$\text{б) } \left[ -\frac{2\gamma_0}{\mu_n^2} J_0(\mu_n) R^2 + 2k_1 \frac{(\gamma_0 + \gamma_2^* \mu_n^2) J_0(\mu_n)}{\mu_n^2 (\mu_n sh\mu_n l + ch\mu_n l)} \right] D_0 R^2 +$$



$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2\pi k_1}{l} (\gamma_2 \mu_n^2 + \gamma_0) \frac{J_0^2(\mu_n)}{2} t_{n,k} + \left( \frac{\pi^2}{l^2} \gamma_2 k^2 - \gamma_0 \right) \frac{\pi}{l} J_0(\mu_n) \frac{1}{\mu_n^2 + \left( \frac{k \pi}{l} \right)^2} \right\} k I_1 \left( \frac{k \pi}{l} \right) D_k +$$

$$+ \left( \mu_n^3 + \gamma_1 \mu_n + k_1 (\gamma_2 \mu_n^2 + \gamma_0) \right) \frac{\mu_n - th \mu_n l}{\mu_n th \mu_n l + k_1} \frac{J_0^2(\mu_n)}{2} A_n = 0$$

Ввівши позначення  $A_0 = C_0^1 T_{01}$ ,  $A_k = C_k^1 T_{01}$ ,  $D_0 R^2 = T_{01} C_0^{(2)}$ ,  $k^2 I_1 \left( \frac{k \pi}{l} \right) D_k = T_{01} C_k^{(2)}$  (16)

безмежні системи лінійних алгебраїчних рівнянь (11), (15) приймуть вигляд:

$$\alpha_{0,0}^{(1)} C_0^{(1)} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(1)} \alpha_{0,k}^{(1)} + \alpha_{0,0}^{(2)} C_0^{(2)} + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{0,k}^{(2)} C_k^{(2)} = b_0^{(1)}$$

$$\alpha_{n,0}^{(1)} C_0^{(1)} + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{n,k}^{(1)} C_k^{(1)} + \alpha_{n,0}^{(2)} C_0^{(2)} + \alpha_{n,n}^{(2)} C_n^{(2)} + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{n,k}^{(2)} C_k^{(2)} = b_n^{(1)} \quad (17)$$

$$\beta_{0,0}^{(1)} C_0^{(1)} + \beta_{0,0}^{(2)} C_0^{(2)} + \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{0,k}^{(2)} C_k^{(2)} = b_0^{(2)}$$

$$\beta_{n,n}^{(1)} C_n^{(1)} + \beta_{n,0}^{(2)} C_0^{(2)} + \sum_{k=1}^{\infty} \beta_{n,k}^{(2)} C_k^{(2)} = b_n^{(2)}$$

де  $\alpha_{0,0}^{(1)} = \left( \frac{1}{k_1} + \frac{1}{2} l \right)$ ,  $\alpha_{0,k}^{(1)} = \frac{J_0(\mu_k) u_{k,0}}{l \mu_k}$ ,  $\alpha_{0,0}^{(2)} = -\frac{e_{0,0}}{l}$ ,  $b_0^1 = 1 - \frac{T_{02}}{T_{01}}$ ,

$$\alpha_{0,k}^{(2)} = \frac{2 l (-1)^k}{\pi k^3} + \frac{2 \pi k_1 (-1)^k}{l^2 k} \sum_{m=1}^{\infty} t_{m,k} e(\mu_m).$$

$$\alpha_{n,0}^{(1)} = \frac{l^2}{\pi^2 n^2} [(-1)^n - 1], \quad \alpha_{n,k}^{(1)} = -\mu_k u_{k,n} t_{k,n} J_0(\mu_k) \quad (18)$$

$$\alpha_{n,0}^{(2)} = e_{n,0}, \quad \alpha_{n,n}^{(2)} = \frac{\pi}{2k_2} \left[ 1 + \frac{1}{2} l \frac{I_0 \left( \frac{\pi n}{l} \right)}{n I_1 \left( \frac{\pi n}{l} \right)} \right] \frac{1}{n}$$

$$\alpha_{n,k}^{(2)} = -\frac{2\pi k_1 (-1)^{n+k}}{l k} \sum_{m=1}^{\infty} t_{m,k} \mu_m^2 e(\mu_m) t_{m,n}$$

$$b_n^{(1)} = 0;$$

$$\beta_{0,0}^{(1)} = \frac{1}{2} \left[ \gamma_1 + \left( \frac{1}{k_1} + l \right) \gamma_0 \right], \quad \beta_{0,0}^{(2)} = 2\gamma_2 - \gamma_0 \left( l^2 + \frac{2 l}{k_1} \right), \quad \beta_{0,k}^{(2)} = \frac{l}{\pi} \gamma_0 \frac{[(-1)^k - 1]}{k^3} + \frac{\pi \gamma_2}{l k},$$

$$b_{0,2} = \frac{1}{2} \gamma_0 \left( 1 - \frac{T_c}{T_{01}} \right)$$

$$\beta_{n,n}^{(1)} = \mu_n^3 + \gamma_1 \mu_n + k_1 (\gamma_2 \mu_n^2 + \gamma_0) \frac{\mu_n - th \mu_n l}{\mu_n th \mu_n l + k_1} \frac{J_0^2(\mu_n)}{2}$$

$$\beta_{n,0}^{(2)} = -\frac{2\gamma_0}{\mu_n^2} J_0(\mu_n) + 2k_1 \frac{(\gamma_0 + \gamma_3 \mu_n^2)}{\mu_n^2 (\mu_n sh \mu_n l + ch \mu_n l)}$$

$$\beta_{n,k}^{(2)} = \frac{2\pi k_1}{l} (\gamma_2 \mu_n^2 + \gamma_0) \frac{t_{n,k}}{k} (-1)^k \frac{J_0^2(\mu_n)}{2} + \left( \frac{\pi^2}{l^2} \gamma_2 k^2 - \gamma_0 \right) \frac{\pi}{k l} J_0(\mu_n) \frac{1}{\mu_n^2 + \left( \frac{k\pi}{l} \right)^2},$$

$$b_n^{(2)} = 0.$$

Температурне поле в циліндрі, згідно формул (5, 9) і позначень (16), обчислюємо за формулою

$$T(\rho, \zeta) = T_0^{(1)} \left\{ 1 + \Phi_0^{(1)}(\rho, \zeta) C_0^{(1)} + \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_k^{(1)}(\zeta) J_0(\mu_k \rho) C_k^{(1)} + \Phi_0^{(2)}(\rho, \zeta) C_0^{(2)} + \sum_{k=1}^{\infty} \Phi_k^{(2)}(\zeta) C_k^{(2)} \right\} \quad (19)$$

$$(0 \leq \zeta \leq l, \quad 0 \leq \rho \leq 1)$$

$$\text{де } \Phi_0^{(1)}(\zeta) = \frac{1}{k_1} + l - \zeta, \quad \Phi_k^{(1)}(\zeta) = \frac{k_1 \text{sh} \mu_k (\zeta - l) - \mu_k \text{ch} \mu_k (\zeta - l)}{\mu_k \text{sh} \mu_k l + k_1 \text{ch} \mu_k l},$$

$$\Phi_0^{(2)}(\rho, \zeta) = \rho^2 - 2\zeta^2 - \frac{1}{2} + 2l^2 + \frac{4l}{k_1} - 4k_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_k \rho) \text{ch} \mu_k \zeta}{\mu_k^2 J_0(\mu_k) (\mu_k \text{sh} \mu_k l + k_1 \text{ch} \mu_k l)}$$

$$\Phi_k^{(2)}(\rho, \zeta) = -\frac{2l}{\pi} \frac{(-1)^k}{k^3} - \frac{2\pi}{l} \frac{(-1)^k}{k} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_m \rho) t_{m,k} \text{ch} \mu_m \zeta}{J_0(\mu_m) (\mu_m \text{sh} \mu_m l + k_1 \text{ch} \mu_m l)} + \frac{I_0\left(\frac{k\pi}{l} \rho\right)}{k^2 I_1\left(\frac{k\pi}{l}\right)} \cos \frac{k\pi}{l} \zeta \quad (20)$$

Розглянуто числовий приклад.

На основі викладеного вище видно, що в кінцевому результаті, розв'язок температурної задачі зводиться до визначення деяких постійних із безмежної системи лінійних алгебраїчних рівнянь, через які знаходяться температурне поле в будь-якій точці циліндра. Дана система рівнянь є квазірегулярна при любых співвідношеннях теплофізичних характеристиках тіла. Враховуючи це, розв'язок її знаходимо методом редукції із усіченої системи.

Для числових підрахунків розв'язувались системи 30-ти лінійних алгебраїчних рівнянь з 30-ма невідомими для  $T_{01} = T_0$ ,  $T_{02} = 0$ ,  $T_c = 0$ ,  $k_1 = \infty$ ,  $k_2 = 0$ ,  $l = 1$ .

На рис.1 показано розподіл безрозмірної темпера тури  $\alpha_1 = \frac{T}{T_0}$  по товщині циліндра при

фіксованому  $h_0^1 = \frac{h_0 R}{\lambda_z} = 1$ ,  $r_1 = \frac{\alpha_0 R}{\lambda_0} = 1$ , і різних значеннях  $r_0 = \frac{\lambda_z R}{\lambda_0}$  (цифри біля кривих).

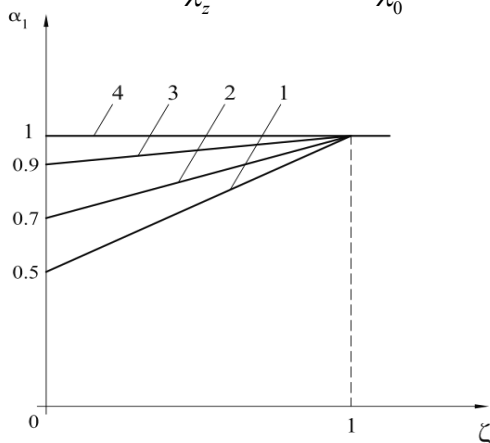


Рис. 1. Розподіл температури по товщині циліндра при фіксованому  $h_0^1 = 1$ ,  $r_1 = 1$  і різних значеннях  $r_0$ : крива 1 –  $r_0 = 0$ ; 2 –  $r_0 = 1$ ; 3 –  $r_0 = 10$ ; 4 –  $r_0 = \infty$

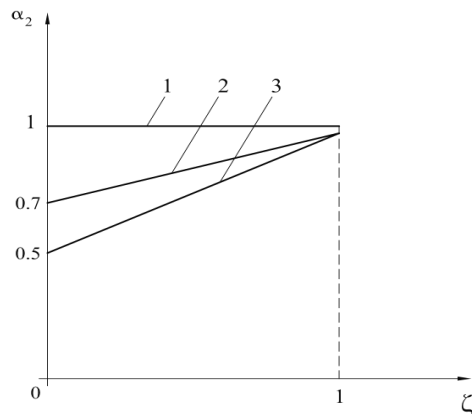


Рис. 2. Розподіл температури по товщині циліндра при фіксованому  $r_0 = 1$ ,  $r_1 = 1$  і різних значеннях  $h_0^1$ : крива 1 –  $h_0^1 = 0$ ; 2 –  $h_0^1 = 1$ ; 3 –  $h_0^1 = \infty$

На рис. 2 показано розподіл безрозмірної температури  $\alpha_2 = \frac{T}{T_0}$ , по товщині циліндра при фіксованому  $r_0 = 1$ ,  $r_1 = 1$  і різних значеннях  $h_0^{(1)}$  (цифри біля кривих).

На рис.3 показано розподіл безрозмірної температури  $\alpha_3 = \frac{T}{T_0}$ , в циліндрі при  $\zeta = 0$   $r_1 = 1$  і різних значеннях  $h_0^{(1)}$  (цифри біля кривих).

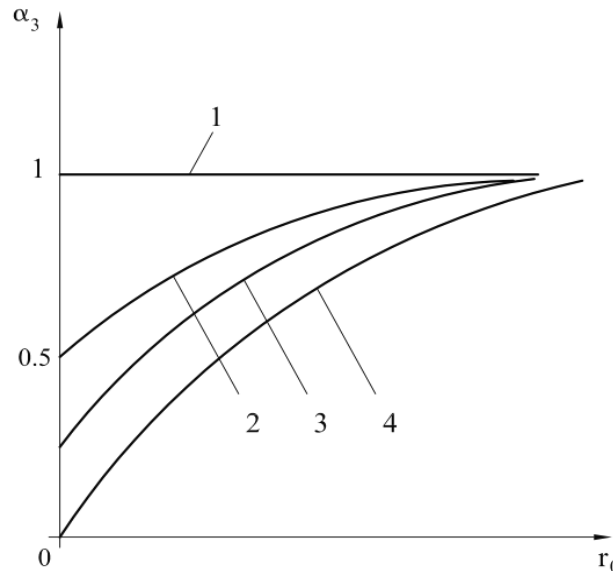


Рис. 3. Розподіл температури в циліндрі при  $\zeta = 0$ ,  $r_1 = 1$  і значеннях  $h_0^1$ : крива 1 –  $h_0^1 = 0$ ; 2 –  $h_0^1 = 1$ ; 3 –  $h_0^1 = 5$ ; 4 –  $h_0^1 = \infty$ .

На рис. 4 показано розподіл безрозмірної температури  $\alpha_4 = \frac{T}{T_0}$ , в циліндрі при  $\zeta = 0$   $r_1 = 1$  і різних значеннях параметра  $r_0$  (цифри біля кривих).

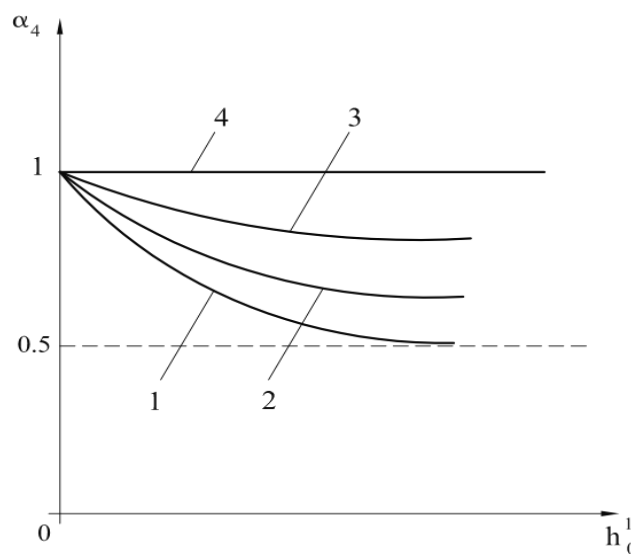


Рис. 4. Розподіл температури в циліндрі при  $\zeta = 0$ ,  $r_1 = 1$  і різних значеннях параметра  $r_0$ : крива 1 –  $r_0 = 0$ ; 2 –  $r_0 = 1$ ; 3 –  $r_0 = 10$ ; 4 –  $r_0 = \infty$

На рис. 5 показано розподіл безрозмірної температури  $\alpha_5 = \frac{T}{T_0}$ , в циліндрі при  $\zeta = 0$ ,  $h_0^1 = 1$  і різних значеннях параметра  $r_0$  (цифри біля кривих).

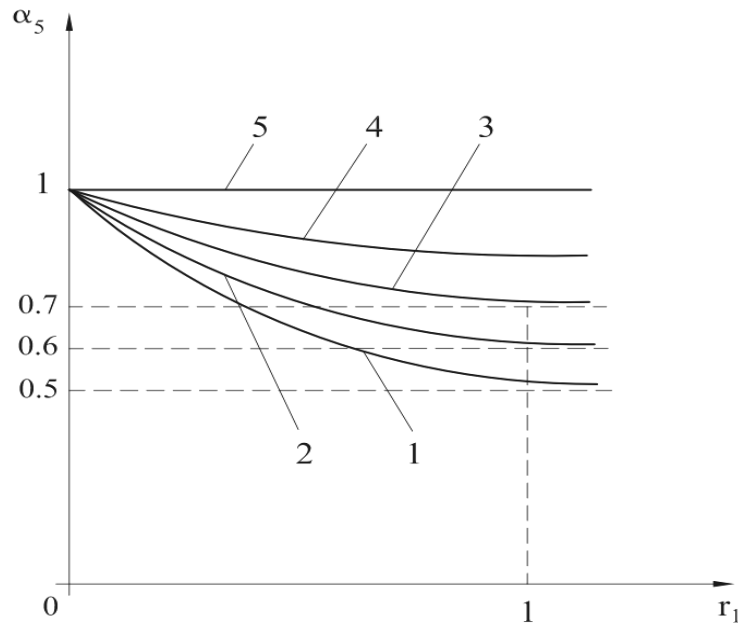


Рис. 5. Розподіл температури в циліндрі при  $\zeta = 0$ ,  $r_1 = 1$  і різних значеннях параметра  $r_0$ : крива 1 —  $r_0 = 0$ ; 2 —  $r_0 = 1$ ; 3 —  $r_0 = 5$ ; 4 —  $r_0 = 10$ ; 5 —  $r_0 = \infty$

**Висновок.** Застосовуючи метод Фур'є, розв'язок температурної задачі зведено до визначення деяких постійних із нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь, через які знаходимо температурні поля в будь-якій точці циліндра.

Числові підрахунки і аналіз розв'язку показують, що коефіцієнти теплообміну і теплопровідності, а також контактна провідність тонкого проміжкового шару значно впливають на розподіл температури в циліндрі.

1. Грилицкий Д.В. Осесимметричные контактные задачи теории упругости и термоупругости // Д.В. Грилицкий, Я.М. Кизыма. — Львов: Изд.-во при Львов. ун.те, 1981, — 135 с.
2. Окрепкий Б.С., Новосад І.Я. Осесимметрична температурна задача для системи двох контактуючих циліндрів. // Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». — ЛНТУ. — Вип. №28, — Луцьк. — 2010. — С. 367-379.
3. Окрепкий Б.С., Новосад І.Я. Задача теплопровідності для системи двох контактуючих трансверсально-ізотропних циліндричних тіл. // Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка» «Наукові нотатки», ЛНТУ, Вип. №30. Луцьк, 2011. — С. 131-140.
4. Окрепкий Б.С., Новосад І.Я. Осесимметрична температурна задача для системи двох циліндричних тіл при неідеальному тепловому контакті з урахуванням тонкого проміжкового шару. // Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка» «Наукові нотатки», ЛНТУ, Вип. №42. — Луцьк, 2013. — С. 202-207.
5. Подстригач Я.С. Температурное поле в системе твердых тел сопряженных с помощью тонкого промежуточного слоя. — ИФЖ, 1963, т.6, №16.
6. Подстригач Я.С., Шевчук П.Р. О влияниях поверхностных слоев на процесс диффузии и на обусловленное им напряженное состояние в твердых телах. — ФХММ. — 1967., т.3, №5.
7. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / — К.: Наук. думка, 1970, — 304 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

**М.І. Пилипець, М.Г. Левкович, І.М. Кучвара**  
 Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя  
**ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ФОРМУВАННЯ НАВИВНИХ ГВИНТОВИХ  
 ЗАГОТОВОК**

*Розроблено і виготовлено пристрій для навивання гвинтових заготовок на оправку. Розроблено спосіб профілювання гвинтових робочих органів по довжині шнека з розширеними технологічними можливостями і покращеною технологічністю конструкції гвинтових робочих органів. Виведені аналітичні залежності для визначення силових параметрів процесу профілювання гвинтових заготовок.*

*Ключові слова:* формування гвинтових навивних заготовок, профілювання, технологічний процес.

*Рис. 2. Літ. 4.*

**М.И. Пилипец, М.Г. Левкович, И.Н. Кучвара**  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ НАВИВНЫХ  
 ВИНТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

*Разработано и изготовлено устройство для навивки винтовых заготовок на оправку. Разработан способ профилирования винтовых рабочих органов по длине шнека с расширенными технологическими возможностями и улучшенной технологичностью конструкции винтовых рабочих органов. Выведены аналитические зависимости для определения силовых параметров процесса профилирования винтовых заготовок.*

*Ключевые слова:* формирование винтовых навивных заготовок, профилирование, технологический процесс.

**M.I. Pulupetc, M.G. Levkovich, I.M. Kuchvara**  
**TECHNOLOGICAL BACKGROUND OF SCREW BLANKS WINDING**

*The device for screw blanks winding on mandrel was designed and made. The method of screw operative members profiling along auger with advanced technological capabilities and improved technological design of screw operative members was designed. Analytical dependencies for determining power parameters profiling process of screw blanks were selected.*

*Keywords:* forming screw winding blanks, profiling, process.

**Постановка проблеми.** Одним із важливих питань сучасного транспортного машинобудування є підвищення надійності машин, довговічності їх гвинтових робочих органів, приводів, їх вузлів і окремих деталей. Одним із важливих моментів такого стану є гвинтові конвеєри і їх робочі органи, які знаходяться в середині нерухомого кожуха, при транспортуванні сипких матеріалів. Тому важливим питанням є створення конструктивних схем енергоощадних гвинтових конвеєрів і їх робочих органів, працездатний стан яких забезпечує зменшення зношення гвинтових елементів. До таких способів відноситься виготовлення гвинтових елементів робочих органів навиванням, експлуатаційна надійність яких є у 1,7...2,5 разів більша ніж прокатних.

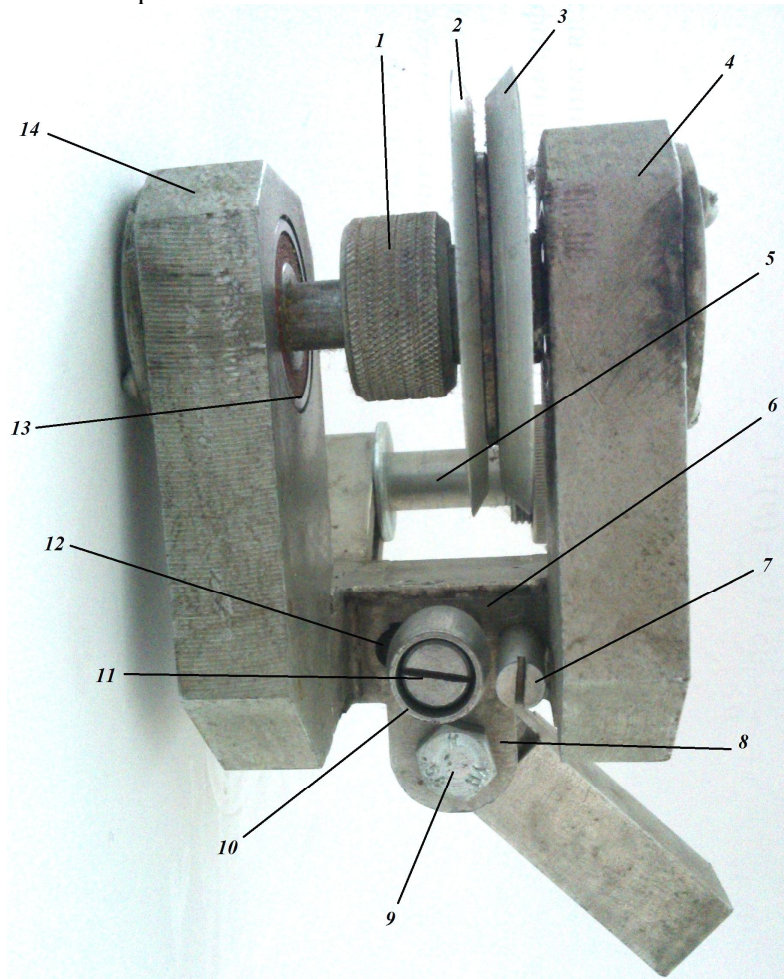
**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питаннями навивання гвинтових стрічок (ГС) гвинтових робочих органів (ГРО) присвячені праці Гевко Б.М. [1], Пилипця М.І. [2], Ляшук О.Л. [3] та багатьох інших. Однак особливості виготовлення ГРО є різноманітні і їх конструктивні елементи мають свою специфіку експлуатації з розширеними технологічними можливостями. Тому питання технології їх виготовлення і проектування прогресивних конструкцій технологічного оснащення для формування потребує подальших досліджень і удосконалень.

**Мета роботи** є розроблення удосконаленої конструкції технологічного оснащення для навивання гвинтових спіралей, як самих надійних і довговічних і дослідження технологічних процесів їх виготовлення.

Робота виконується згідно постанови Кабінету міністрів України «Про розвиток сільськогосподарського машинобудування і забезпечення агропромислового комплексу конкурентоздатною технікою» на 2010...2015 роки.

**Реалізація роботи.** Пристрій для навивання гвинтових заготовок на оправку (рис.1), який виконано у вигляді U-подібного кронштейна, низ якого жорстко з'єднано з різцетримачем токарного верстату, кронштейном і болтом та встановлений під кутом до осі циліндричної оправки рівним куту підйому гвинтової лінії з можливістю осьового переміщення. Крім цього права вітка U-подібного кронштейна в свою чергу виконана у вигляді двох вертикальних паралельних стійок лівої і правої в які знизу і зверху паралельно між собою встановлені вали відповідно верхній і нижній в підшипники з можливістю кругового провертання. На верхній вал жорстко встановлено направляючий шків з затискним диском, регулювання величини зазору між

їх торцевими поверхнями здійснюється за допомогою регулювальної гайки, яка нагвинчена на лівій ступені верхнього вала, і стискує направляючий шків і затискний диск пружиною. На нижньому валу U-подібного кронштейна з права знизу жорстко встановлено направляючий ролик, який встановлено на відстані одного кроку гвинтової заготовки від притискного диска з можливістю кругового провертання, а знизу U-подібного кронштейна на осі встановлено подаючий ролик з можливістю кругового провертання з кутом нахилу прямокутної трапеції поперечного перерізу навитого витка заготовки, який є у взаємодії з стрічковою заготовкою при її подачі в зону формоутворення і утворює аналогічний калібр з нерухомим циліндричним упором, який жорстко встановлений в нижній частині U-подібного кронштейна перпендикулярно до напрямку руху стрічкової заготовки, причому вісь подаючого ролика встановлена в осьовий паз з можливістю осьового переміщення і регулювання величини калібру, а зі сторони протилежної від осьового паза встановлено підтискну пружину, яка стискається болтом. Величина калібру регулюється гвинтом і стопориться гайкою.



**Рис. 1. Пристрій для навивання гвинтових заготовок: 1 – регулювальна гайка, 2 – направляючий шків, 3 – затискний диск, 4 – права вертикальна стійка, 5 – нижній вал, 6 – U-подібний кронштейн, 7 – нерухомий циліндричний упор, 8 – кронштейн, 9 – болт, 10 – подаючий ролик, 11 – вісь, 12 – осьовий паз, 13 – підшипник, 14 – ліва вертикальна стійка**

Для нагріву стрічкової заготовки використовується індуктор, який встановлений на різцетримачі токарного верстату і з'єднаний з відповідними відомими механізмами.

Оправка жорстко кріпиться в кулачках токарного патрону верстату, а на її зовнішній поверхні нарізана гвинтова канавка кроком, рівним кроку гвинтової заготовки і шириною, більшою товщини стрічкової заготовки з можливістю вільного її входження в неї. Для кріплення кінця стрічкової заготовки на оправці виконано осьовий паз, перпендикулярно до площини гвинтової канавки з можливістю вільного заходу. Пристрій жорстко кріпиться до різцетримача під кутом до оправки, рівним куту підйому гвинтової лінії  $15^\circ$ . Закріплення кінця заготовки здійснюється наступним чином. Кінець стрічкової заготовки згинається під кутом  $90^\circ$  і

встановлюється у гвинтову канавку і осьовий паз оправки і в зазор між шківом і затискним диском.

Крім цього з правого торця по центру верхнього вала встановлена маслянка, яка відомими каналами з'єднана з зоною контакту направляючого шківа і затискного диска через радіальні отвори верхнього вала.

Робота пристрою для навивання гвинтових заготовок на оправку здійснюється наступним чином. Після встановлення циліндричної оправки в зону формоутворення на пристрій, де кінець стрічкової заготовки згинають під кутом  $90^\circ$  і його вставляють у паз циліндричної оправки. Після проведення цих та інших підготовчих робіт вмикається верстат і стрічкова заготовка подається в зону формоутворення і здійснюється навивання  $0,5...0,75$  витка. Після чого здійснюється формоутворення кроку спіралі, яка встановлюється в направляючий ролик. Оправка повертається, і в її гвинтову канавку здійснюється навивання гвинтової заготовки. В разі потреби для підвищення пластичності стрічкової заготовки вмикають індуктор, який здійснює її нагрів, що сприяє покращенню формоутворення гвинтової спіралі і її встановлення у гвинтову канавку оправки. Після закінчення технологічного процесу пристрій для навивання різнопрофільних гвинтових заготовок на оправку відводиться у верхнє положення, а оправка з гвинтовою заготовкою знімається з верстату, а на її місце встановлюється нова.

Спосіб профілювання гвинтових робочих органів по довжині шнека (рис.2) включає в себе осьову подачу труби і раціональну подачу стрічкової заготовки в такій послідовності: перша операція – нарізання по зовнішньому діаметру труби паралельно двох гвинтових канавок прямокутного поперечного січення з перемичкою між ними, шириною  $2...4$  мм, з рівномірно збільшеним кроком по довжині труби заданого значення на токарному гвинторізному верстаті з числовим програмним керуванням відомим способом. Причому ширина гвинтової канавки є більшим товщини спіралі, а друга канавка шириною  $2...4$  мм і глибиною  $2...4$  мм.

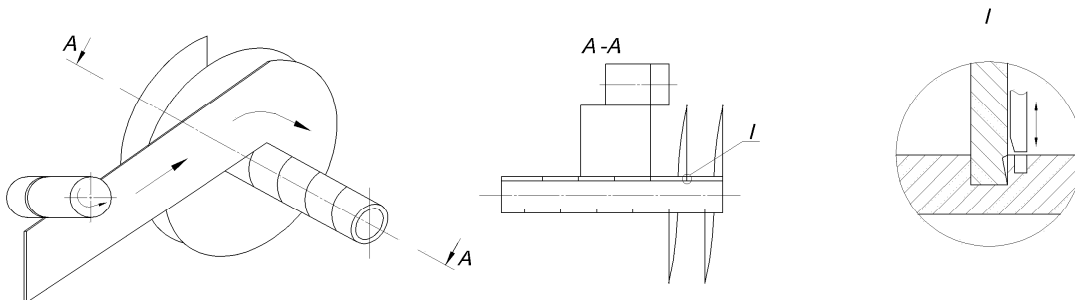


Рис. 2. Спосіб профілювання гвинтових робочих органів по довжині шнека

Друга операція – оброблення труби з виготовленням стрічкової заготовки, де на стрічковій заготовці знизу на відстані  $3...7$  мм виконують прямокутну фаску глибиною  $1...1,5$  мм. Причому стрічкову заготовку встановлюють на трубу тангенціальною подачею з попереднім її натягом в канавку і деформують перемичку до її взаємодії з прямокутною фаскою стрічкової заготовки відомим способом за допомогою формувального ролика, який притупляє гострі кромки на спіралі. В разі необхідності для забезпечення надійного контакту між двома з'єднувальними елементами в зону їх спряження подають олов'яно-свинцевий припій. Проводять зварювання контактним способом з прикладанням зварювального зусилля до стрічкової заготовки перпендикулярно до напрямку її переміщення і нагріву струмами високої частоти спеціальною відомою установкою, яка на кресленні не показана. Ця операція виконується на токарному або іншому верстаті з підігрівом прямокутної гвинтової канавки і стрічкової заготовки на трубі струмами високої частоти відповідної установки і індуктора.

Основні операції способу профілювання гвинтових робочих органів зі збільшеним кроком здійснюється на наступному обладнанні: нарізання різи на токарному верстаті з числовим програмним керуванням 16K20Ф3, нагрів заготовки здійснюється установкою струмів високої частоти. Рівномірне збільшення кроку спіралі на довжині труби залежить від її розміру і середніх значень шнеків знаходиться в межах  $0,5...1$  мм на один крок.

Запропонований спосіб профілювання гвинтових робочих органів може мати широке використання при транспортуванні насінневих і сипких матеріалів, виготовлення нафтових скважин та інше.

До переваг способу профілювання гвинтових заготовок відноситься розширення технологічних можливостей, зменшення зусилля транспортування і травмування насіння і покращення технологічності конструкції гвинтових робочих органів.

Закон зміни ширини поперечного перерізу смуги, виходячи з того, що максимальне радіальне напруження  $\sigma_\rho$  мале порівняно з напруженням течії  $\sigma_s$ , при використанні умови постійності деформованого об'єму можна виразити залежністю:

$$h_\rho = H_0 \sqrt{\rho_0 / \rho}$$

де  $h_\rho$  – товщина поперечного перерізу на відстані  $\rho$  від центра кривизни;

$\rho$  – поточний радіус кривизни;

Радіус нейтрального шару деформації  $\rho_0$  при відомому відношенні ширини спіралі до початкової ширини заготовки  $\beta = B_1 / B$  можна виразити з умови постійності елементарної ділянки до і після згину:

$$\rho_0 = \beta^2 \left[ \frac{2\rho_c}{(\sqrt{R} + \sqrt{r})} \right]^2$$

де  $\rho_c$  – радіус центру тяжіння перерізу товщини спіралі;

$R$  і  $r$  – відповідно зовнішній і внутрішній радіуси витка;

Залежності, які зв'язують момент згину  $M_{z2}$  і поздовжню силу  $N$ , що діють у граничному перерізі:

$$N = (\mu_\rho + \mu_0 + tg\gamma_p) P;$$

$$M_\sigma = \left[ l + (\mu_\rho + tg\gamma_p) R + \mu_0 r \right] P,$$

де  $l$  – плече прикладання поперечної сили згину  $P$ ;

$\gamma_p$  – кут відхилення рівнодійної сили від нормалі до стрічки внаслідок її пластичної деформації;

$\mu_0, \mu_\rho$  – коефіцієнт тертя стрічки відповідно до оправки і ролика;

$M_\sigma = M_{z2} + N_{\rho c}$  – момент від тангенціальних напружень по висоті заготовки.

Із цих залежностей записуємо рівняння, які зв'язують момент від тангенціальних напружень з поздовжньою розтягуючою силою.

$$M_\rho = \rho_{np} N$$

де  $\rho_{np}$  – приведений радіус прикладання поздовжньої сили, що визначається умовами навівання;

Розв'язок рівняння рівноваги і пластичності для згину моментом і повздовжніми силами відрізняється від рішення для чистого згину граничними значеннями радіальних стискуючих напружень на оправці, де вони

$$\sigma_r = \frac{N}{H_0 \sqrt{r\rho_0}}.$$

Момент, необхідний для навівання спіралі на оправку, залежить від конструктивних особливостей оправок і в загальному випадку визначається залежністю:

$$M_H = k_M P \left[ l + (\mu_\rho + tg\gamma_p) R \right],$$



де  $k_M$  – коефіцієнт, який враховує конструктивне виконання оправки.

Як показали дослідження, значення радіусів нейтральної поверхні напружень, розраховані без і з урахуванням зміцнення, відрізняються незначно. Тому при розрахунку згину заготовки на ребро із зміцнюючи матеріалів у першому наближенні радіус нейтральної поверхні напружень знаходять без урахування зміцнення.

**Висновки:**

1. Розроблено і виготовлено пристрій для навивання гвинтових заготовок на оправку.
2. Розроблено спосіб профілювання гвинтових робочих органів по довжині шнека з розширеними технологічними можливостями і покращеною технологічністю конструкції гвинтових робочих органів.
3. Виведені аналітичні залежності для визначення силових параметрів процесу профілювання гвинтових заготовок.

1. Патент № 87037, Україна, МПК В21D 11/06. Пристрій для навивання гвинтових заготовок. Заявники і власники патенту: Ляшук О.Л., Гурик О.Я., Кучвара І.М., Гевко І.Б., Саранчук Л.І. Заявл: 29.04.2013; опубл: 27.01.2014, Бюл.№ 2.
2. Пилипець М.І. Проектування секційних гвинтових заготовок / М.І. Пилипець, В.В. Васильків. – Тернопіль: видавництво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2013. – 180 с.
3. Гевко І. Аналіз конструкцій і розрахунок завантажувальної здатності насадок гвинтових конвеєрів / І. Гевко // Збірник наукових праць НАУ. – 2000. – Т. 7, – С. 160–163.
4. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання / І. Б. Гевко. – Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 307 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014.

УДК 622.4.076 : 620.197.6

**М.С. Полутренко**  
**ЕКОЛОГІЧНИЙ АУДИТ КОРОЗІЙНОЇ АКТИВНОСТІ ҐРУНТІВ ПРОКЛАДАННЯ**  
**МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ**

*Проведено екологічний аудит корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів (МГ) Західного та Південного регіонів. В результаті комплексного обстеження ґрунтів на досліджуваних ділянках газопроводів встановлено середній та високий ступінь корозійної активності, що призводить до інтенсифікації корозійних процесів підземних трубопроводів. Для підвищення ефективності протикорозійного захисту МГ на досліджуваних ділянках, із врахуванням корозійної активності ґрунтів, рекомендовано використання інноваційного біостійкого протикорозійного покриття на основі бітумно-полімерної мастики МБПІ-Д-1 (А), модифікованої інгібітором з класу четвертинних амонійних солей.*

*Ключові слова:* екологічний аудит, корозія, газопроводи, ґрунти.

*Рис. 5. Табл. 6. Літ. 10.*

**М.С. Полутренко**  
**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ КОРРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ ПРОКЛАДКИ**  
**МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

*Проведен экологический аудит коррозионной активности почв прокладки магистральных газопроводов (МГ) Западного и Южного регионов. В результате комплексного обследования почв на исследуемых участках газопроводов установлено средний и высокий степень коррозионной активности, что приводит к интенсификации коррозионных процессов подземных трубопроводов. Для повышения эффективности противокоррозионной защиты МГ на исследуемых участках, с учетом коррозионной активности ґрунтов, рекомендуется использование инновационного биостойкого антикоррозийного покрытия на основе битумно -полимерной мастики МБПІ-Д -1 (А), модифицированной ингибитором из класса четвертичных аммонийных солей.*

*Ключевые слова :* экологический аудит , коррозия , газопроводы, почвы,

**M.S. Polutrenko**  
**ENVIRONMENTAL AUDIT CORROSIVITY SOIL GAS PIPELINES LAYING**

*Conducted an environmental audit of soil corrosivity laying trunk pipelines (MG) Western and Southern regions. As a result, a comprehensive survey on the soil study sites established pipelines medium and high degree of corrosion activity that leads to an intensification of corrosion processes of underground pipelines . To increase the effectiveness of corrosion protection on trunk pipelines study sites , taking into account the soil corrosivity , the use of innovative biological stability of anti-corrosion coating based on bitumen- polymer mastic MBPI - D-1 (A) , modified inhibitor class of quaternary ammonium salts.*

*Keywords:* environmental audits , corrosion, gas pipelines, soil

**Аналіз стану досліджень та публікацій.** Мережа газопроводів є важливим елементом транспортування газу і відіграє значну роль у забезпеченні енергетичної безпеки країни. У процесі проектування та експлуатації газопроводів недостатньо враховується їх вплив на довкілля й оцінюється екологічна безпека експлуатації газопроводів. Забезпечення екобезпеки, в основному, зводиться до дотримання певних відстаней між трасою магістрального трубопроводу та об'єктами інфраструктури. Основною формою впливу магістральних газопроводів на довкілля при їх експлуатації є можливість забруднення ґрунтового масиву, повітряного басейну, води продуктами транспортування у разі виникнення аварійних ситуацій. Причини відмов трубопроводів, що створюють екологічний ризик, висвітлено в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених [1,4, 6, 9]. Аналіз причин відмов трубопроводів показав [8], що більше 80% всіх відмов відбулися з причин корозії металу труб. Внаслідок корозії відбувається значне зменшення перерізу трубопроводу. Це різко підвищує екологічний ризик подальшої експлуатації таких металоконструкцій і актуалізує проблему оцінки їхнього залишкового ресурсу. У процесі тривалої експлуатації підземних газопроводів, прокладених в ґрунтах різної корозійної активності, в окремих регіонах України формується екологічна небезпека, зумовлена руйнуванням трубопроводів через перевищення нормативного ресурсу їх експлуатації, деградації ізоляційного покриття, з причин ґрунтової корозії та з причин мікробної корозії.

Важливим чинником забезпечення безаварійної роботи підземних газопроводів є захист їх поверхні від ґрунтової корозії якісними ізоляційними покриттями. Серед широкої номенклатури ізоляційних матеріалів, яка постійно оновлюється, попри сучасні види ізоляції (поліуретанової, поліепоксидної, тришарової поліетиленової) домінуючі позиції в нафтогазовому комплексі України зберегли менш ефективні з точки зору протикорозійних і техніко-експлуатаційних параметрів, але

значно дешевші «традиційні» мастикові та мастиково-стрічкові покриття на нафтобітумній основі, частка яких в структурі ізоляційних покриттів в газовому секторі економіки перевищує 94% (94,6).

**Виділення не вирішених частин проблеми.** На сьогодні більшість дослідників-корозіоністів усвідомили необхідність врахування біологічного чинника, який значною мірою визначає інтенсивність корозійних процесів, що відбуваються на поверхні металевих конструкцій в підземному середовищі. Недивлячись на те, що такими видатними українськими та зарубіжними вченими, як Андреюк К.І., Піляшенко-Новохатний А.І., Козлова І.П., Коптева Ж.П., Антоновська Н.С., Пуриш Л.М., Середницький Я.А., Стрижевський І.В., Соколова Г.А., Заварзин Г.А., Белоглазов С.М, Hamilton W.A., Iverson W.P. та ін. визнано провідну роль мікробіологічної корозії в процесах підземного руйнування металів, аналіз попередніх досліджень дозволив констатувати недостатню вивченість модифікації мастикових покриттів на бітумно-полімерній основі з метою надання їм якісно нових властивостей, зокрема біостійкості. Крім якісного захисного ізоляційного покриття, необхідно враховувати корозійну активність ґрунтів, в яких прокладені підземні трубопроводи для забезпечення їх надійної експлуатації. На процеси корозії металоконструкцій в підземному середовищі впливає ряд екологічних факторів, а саме: хімічна природа ґрунтів, їх вологість, питомий опір, окисно-відновний потенціал, наявність сульфатвідновлювальних бактерій (СВБ), які відіграють домінуючу роль серед мікробної асоціації ґрунтових мікроорганізмів.

У зв'язку з викладеним вище, метою даного дослідження було проведення екологічного аудиту визначення корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів Західного та Південного регіонів.

**Виклад результатів проведених досліджень.** Екологічний аудит корозійної активності ґрунтів охоплював комплекс досліджень по визначенню кислотності ґрунтів, окисно-відновного потенціалу (ОВП) ґрунту, питомого опору ґрунту, а також втрату маси металу, визначену гравіметричним методом, що характеризувало корозійне руйнування металу. Відбір проб ґрунту проводили згідно методики діючого ДСТУ 3291-95 [2].

Для оцінки корозійної активності ґрунтів по відношенню до прокладання в нього трубопроводу характерним є утворення в ньому перших ознак наскрізної корозії. Безперечно, що така оцінка є наближеною, оскільки процес корозії сталевих трубопроводів залежить не тільки від ґрунтових умов, але й від сорту сталі, якості і матеріалу зварних з'єднань, товщини стінки трубопроводів, якості захисного покриття, а також від умов експлуатації трубопровода.

На сьогодні існує більше двадцяти польових та лабораторних методів визначення корозійної активності ґрунтів [3, 10]. Враховуючи широке розмаїття причин корозії металу в ґрунті жоден з цих методів окремо не може дати точну картину визначення корозійної активності ґрунтів. Правильну оцінку корозійної активності ґрунтів можна зробити тільки після дослідження ґрунтів різними методами і співставлення результатів цих досліджень з врахуванням місцевих географічних і кліматичних умов.

В Західному регіоні були відібрані проби ґрунтів на глибині залягання трубопроводу в зоні прокладання магістральних трубопроводів «Пасічна-Долина» (5 проб) та «Пасічна-Тисмениця» (3 проби) (масою не менше 2 кг кожна проба). В зоні «Пасічна-Долина» проби були відібрані по ходу газу в наступній послідовності: 1-й шурф – 70 м; 2-й – через 20 метрів від шурфу № 1; 3-й – через 50 метрів від шурфу № 2; 4-й – через 100 метрів від шурфу № 3; 5-й – через 10 метрів від шурфу № 4. На трасі прокладання магістрального трубопроводу (МГ) діаметром 529 мм «Пасічна-Тисмениця» досліджувана ділянка охоплювала 275 м, проба 1- в місці розташування КВК, вправо від неї через 125 м – проба 2 і вліво від КВК через 150 м – проба 3. Візуальний аналіз відібраних проб ґрунтів на трасі «Пасічна-Долина» показав наступне:

*Шурф №1* - піщаний ґрунт з гравієм. Колір жовто-коричневий;

*Шурф №2* - глинистий ґрунт різних кольорів (від червоно-бурого до сірого) з рештками коренів рослин;

*Шурф №3* - піщаний ґрунт середньозернистої структури світло-коричневого і жовтого кольорів;

*Шурф №4* - глинистий ґрунт різних відтінків (жовтого, коричневого, світло-сірого);

*Шурф №5* - глинистий ґрунт сірого кольору з вкрапленнями коричневого, червоного та чорного кольорів.

Проби ґрунту на трасі прокладання трубопроводу «Пасічна-Тисмениця» теж відрізнялися за своїм кольором:

*Проба №1* - глинистий ґрунт жовто-коричневого кольору;

*Проба №2* – глинистий ґрунт чорно-сірого кольору;

*Проба №3* – глинистий ґрунт темно-коричневого кольору.

Оскільки одним з екологічних показників, який характеризує корозійну активність ґрунту є кислотність, тому важливо було простежити як змінюється кислотність ґрунту, відібраного зверху і знизу масиву трубопроводу, зліва та справа по ходу газу. Кислотність ґрунтів зумовлена наявністю йонів Гідрогену, концентрація яких виражається величиною рН. Величина рН в ґрунті змінюється в залежності від загальної мінералізації ґрунтових вод і наявності в них карбонатної і мінеральних кислот, кислих і основних солей. За величиною рН розрізняють ґрунти: сильнокислі (3 - 4,5), кислі (4,5 - 5,5), слабкокислі (5,5 - 6,5), нейтральні (6,5 - 7,0), слабколужні (7,0 - 7,5), лужні (7,5 - 8,5), сильнолужні (більше 8,5) [11].

В залежності від того, в якому стані знаходяться в ґрунті йони Гідрогену, розрізняють наступні види кислотності: актуальну (активну) і потенційну (приховану), яка поділяється на обмінну і гідролітичну. Актуальна кислотність зумовлена йонами Гідрогену, що знаходяться в ґрунтовому розчині. Про її величину судять за результатами аналізу водної витяжки з ґрунту. Актуальна кислотність характеризує кислотність ґрунту на момент її визначення.

Була визначена актуальна кислотність відібраних проб ґрунту за методикою [5] з допомогою універсального індикатора та рН-метра марки рН-150МИ (табл. 1).

Таблиця 1. Визначення рН водних витяжок відібраних проб ґрунту

№ проби ґрунту	Пасічна-Тисмениця			Пасічна-Долина				
	1	2	3	шурф №1	шурф №2	шурф №3	шурф №4	шурф №5
рН (лакмус)	6-7	~7	~7	6-7	6-7	6-7	6-7	6-7
ручний рН-метр	6,78-6,80	6,83-6,84	6,68-6,69	6,59-6,60	6,36-6,37	5,62-5,63	6,27-6,28	6,66-6,67

Одержані результати показали, що трубопровід на трасі «Пасічна-Долина» прокладений в неоднорідному за кислотністю ґрунті. Так, траса трубопроводу, відмічена шурфами № 2,3,4 довжиною 170 метрів проходить через ґрунти, які за величиною рН відносяться до слабкокислих, що вказує на корозійну активність ґрунту по відношенню до сталі, а ґрунти відмічені шурфами № 1 і 5 до нейтральних. До нейтральних ґрунтів відносяться також ґрунти, через які прокладений трубопровід в зоні «Пасічна-Тисмениця», де на вибраній ділянці траси, рН-ґрунту знаходиться в межах 6,7 - 6,8. Для характеристики корозійної активності ґрунтів недостатньо оперувати тільки значенням рН, оскільки рН вказує лише на активність йонів Гідрогену в ґрунтовому розчині, але не вказує на кількісний вміст кислот в ґрунті, оскільки рН відноситься тільки до дисоційованої частини кислот. Також необхідно було виключити можливість посилення корозійних процесів впливом сульфат-йонів ( $SO_4^{2-}$ ). Саме з цієї метою були проаналізовані водні витяжки ґрунтів на предмет  $SO_4^{2-}$  якісною реакцією з водним розчином барій хлориду. Випадання білого осаду (поява муті) свідчило про наявність йонів  $SO_4^{2-}$  в ґрунтових водах (табл.2).

Таблиця 2. Якісний вміст йонів  $SO_4^{2-}$  в ґрунтових водах

№ проби	Пасічна-Долина					Пасічна-Тисмениця		
	Шурфи					Проби		
	1	2	3	4	5	1	2	3
Наявність $SO_4^{2-}$ (якісна проба)	-	+	+	±	-	-	-	-

"+" – спостерігалось утворення муті; "±" – слабка муть; "-" – муть відсутня.

З одержаних даних видно, що сульфат-йони присутні в ґрунтових водах відібраних проб від шурфу № 2 до шурфу № 4, що свідчить про наявність в ґрунтах на цій ділянці траси сульфатів (можливо  $Na_2SO_4$ ,  $FeSO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $Al_2(SO_4)_3$ ). У водних витяжках решти проаналізованих проб  $SO_4^{2-}$  не виявлено.

Таким чином, співставляючи дані, одержані по визначенню рН-проб з даними якісного аналізу  $\text{SO}_4^{2-}$  можна допустити, що корозійно-активним ґрунтом є ґрунт на трасі «Пасічна-Долина» довжиною 170 м по ходу газу від шурфа № 2 до шурфа № 4 включно.

Оскільки, в ґрунтових водах на трасі магістрального трубопроводу «Пасічна-Долина», за допомогою якісного аналізу виявлено наявність сульфат-йонів, то не виключена можливість розвитку корозії сталевих труб в результаті мікробіологічної корозії або біокорозії. Для повноти заключення про корозійну активність ґрунтів, було проаналізовано також значення питомого опору ґрунтів (табл. 3.).

Таблиця 3. Питомий опір відібраних проб ґрунту

№ проби	Пасічна-Долина					Пасічна-Тисмениця		
	Шурфи					Проби		
	1	2	3	4	5	1	2	3
Питомий опір ґрунту, $\rho$ , Ом·м	73	72	72	65	64	44	90	44

Аналіз одержаних результатів показав, що на трасі «Пасічна-Долина», на досліджуваній ділянці трубопроводу спостерігається зниження питомого опору ґрунту, в той час, як на трасі «Пасічна-Тисмениця» питомий опір ґрунту проби № 2 більше ніж в 2 рази перевищує питомий опір ґрунту для проб №№ 1 і 3, що вказує на неоднорідність корозійної активності ґрунту.

Для більш точної оцінки корозійної активності ґрунтів, було проведено серію дослідів з відібраними зразками ґрунтів по визначенню маси втрат металу гравіметричним методом, який є досить простим в технічному плані та поширеним [3].

На рис. 1 приведена залежність втрати маси металу трубок в пробах ґрунту від досліджуваної довжини траси МГ «Пасічна – Долина».

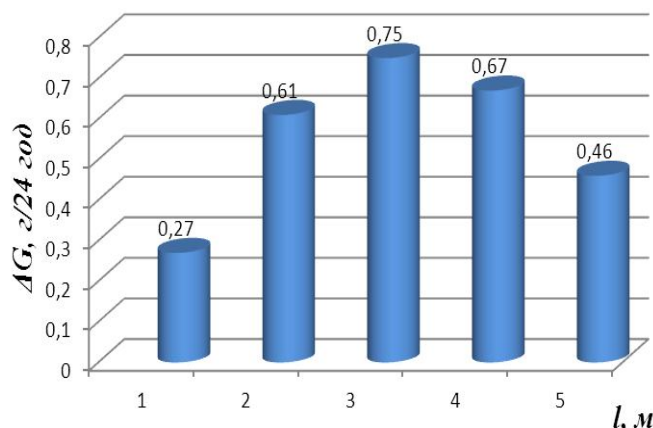


Рис. 1. Залежність втрати маси металу ( $\Delta G$ , г/24год) від довжини траси МГ «Пасічна-Долина»

Оскільки інтегрованим показником біохімічної активності мікробних угруповань є нативне дихання ґрунту, яке визначається за кількістю виділеного вуглекислого газу, то було проведено визначення інтенсивності дихання ґрунту для проб шурфа № 2 і шурфа № 4, де виявлено наявність  $\text{SO}_4^{2-}$  в ґрунтових водах. Результати визначень показали наявність  $\text{CO}_2$  у відібраних пробах на рівні 2,0 - 3,0 мг/л, що характеризувало підвищений ступінь корозійної активності середовища.

На трасі МГ «Пасічна-Тисмениця» спостерігається дещо інша, ніж на рис. 2, залежність втрати маси металу трубок під дією постійного електричного струму протягом 24 годин.

Аналіз одержаної залежності  $\Delta G = f(l)$ , приведеної на рис. 3.15 показав, що на вибраній нами ділянці траси, найінтенсивніше корозія відбувається в ґрунті проби № 3. В напрямку руху газу корозійні процеси "затухають", про що свідчать нижчі значення  $\Delta G$  для проб № 1 і № 2, (що, можливо, пов'язано з перенасиченням ґрунту вологою, яка в свою чергу заблокувала доступ кисню до металу, що й призвело до зниження швидкості корозії, прокладеного в ґрунті з нормальним ступенем корозійності.

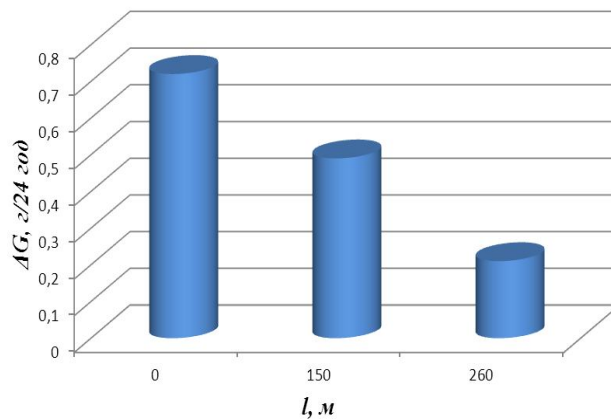


Рис. 2. Залежність втрати маси металу ( $\Delta G$ , г/24 год) від довжини траси МГ «Пасічна –Тисмениця»

В зоні прокладання магістрального газопроводу Південного регіону діаметром 529 мм з товщиною стінки 8,0 мм було проведено три шурфування: на відмітці ПК 163+32 (шурф 1), ПК 576+00 (шурф 2), ПК 646+00 (шурф 3). За механічним складом досліджені ґрунти представлені супісками та суглинками (табл.4). Визначено такі фізико-хімічні показники: питомий електроопір, кислотність, окисно-відновний потенціал (ОВП) ґрунту до шурфування і після, а також зміну втрати маси металу гравіметричним методом, яка характеризувала інтенсивність корозійних процесів.

Таблиця 4. Характеристика обстежених ґрунтів

№ шурфа	pH	Питомий електроопір $\rho$ , Ом·м	ОВП до шурфування, В	ОВП після шурфування, В	Гранулометричний склад
1	8,04	63	- 0,99	- 0,97	Супісок з рештками коренів рослин
2	8,00	10	- 1,05	- 1,02	Суглинок коричневий з рештками коренів рослин
3	7,88	14	- 1,20	- 1,17	Суглинок коричневий з рештками коренів рослин

Основою для визначення ступеня корозійної активності ґрунту був вибраний питомий електроопір ґрунту. Низькі значення питомого електроопору для шурфів 2 і 3 вказують на високу корозійну активність ґрунтів. Одержані результати по визначенню pH водних витяжок проб ґрунту (табл.5) показали, що досліджений газопровід прокладений в однорідних за кислотністю ґрунтах. За величиною pH ґрунти є лужними.

Таблиця 5. Визначення pH водних витяжок проб ґрунту

Місце відбору проби ґрунту	Шурф №1				Шурф №2			Шурф №3		
	верх	зліва	справа	низ	верх	зліва	справа	верх	зліва	справа
ручний pH-метр	8,05	8,02	8,00	8,03	8,02	7,95	7,85	7,88	8,0	7,76

Результати якісного аналізу на йони  $SO_4^{2-}$  в ґрунтових водах показали, що  $SO_4^{2-}$  присутні в ґрунтових водах відібраних проб тільки на двох відмітках шурфування ґрунту: ПК 576+00 і ПК 646+00. Таким чином, співставляючи дані, одержані по визначенню кислотності ґрунту з даними якісного аналізу  $SO_4^{2-}$  можна допустити, що ґрунти з шурфів на відмітках ПК 576+00 і ПК 646+00 є корозійно-активними. Оскільки, в ґрунтових водах на трасі магістрального трубопроводу, за допомогою якісного аналізу виявлено наявність сульфат-йонів, то не виключена можливість розвитку корозії сталевих труб в результаті мікробіологічної корозії або біокорозії. Для повноти заключення про корозійну активність ґрунтів, було проаналізовано також значення питомого електроопору

грунтів (табл. 4). З одержаних даних видно, що на трасі магістрального газопроводу, спостерігається суттєве зниження питомого електроопору ґрунту на досліджуваній ділянці трубопроводу від відмітки ПК 163+32 до ПК 576+00 і ПК 646+00, що вказує на високу корозійну активність ґрунтів. Порівнюючи одержані значення питомого електроопору зразків ґрунту з даними літературних джерел, можна допустити, що найбільш ймовірна швидкість розвитку пітінгів складатиме 0,18 мм/рік. Для повноти заключення про корозійну активність ґрунтів, було проведено серію дослідів з відібраними зразками ґрунтів по визначенню маси втрат металу гравіметричним методом.

На рис. 3, 4 і 5 приведені залежності втрати маси металу в ґрунтах на різних ділянках траси.

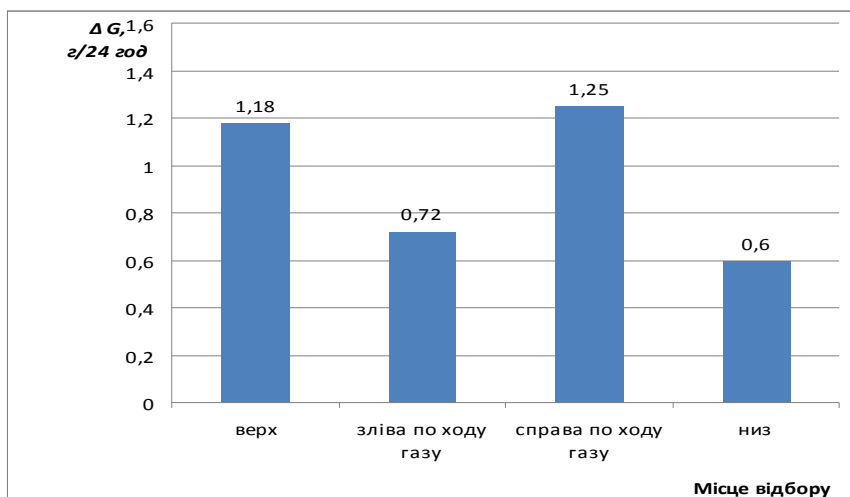


Рис. 3. Залежність втрати маси металу ( $\Delta G$ , г/24год) на ділянках траси МГ (ПК163(+32) шурф1)

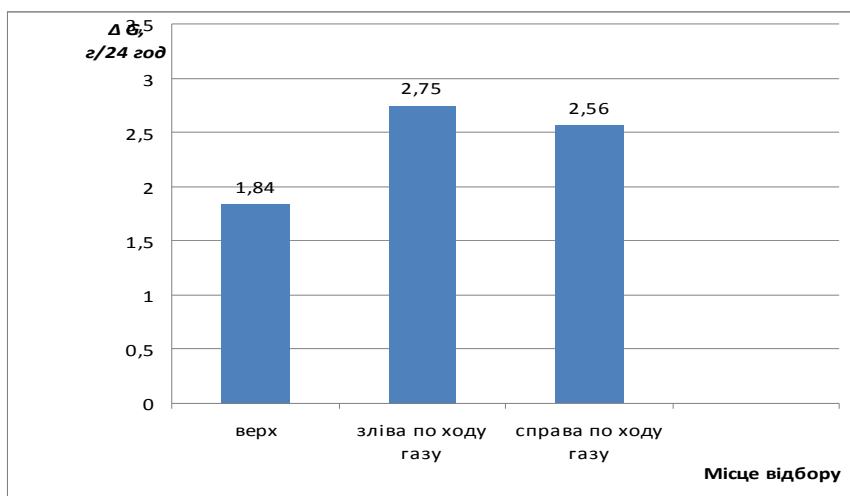


Рис. 4. Залежність втрати маси металу ( $\Delta G$ , г/24год) на ділянках траси МГ (ПК576(+00), шурф 2)

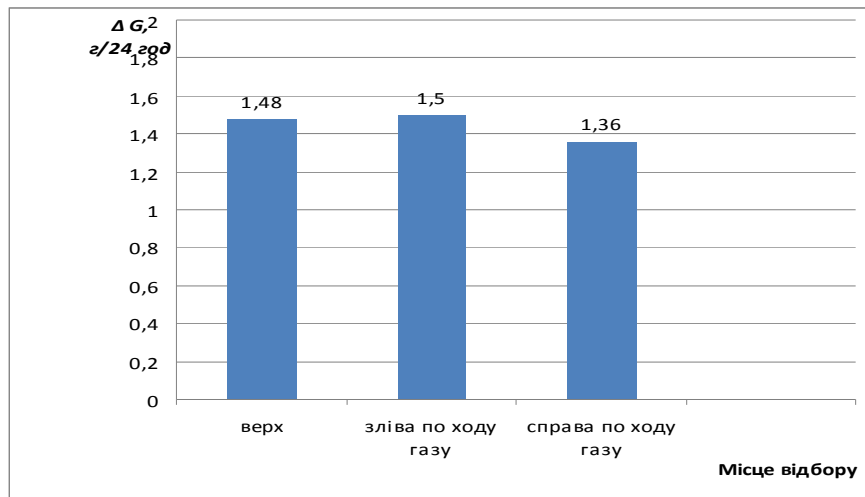


Рис. 5. Залежність втрати маси металу ( $\Delta G$ , г/24 год) на ділянках траси МГ (ПК646(+00), шурф 3)

Співставляючи результати екологічного аудиту по визначенню корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів Західного та Південного регіонів можна стверджувати, що ґрунти на досліджуваних ділянках траси відносяться до ґрунтів з середнім та високим ступенем корозійної активності. Тому, для запобігання корозії металу трубопроводу внаслідок ґрунтової корозії запропоновано ізоляційне покриття на основі бітумно-полімерної мастики МБП-Д-1 [7], яке володіє підвищеними протикорозійними характеристиками (в т.ч. є водостійким), а також проявляє бактерицидні властивості за рахунок введення до складу покриття інгібітора з класу четвертинних амонійних солей, які використовуються для пригнічення росту сульфатвідновлювальних бактерій (СВБ). В табл. 6 приведено характеристику інноваційного біостійкого бітумно-ізоляційного покриття.

Таблиця 6. Характеристика модифікованого бітумно-ізоляційного покриття

Праймер	Мастика	Адгезія стрічки до мастики, Н/мм	Адгезія мастики до заґрунтованого металу, Н/мм <sup>2</sup>	Загальна товщина захисного покриття, мм	Міцність при ударі при 20°C, Дж
А	А	1,5	0,55	4,3	15
А+ 0,1 мас.% Інґ.	А+ 0,1 мас.% Інґ.	1,7	0,62	4,3	15

Успішно проведені випробування інноваційного покриття на базі модифікованої мастики в умовах УМГ «Прикарпаттрансгаз» показали повну відповідність регламентованих фізико-механічних характеристик покриттів вимогам ДСТУ 4219-2003, що вказує на практичну цінність проведених досліджень.

Використання інноваційних біостійких протикорозійних покриттів на вітчизняному ринку в теперішній практиці ізолювання трубопроводів дозволить підвищити надійність та скоротити фінансові й трудові затрати при їх експлуатації, а також забезпечити екологічну безпеку трубопровідних систем України.

#### Висновки.

1. Проведено екологічний аудит корозійної активності ґрунтів прокладання магістральних газопроводів Західного та Південного регіонів.

2. Встановлено в результаті комплексного обстеження ґрунтів на досліджуваних ділянках траси магістральних газопроводів, що ґрунти відносяться до ґрунтів з середнім та високим ступенем корозійної активності, що призводить до інтенсифікації корозійних процесів підземних трубопроводів.

3. Наявність сульфат-йонів у водних витяжках ґрунту на досліджуваних ділянках траси МГ спричиняє розвиток мікробіологічної корозії з участю сульфатвідновлювальних бактерій.

4. З метою підвищення протикорозійного захисту магістральних газопроводів на досліджуваних ділянках із врахуванням корозійної активності ґрунтів рекомендовано



використовувати розроблене інноваційне біостійке протикорозійне покриття на основі бітумно-полімерної мастики МБПІ-Д-1 (А), модифікованої інгібітором з класу четвертинних амонійних солей.

1. Говдяк Р.М. Підвищення ефективності магістральних газопроводів на пізній стадії експлуатації: автореф. на здобуття наук. ступ. док. техн. наук /Р.М. Говдяк. – Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2008. – 32 с.
2. ДСТУ 3291-95 Методи оцінки біокорозійної активності ґрунтів і виявлення наявності мікробної корозії на поверхні підземних металевих споруд. // Київ.: Держстандарт України, 1996. – 28 с.
3. Жуков В.И. Битумная изоляция подземных трубопроводов /В.И. Жуков, Ф.Г. Храмухин. – М.: Госстройиздат, 1964. – 120 с.
4. Кривенко Г.М. Прогнозування екологічного та технічного ризиків при експлуатації магістральних нафтопроводів з пересіченим профілем траси: автореф. на здобуття наук. ступ. канд. техн. наук /Г.М. Кривенко. – Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2005. – 23 с.
5. Крикунов В.Г. Лабораторний практикум по ґрунтознавству /В.Г. Крикунов, Ю.С. Кравченко, В.В. Криворучко та ін. // Біла Церква, 2003. – 83 с.
6. Кутуков С.Е. Технологический и экологический мониторинг систем магистрального транспорта и промышленного сбора нефти. Практика и перспективы совершенствования / С.Е. Кутуков // Безопасность жизнедеятельности. Приложение. – 2004. - №8. – 16с.
7. Пат. 89709 Україна, МПК (2009) C23F 11/00, F 16L 58/02 Спосіб протикорозійного захисту підземних нафтогазопроводів, прокладених в болотних, замулених ґрунтах, які містять сульфатредуючі бактерії. / Крижанівський Є.І., Федорович Я.Т., Полутренко М.С. [та ін.]; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № а200807330; опубл. 25.025.2010, Бюл. № 4, 2010 р.
8. Миронюк С.Г., Пронина И.А. Анализ аварийности промышленных нефтепроводов в регионе и оценка риска их эксплуатации/ С.Г. Миронюк, И.А. Пронина // Новые технологии для очистки нефтезагрязненных вод, почв, переработки и утилизации нефтешламов. Тезисы докладов Международной конференции. – М.: Ноосфера, 2001. – С. 290-292.
9. Середницький Я. Сучасна протикорозійна ізоляція в трубопровідному транспорті (2-а частина) / Я. Середницький, Ю. Банахевич, А. Драгілев. – Львів: ТзОв «Сплайн», 2004. – 276 с.
10. Стрижевский И.В. Подземная коррозия и методы защиты /И.В. Стрижевский. - М.: Металлургия, 1986. – 112 с.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2014.

УДК 621.91.01

С.О. Приступа<sup>1</sup>, А.А. Ткачук<sup>1</sup>, О.П. Дахнюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Луцький національний технічний університет<sup>2</sup>ДП Луцький ремонтний завод «МОТОР»**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ**

*У статті наведено дослідження енергоємності процесу різання на токарних операціях. Запропоновано оцінку технологічного процесу різання за енергетичними критеріями. На основі даних критеріїв проведено моделювання технологічної операції різання з метою виявлення впливу технологічних факторів на рівень енергоємності технологічного процесу механічного оброблення. В результаті проведених досліджень визначено корисну складову енергетичного балансу процесу різання.*

*Ключові слова:* різання, енергоємність, критерій, стружкоутворення, формоутворення, робота різання, технологічна система.

*Рис. 4. Форм. 20. Літ. 3.*

С.А. Приступа, А.А. Ткачук, О.П. Дахнюк

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭНЕРГОЕМНОСТЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

*В статье проведено исследование энергоёмкости процесса резания на токарных операциях. Проведена оценка технологического процесса резки по энергетическим критериям. На основе данных критериев проведено моделирование технологической операции резания с целью выявления влияния технологических факторов на уровень энергоёмности технологического процесса механической обработки. В результате проведенных исследований установлено полезную составляющую энергетического баланса процесса резания.*

*Ключевые слова:* резание, энергоёмность, критерий, стружкообразование, формообразование, работа резания, технологическая система.

S.A. Prystupa, A.A. Tkachuk, O.P. Dakhniuk

**STUDY OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON CUTTING ENERGY PROCESS**

*This paper studied the energy intensity of the cutting process in turning operations. The estimation process by cutting energy criteria. Based on these criteria Simulation technology cutting operations to detect the influence of technological factors on the level of energy intensity of the process machining . As a result of studies found a useful component of the energy balance of the cutting process.*

*Keywords:* cutting, energy, criterion, chip formation, process of formation, work cutting, technological system.

**Вступ.** Як відомо, під час виконання технологічних операцій механічного оброблення на процес різання припадають найбільші енергозатрати. Питома вага енергозатрат в структурі собівартості продукції машинобудівної промисловості складає близько 25% [3]. Водночас в умовах ринкової економіки однією з основних задач являється виготовлення високоякісної продукції з мінімальними затратами. Дослідження цих процесів дає змогу виявити взаємозв'язки технологічних факторів із затратами енергії в зоні різання. Це дозволяє встановити оптимальні технологічні режими для механічного оброблення деталей за критеріями енергетичної ефективності. Отже зниження показника енергетичних затрат в процесі механічного оброблення деталей машин являється актуальною науково-практичною задачею. Проте вирішення цієї задачі неможливе без детального дослідження роботи технологічної системи верстат-інструмент-деталь.

**Основний матеріал.** В процесі різання в оброблюваному матеріалі спочатку з'являються пружні деформації, з подальшим переміщенням ріжучого інструменту в глибину оброблюваного матеріалу виникають пластичні деформації, крім того під час процесу різання має місце тертя стружки об передню грань ріжучої кромки та задньої грані з оброблюваною поверхнею. Протягом кожного робочого ходу лезо інструменту здійснює певну роботу  $A_{різ}$ , результат якої — формування нової поверхні деталі.

Термодинамічна теорія міцності та руйнування дозволяє припустити, що для кожного матеріалу існує певна мінімальна кількість енергії  $E_0$ , якої достатньо щоб, тим чи іншим методом порушити її цілісність і отримати нові поверхні. Величина  $E_0$  залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, початкового рівня внутрішньої енергії і геометричних розмірів (об'єму).

Роботу технологічної системи в процесі токарного оброблення можна оцінити наступними критеріями: 1) потужністю, що споживає з мережі двигун приводу головного руху і подачі металорізального верстату; 2) ККД верстату; 3) питомими енергозатратами на оброблення [2, 3].

Перевагами вказаних критеріїв являється те, що вони характеризують процес оброблення безвідносно часу його перебігу.

Потужність, що споживається в процесі оброблення електродвигуном приводів верстата з електромережі, визначається як сума втрат потужності в елементах технологічної системи:

$$N_{\text{сум}} = N_e + \Delta N_{\text{вм}} + \Delta N_{\text{д}}, \quad (1)$$

де  $N_e$  — ефективна потужність різання;  $\Delta N_{\text{вм}}$  — сумарні втрати потужності в механізмах приводу верстата;  $\Delta N_{\text{д}}$  — втрати потужності в електродвигуні приводу.

Отже енергоспоживання технологічної системи протягом основного  $\tau_{\text{осн}}$  і допоміжного  $\tau_{\text{доп}}$  часу складається з трьох складових (рис. 1):

- $(N_e \cdot \tau_{\text{осн}})$  — «корисна» енергія, що витрачається в зоні різання;
- $(\Delta N_{\text{вм}} \cdot \tau_{\text{осн}})$  — втрати, що виникають внаслідок навантаження елементів приводу моментами складових сил різання;
- $[\Delta N_{\text{д}} (\tau_{\text{осн}} + \tau_{\text{доп}})]$  — втрати холостого ходу двигуна.

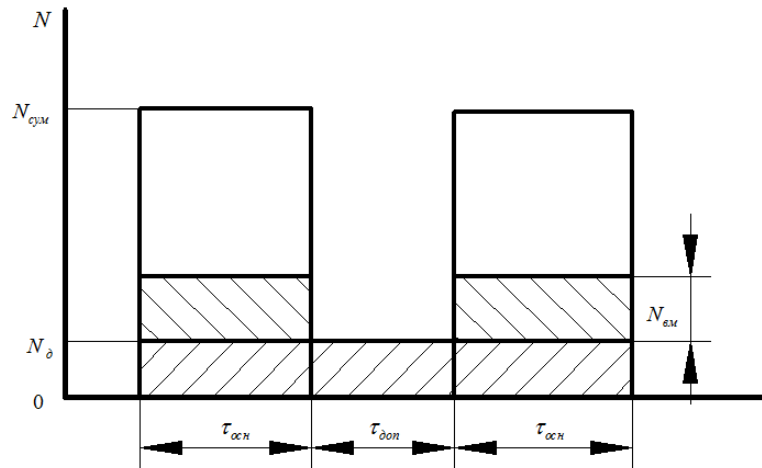


Рис. 1. Схема енергоспоживання металорізального верстату за цикл оброблення

Очевидно, що втрати потужності в технологічній системі умовно можна розділити на три складові:

- 1) втрати в механізмах приводів верстата;
- 2) втрати в електродвигуні приводів.
- 3) втрати в зоні різання;

Для теорії різання представляє інтерес третя складова. Робота в зоні різання, що здійснюється ріжучим інструментом, є визначальною для міри енергетичності технологічної операції, кількості електроенергії що споживає верстат, з електричної мережі, а також навантажувальні втрати в трансмісії. Робота різання в межах основного часу одного технологічного переходу складається з наступних енергозатрат:

- на процес стружкоутворення;
- на процес формоутворення.

Робота в зоні різання визначається як добуток потужності різання на основний технологічний час:

$$A_{\text{різ}} = N_e \tau_{\text{осн}}, \quad (2)$$

Потужність різання  $N_e$ , Вт, представляє собою добуток сили різання  $P$ , Н, на швидкість головного руху  $v$ , м/хв:

$$N_e = \frac{P \cdot v}{60}. \quad (3)$$

Швидкість  $v$ :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, v = \frac{L \cdot n(k+1)}{1000}, \quad (4)$$

де  $D$  — діаметр заготовки або інструменту, що здійснюють обертальний рух навколо своєї осі, мм;  $n$  — частота обертання,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $L$  — довжина ходу заготовки або інструменту,  $k$  — коефіцієнт, що рівний відношенню швидкостей робочого ходу і холостого ходів:  $k = \frac{v_p}{v_x}$ .

Для дослідження впливу функціональної зміни сили різання на енергетичні показники технологічної системи лезового оброблення слід встановити причини, що викликають ці зміни. На величину роботи різання впливають: властивості оброблюваного матеріалу; стан поверхневого шару заготовки; площа шару, що зрізується; вид і властивості інструментального матеріалу, геометричні параметри ріжучої частини інструменту, режими оброблення, наявність і характер ЗОР та інші параметри процесу різання, які разом утворюють сукупність керуючих факторів. Тому вирішення задачі оптимізації енергозатрат в процесі механічного оброблення слід проводити шляхом встановлення оптимальних режимів оброблення, а саме швидкості, подачі та глибини різання.

Ефективна потужність  $N_e$  в загальному випадку являється сумарною потужністю, що затрачена в процесі різання всіма складовими  $P_x, P_y$  і  $P_z$  (рис. 2) сили різання  $P$ , яка визначається за наступним виразом:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (5)$$

Потужність осьової сили різання:

$$N_{ex} = P_x n S \quad (6)$$

де  $n$  — частота обертання оброблюваної заготовки;  $S$  — поздовжня подача.

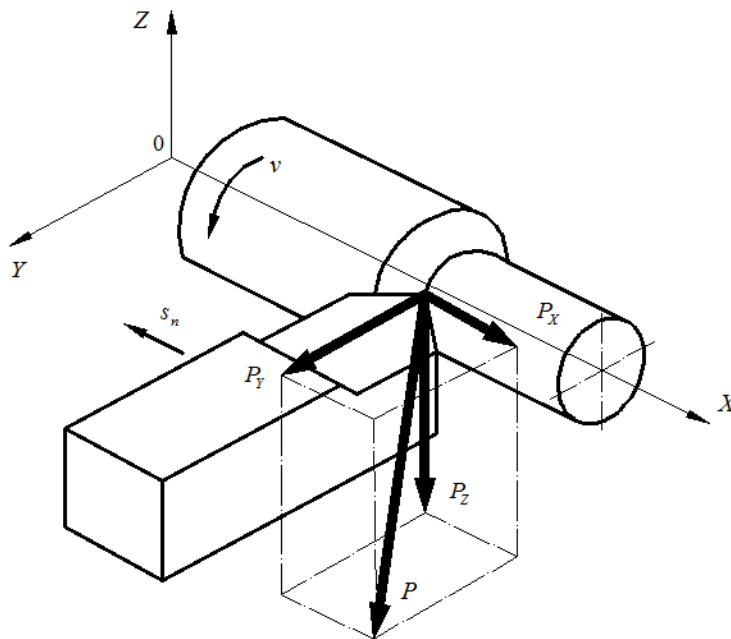


Рис. 2. Складові сили різання

Потужність радіальної складової сили різання визначається як:

$$N_{ey} = P_y v \cos \alpha, \quad (7)$$

оскільки вектор  $\bar{P}_y$  перпендикулярний вектору  $\bar{v}$ .

Потужність вертикальної складової  $P_z$ , напрям якої співпадає з напрямом швидкості різання, визначається рівнянням:

$$N_{ez} = P_z v. \quad (8)$$

Відповідно, ефективна потужність з використанням рівнянь (6), (7), (8) визначається як:

$$N_e = N_{ex} + N_{ey} + N_{ez} = P_x nS + P_z v \quad (9)$$

Швидкість подачі виражена добутком  $nS$ , приблизно на два порядки менша швидкості різання  $v$ . Тому потужність  $N_{ex}$  складає 1...2% всієї затраченої ефективної потужності [1]. В зв'язку з цим силу різання  $P$  можна замінити її основною складовою  $P_z$ .

На рис 3. показана схема сил прикладених до ріжучої кромки інструменту. В точці  $M$  до передньої поверхні леза різця прикладена приведена нормальна сила  $Q$ , перпендикулярна передній поверхні різця, і приведена сила тертя  $f_1 Q$ , що виникає із за переміщення стружки по передній поверхні ( $f_1$  — коефіцієнт тертя ковзання оброблюваного та інструментального матеріалів). В точці  $O$  до задньої поверхні різця прикладені приведена сила  $R$ , перпендикулярна напрямку головного руху різця зі швидкістю  $v$ , і приведена сила тертя  $f_1 R$ , яка має напрям протилежний руху різця. З умови рівноваги слідує, що сила  $P$  рівна сумі проєкцій всіх сил, прикладених до леза різця на пряму  $A-A$ , здовж якої діє сила  $P$ . Проектуючи розглянуті сили на горизонтальну лінію  $A-A$ , отримаємо наступну рівність:

$$P = Q \cos \gamma + f_1 Q \sin \gamma + f_1 R. \quad (10)$$

Використовуючи принцип рівноваги і проектуючи вище розглянуті сили на вертикальну лінію  $B-B$ , отримуємо наступну рівність:

$$R = Q \sin \gamma - f_1 Q \cos \gamma. \quad (11)$$

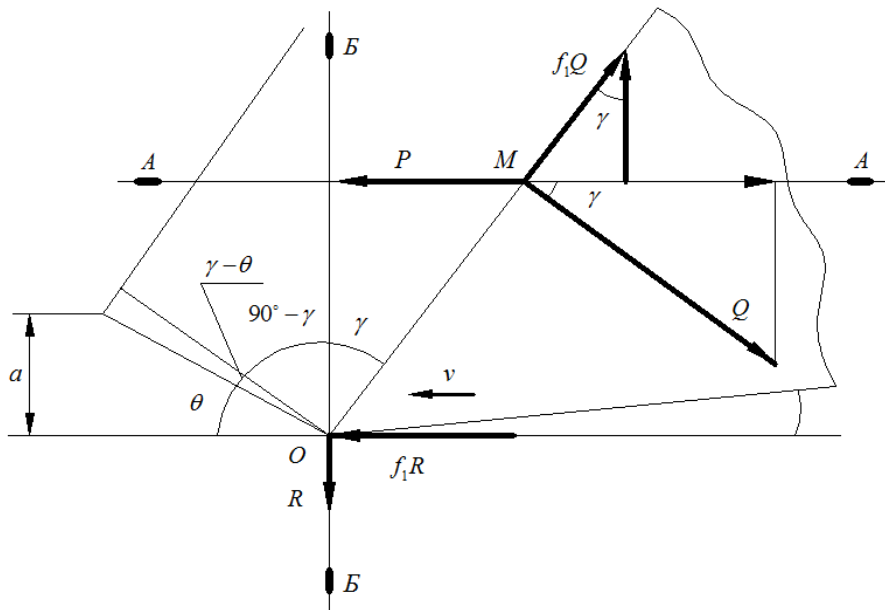


Рис. 3. Схема збалансованих сил, що діють на лезо різця

Підставивши отримане з рівняння (10) значення сили  $R$  в рівняння (11), отримаємо:

$$P = Q \cos \gamma + \sin \gamma + f_1 Q \sin \gamma - f_1^2 Q \cos \gamma, \quad (12)$$

або

$$P = Q \left[ (1 - f_1^2) \cos \gamma + 2f_1 \sin \gamma \right]. \quad (13)$$

В рівнянні (13) сила  $Q$  визначає опір металу пластичній деформації стружкоутворення. В розглянутій схемі стружкоутворення пластична деформація умовно відбувається тільки в площинні зрізання.

Розглядаючи систему сил, які діють в зоні стружкоутворення опір пластичній деформації можна представити трьома приведеними силами:

- нормальною силою  $N$ ;

- силою внутрішнього тертя  $f_2 N$ , де  $f_2$  — коефіцієнт внутрішнього тертя в пластично деформованому металі;
- силою  $F$ , яку створюють дотичні напруження в площині різання.

Напрямок нормальної сили  $N$  співпадає з лінією  $B-B$ , перпендикулярній площині різання. Площина різання утворює кут  $\theta$  з напрямком головного руху і кут  $(\gamma - \theta)$  з лінією  $E-E$ , перпендикулярній передній поверхні леза, загостреного під кутом  $\gamma$ .

На рис. 2 сили  $Q$  і  $f_1 Q$  розглядалися прикладеними до різця. На рис. 3 ті ж сили розглядаються прикладеними до стружки, тому вони діють в протилежному напрямку. Проектуючи на лінію  $B-B$  діючі в цій зоні сили, з умови рівноваги отримаємо:

$$N = f_1 Q \cos(\gamma - \theta) - Q \sin(\gamma - \theta). \quad (14)$$

Тоді сила внутрішнього тертя металу в площині різання дорівнює:

$$f_2 N = f_1 f_2 Q \cos(\gamma - \theta) - f_2 Q \sin(\gamma - \theta). \quad (15)$$

В площині різання по всій її площині виникають дотичні напруження  $\sigma$ . Ці напруження представлені силою:

$$F = \frac{ab\sigma}{\sin \theta} \quad (16)$$

де  $a$  — товщина шару, що зрізується,  $b$  — ширина шару, що зрізується.

Також, сила  $F$  виражається шляхом проектування діючої на метал в зоні стружкоутворення системи сил на лінію площини різання:

$$F = Q \cos(\gamma - \theta) - f_1 Q \sin(\gamma - \theta) - f_1 f_2 Q \cos(\gamma - \theta) + f_2 Q \sin(\gamma - \theta). \quad (17)$$

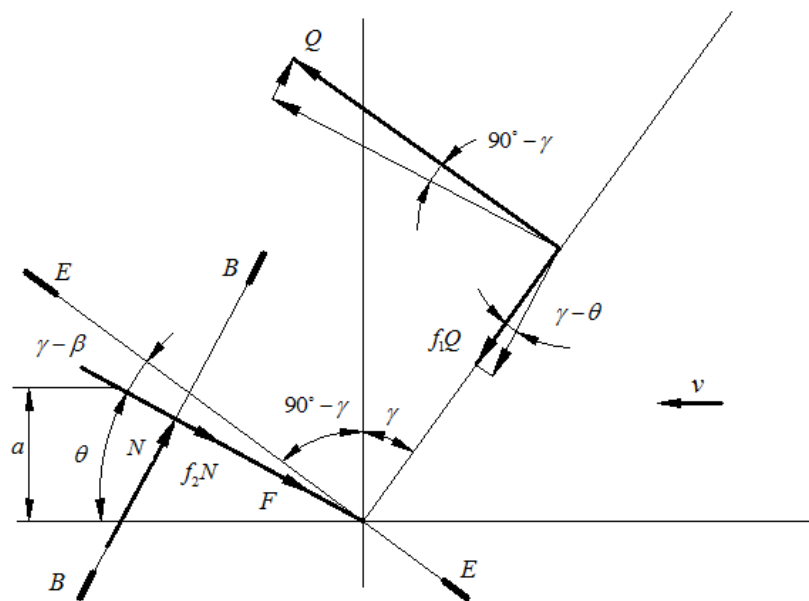


Рис. 4. Схема збалансованих сил опору металу пластичній деформації і руйнуванню під час

Враховуючи рівняння (16) (17) сила, перпендикулярна до передньої поверхні різця  $Q$  дорівнює:

$$Q = \frac{ab\sigma}{\sin \theta [(1 - f_1 f_2) \cos(\gamma - \theta) + (f_1 + f_2) \sin(\gamma - \theta)]} \quad (18)$$

Підставивши отримане значення сили  $Q$  в рівняння (9) отримуємо теоретичне рівняння сили різання:

$$P = \frac{ab\sigma \left[ (1 - f_1^2) \cos \gamma + 2f_1 \sin \gamma \right]}{\sin \theta \left[ (1 - f_1 f_2) \cos (\gamma - \theta) + (f_1 + f_2) \sin (\gamma - \theta) \right]} \quad (19)$$

Тоді вираз для визначення роботи в зоні різання з врахуванням (3), (4) і (14) матиме вигляд:

$$A_{\text{різ}} = \frac{ab\sigma \left[ (1 - f_1^2) \cos \gamma + 2f_1 \sin \gamma \right] \left[ \text{Ln}(k + 1) \right]}{6 \sin \theta \left[ (1 - f_1 f_2) \cos (\gamma - \theta) + (f_1 + f_2) \sin (\gamma - \theta) \right]} \tau_{\text{осн}} \cdot 10^{-4} \quad (20)$$

Термодинамічна теорія міцності та руйнування дозволяє припустити, що для кожного матеріалу існує мінімальна кількість енергії  $\Delta E_0$ , якої достатньо щоб, тим чи іншим методом порушити її цілісність і отримати нові поверхні. Величина  $\Delta E_0$  залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, початкового рівня внутрішньої енергії і геометричних розмірів (об'єму) деталі або заготовки. Якщо змінюється об'єм матеріалу  $\Delta V_0$ , що піддається руйнуванню, то змінюється і мінімальна кількість енергії руйнування: Величина  $\Delta E_0$  – питима робота руйнування, і характеризує безпосередньо матеріал [2].

**Висновок.** Величина  $\Delta E_0$  являється корисною складовою енергетичного балансу процесу різання. А оскільки, енергія, що передається заготовці, витрачається на пружно-пластичне деформування, тертя стружки під час контакту з передньою гранню інструменту і тертя поверхні різання під час контакту із задньою гранню інструменту, то робота різання  $A_{\text{різ}}$  завжди перевищує  $\Delta E_0$ .

Таким чином, виконання умови  $A_{\text{різ}} \rightarrow \Delta E_0$  свідчить про ефективність роботи різання, а також максимальну продуктивність технологічного процесу механічного оброблення.

Мірою енергетичності оброблення металів різанням можуть служити питомі енергозатрати, що приведені до одиниці об'єму або маси.

$$e = \frac{A_{\text{різ}}}{V}$$

Величина  $e$  – об'ємна продуктивність стружкоутворення, тобто не залежить ні від часу оброблення, ні від геометричних розмірів заготовки. По значенню  $e$  можна порівняти енергетичну ефективність альтернативних маршрутів оброблення і параметрів окремих операцій. Показники  $e$  і  $K_e$ , перетворивши їх в цільові функції виду  $e \rightarrow \min K_e \rightarrow 1$  можна використовувати в якості критеріїв оптимальності, в процесі встановлення параметрів енергоекономічного оброблення різанням.

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов М.: Высш. шк., 1985. – 304 с., ил. Учебник для вузов.
2. Старков В.К. Физика и оптимизация резания металлов // М.: Машиностроение 2009г. – 640 с.
3. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов. Ташкент: Фан, 1985. – 104 с.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2014.

УДК 514.8

С.І. Пустюльга, В.Р. Самостян, А.А. Хомич

Луцький національний технічний університет

ДИСКРЕТНЕ ФОРМУВАННЯ ЕКВІДИСТАНТ ДО МОДЕЛЕЙ ЗАМКНУТИХ  
КРИВИХ АПАРАТОМ ЧИСЛОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

У роботі запропоновано алгоритм формування дискретних моделей внутрішніх та зовнішніх еквідистант до замкнутих кривих з використанням математичного апарату числових послідовностей. Проведені дослідження по визначенню обмежень на параметри внутрішніх еквідистант для унеможливлення утворення на них петель та самоперетинів.

**Ключові слова:** сипкі матеріали, дискретне моделювання, числові послідовності, еквідистанта.

Рис. 6. Форм.8. Літ. 7.

С. И. Пустюльга, В.Р. Самостян, А.А. Хомич

ДИСКРЕТНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЭКВИДИСТАНТ К МОДЕЛЯМ ЗАМКНУТЫХ  
КРИВЫХ АПАРАТОМ ЧИСЛОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В работе предложен алгоритм формирования дискретных моделей внутренних и внешних эквидистант к замкнутому кривым с использованием математического аппарата числовых последовательностей. Проведены исследования по определению ограничений на параметры внутренних эквидистанта для предотвращения образования на них петель и самопересечений.

**Ключевые слова:** сыпучие материалы, дискретное моделирование, числовые последовательности, эквидистанта.

S.I. Pustiulga, V.R. Samostyan, A.A. Homuch

DISCRETE FORMATION OF AEQUIDISTANTS TO MODELS OF CLOSED CURVES  
BY MEANS OF MATHEMATICAL TOOLS OF NUMERICAL SEQUENCE

In the article it is considered the problem of construction of models of discrete trajectories of loading devices in the organization of open storage of bulk materials in specified areas which are bounded by complex curved contour of the given geometric properties. It is proposed an algorithm for formation of discrete models of internal and external aequidistants to closed curves using mathematical tools of numerical sequences. It was performed the research to determine restrictions on the parameters of the internal aequidistants to prevent the formation of loops and their self-crossings.

Future research will be related to the development of algorithms for the simulation of discrete surfaces of the same slope with certain geometric properties which are formed with the usage of mathematical tools of binary sequences of numbers in a certain time, for organization of bulk materials storage.

**Keywords:** bulk material, mathematical tools, numerical sequences, aequidistant.

**Постановка проблеми.** Дослідження внутрішнього тертя сипких матеріалів є актуальними для процесів проектування та експлуатації навантажувально-розвантажувальних пристроїв транспортуючих машин. Про трибологічні властивості сипких матеріалів прийнято судити по величині кута природного відкосу  $\phi$  і відповідному йому коефіцієнту внутрішнього тертя  $f$ , а також за коефіцієнтами зовнішнього тертя спокою  $f^1$  і руху  $f^2$ .

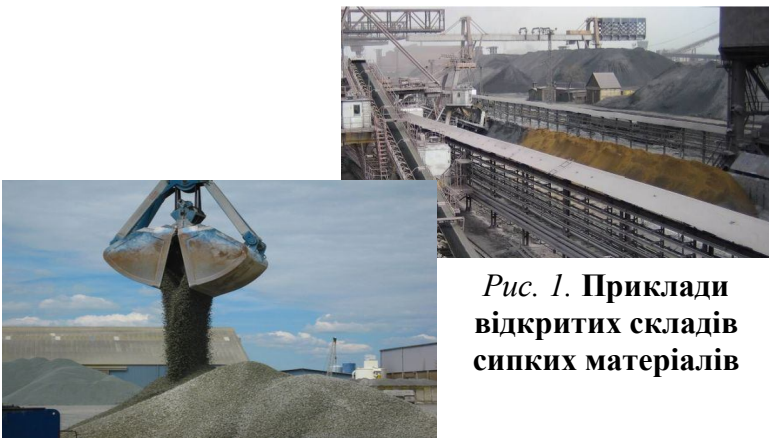


Рис. 1. Приклади відкритих складів сипких матеріалів

Основною характеристикою сипкості матеріалу, тобто здатності скочуватися по похилій поверхні є все таки кут природного укосу  $\phi$ . Цей кут утворюється між площиною основи і твірною конуса при вільному падінні сипкого матеріалу на горизонтальну площину.

Найменшим кутом природного відкосу характеризуються сипкі матеріали із тіл з гладкою поверхнею. А при

відхиленні форми окремих елементів від форми кулі сипкість матеріалу зменшується. Кут природного відкосу є основною характеристикою при проектуванні складів, а також навантажувальних пристроїв транспортуючих машин, так як відношення розмірів основи, її



геометрії, а також висоти складування сипкого вантажу, його об'єму, маси прямо залежить від даного кута (рис. 1).

Якщо поставити завдання по проектуванню складу певного сипкого матеріалу на заданій площі, обмеженій криволінійним контуром складної геометрії, з визначеною висотою складування при максимальному об'ємі сипкого вантажу, то геометрично задача зводиться до побудови моделі поверхні однакового відкосу (рис. 2), для якої треба визначити траєкторію руху навантажувального пристрою машини в певному часі. Такою траєкторією є еквідистанта до замкнутого контуру основи сипкого вантажу, модель якої повинна враховувати ряд геометричних вимог до кінцевого об'єкту.

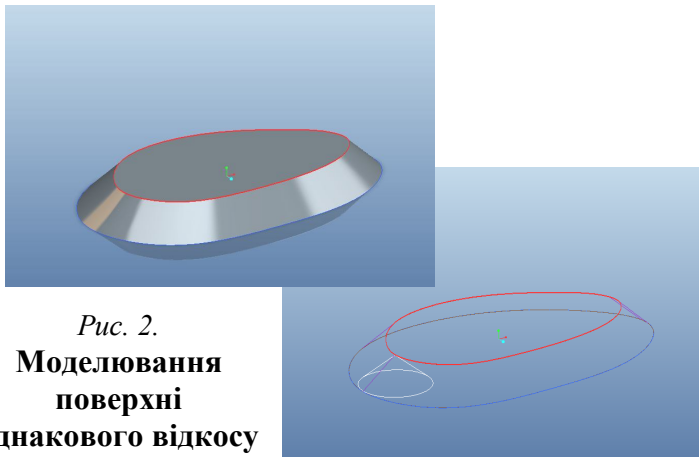


Рис. 2.  
**Моделювання  
поверхні  
однакового відкосу**

також у інших практичних задачах, наприклад, при створенні програм для верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ), у проектуванні трасування комп'ютерних плат, при розробці елементів моделей трубопроводів, при прогнозуванні розповсюдження пожеж та інших природних явищ і т.і. [1,2,3]. Відтак, розробка нових ефективних алгоритмів побудови еквідистантних замкнутих кривих ліній з певними геометричними властивостями, удосконалення

вже відомих математичних апаратів побудови кривих даного класу залишається достатньо актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень.** У сучасній науковій літературі пропонується чимала кількість алгоритмів побудови еквідистантних та квазіеквідистантних кривих у неперервному вигляді [3,4], у тому числі алгоритмів, розроблених вченими, що працюють в галузі прикладної геометрії. В опублікованих роботах прийоми побудови еквідистантних кривих (або паралельних множин), як правило, вибиралися у відповідності до розв'язання конкретних практичних задач. Основною проблемою при цьому було видалення петель та самоперетинів, що утворювались в процесі моделювання, а від так розроблені алгоритми мають достатньо громіздкий опис.

Враховуючи, що більшість моделей складних за геометрією кривих, які використовуються у техніці мають кусково-лінійний характер, а також зважаючи на дискретний характер роботи сучасних математичних пакетів для ЕОМ актуальною є задача розробки дискретних алгоритмів моделювання еквідистантних кривих та дослідження геометричних параметрів, що впливають на нерегулярність їх геометричної форми, з метою запобігання небажаних ефектів процесу моделювання.

**Формування цілей роботи.** Метою даної роботи є розробка алгоритмів побудови дискретних моделей зрівноважених замкнутих еквідистантних кривих за допомогою математичного апарату числових послідовностей та дослідження геометричних обмежень, які унеможливають утворення на еквідистантах самоперетинів та петель.

**Основна частина.** Процес проектування відкритого складу для певного сипкого матеріалу будемо пов'язувати з наступними етапами. Перший – формування дискретної моделі замкнутого контуру із певними геометричними властивостями, серед яких: гладкість формованого об'єкту, проходження через ряд базових, реперних точок, забезпечення заданої площі модельованого контуру. Другий – аналіз дискретних аналогів кривини у точках дискретної моделі, кутів природного відкосу сипкого матеріалу і, як наслідок, визначення параметрів еквідистанти, яка слугуватиме траєкторією руху навантажувального пристрою для формування поверхні однакового відкосу на заданому замкнутому контурі. Третій – формування моделі поверхні однакового відкосу із підрахунком об'єму, маси та висоти модельованого відкритого складу сипкого матеріалу.

У роботах [5,6] запропоновано алгоритми моделювання дискретно представлених зрівноважених замкнутих кривих, із визначеними геометричними властивостями, за допомогою математичного апарату числових послідовностей. Досліджено зв'язок між геометрією замкнутих

кривих та вихідними умовами дискретного моделювання. Наведені обмеження щодо унеможливлення наявності у формованій ДПК точок самоперетину та петель на моделі. В основу алгоритму лягли системи лінійних рівнянь, складені на базі комплексу вихідних умов до числових послідовностей виду:

$$\begin{aligned} x_n &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)x_1 + \frac{n}{N}x_N + \frac{n}{N} \sum_{v=1}^{N-1} \sum_{s=1}^v kP_s^x - \sum_{v=1}^{n-1} \sum_{s=1}^v kP_s^x, \\ y_n &= \left(1 - \frac{n}{N}\right)y_1 + \frac{n}{N}y_N + \frac{n}{N} \sum_{v=1}^{N-1} \sum_{s=1}^v kP_s^y - \sum_{v=1}^{n-1} \sum_{s=1}^v kP_s^y, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x_1, x_N, y_1, y_N$  - крайові умови,

$N$  - порядковий номер вузла замикання,

$kP_s^x, kP_s^y$  - складові функціонально розподіленого навантаження у вузлах моделі.

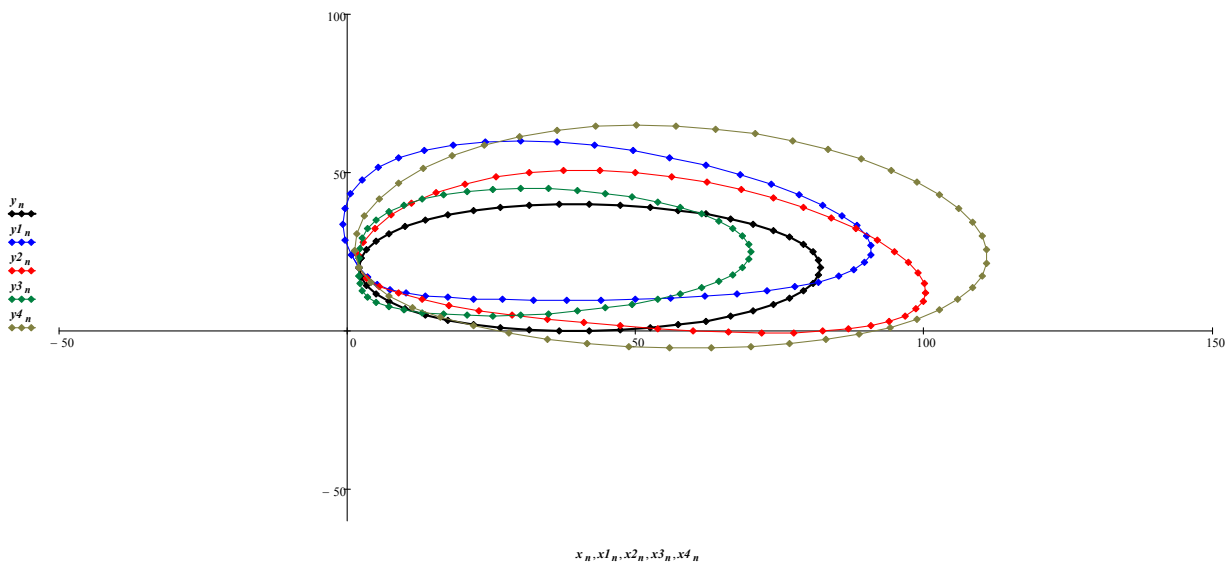


Рис. 3. Дискретні моделі замкнутих кривих із заданими геометричними властивостями

Складові функціонально розподіленого навантаження дають можливість прогнозувати динаміку зміни геометрії моделі, виражати необхідні геометричні характеристики формованого образу через параметри складових навантаження, змінювати значення навантаження на вузли образу у процесі можливих ітерацій. При цьому, якщо розподіл навантаження є дискретним аналогом неперервної функції то, відповідно до цього, буде забезпечуватись і гладкість моделі. При наявності особливих точок на графіку навантаження втрачається гладкість між сформованими вузлами модельованого контуру, а при наявності стрибків навантаження у точках формованої моделі - з'являться точки розривів. Вектори навантаження слугують крім того вільними параметрами для врахування практично необмеженої кількості вихідних даних та умов при дискретному моделюванні замкнутих одновимірних образів. Приклади формування дискретних моделей зрівноважених замкнутих кривих із заданими геометричними властивостями наведено на рисунку 3.

Дискретною моделлю еквідистанти до, таким чином, дискретно представленої кривої будемо називати множину кінців рівних відрізків, відкладених від кожної точки в певному напрямку на дискретних аналогах нормалей до заданої ДПК.

Графічно, для опуклого дискретно представленої контуру, провести еквідистанту досить нескладно. Необхідно лише знайти перпендикуляри у кожній точці моделі до дискретних аналогів дотичних у цих же точках, на яких відкласти рівні відстані. Зовнішня еквідистанта при цьому завжди буде являти собою таку ж опуклу дискретну модель без особливих точок, при довільно вибраній відстані точок еквідистанти від базової дискретної моделі. Зовсім інша ситуація буде при спробі побудови внутрішньої еквідистанти до ДПК. При заданні довільної відстані до точок, дискретна модель еквідистанти може утворювати петлі, що є неприйнятним для практичного застосування даного алгоритму.

Нехай за допомогою одновимірних числових послідовностей знайдено дискретний аналог замкнутого базового контуру із  $n$  точками (рис. 4). Задамо множину дискретних аналогів дотичних  $[n-1, n+1]$  у  $n$  вузлах моделі і побудуємо до них нормалі. Для побудови множини точок внутрішньої еквідистанти  $n_e$  розглянемо подібні трикутники ( $\Delta(5A7) \square \Delta(6eB6)$ ).

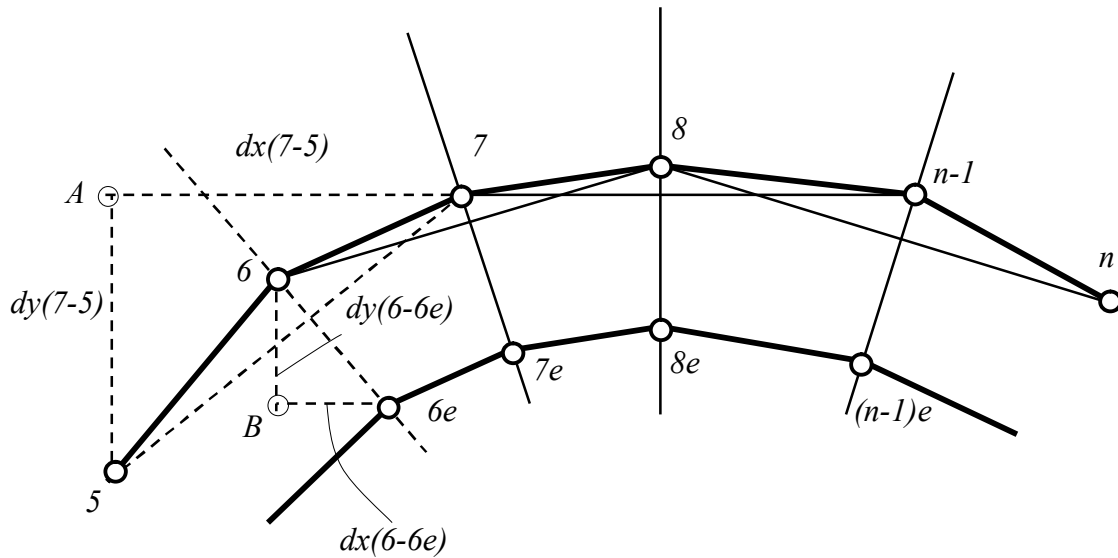


Рис. 4. Фрагмент дискретної моделі базової кривої та її внутрішньої еквідистанти

Із подібності трикутників можна записати співвідношення:

$$\frac{dy(7-5)}{dx(6-6e)} = \frac{dx(7-5)}{dy(6-6e)} = \frac{l(7-5)}{l(6-6e)}, \quad (2)$$

де:  $l(6-6e)$  задана величина відстані до дискретної множини точок еквідистанти.

Звідки шукані невідомі величини визначаються:

$$dx(6-6e) = x_6 \pm \frac{dy(7-5)l(6-6e)}{l(7-5)} \quad (3)$$

$$dy(6-6e) = y_6 \pm \frac{dx(7-5)l(6-6e)}{l(7-5)} \quad (4)$$

Вирази (3) та (4) однозначно дозволяють визначити дискретну множину точок шуканої еквідистанти із заданими геометричними параметрами.

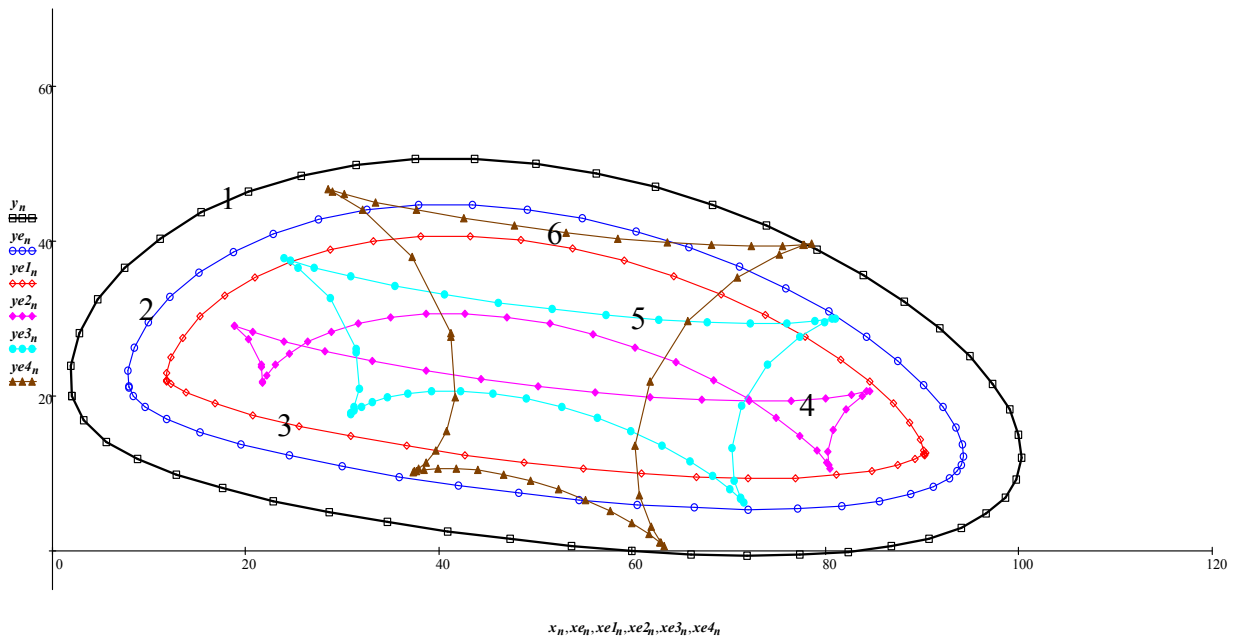
Однак для побудови дискретної моделі поверхні однакового відкосу за допомогою системи подвійних числових послідовностей необхідно дискретну модель еквідистанти до розрахованого контуру основи теж подати у вигляді системи одновимірних числових послідовностей у замкнутому вигляді. Враховуючи вирази (1), (3) та (4), одновимірні числові послідовності, що описують дискретну модель шуканої еквідистанти можна подати у вигляді:

$$xe_n = x_n \pm \frac{le \square dy_n}{\sqrt{(dx_n)^2 + (dy_n)^2}} \quad (5)$$

$$ye_n = y_n \pm \frac{le \square dx_n}{\sqrt{(dx_n)^2 + (dy_n)^2}} \quad (6)$$

де:  $l_e$  - задана відстань точок еквідистанти від замкнутої кривої опорного контуру.

За результатами запропонованого алгоритму була створена програма для дискретного формування як замкнутого опорного контуру із заданими геометричними властивостями, так і множини дискретно представлених еквідистант, приклади яких наведено на рисунку 5.



1 – базова замкнута крива, 2 – еквідистанта  $l_e = 6$ , 3 – еквідистанта  $l_e = 10$ , 4 – еквідистанта  $l_e = 20$ , 5 – еквідистанта  $l_e = 30$ , 6 – еквідистанта  $l_e = 40$

Рис. 5. Дискретна модель базової кривої та її еквідистант з особливими точками

Із рисунка 5 видно, що базова крива є дискретною моделлю опуклої регулярної кривої із заданими геометричними властивостями. Ряд побудованих на основі одновимірних числових послідовностей (5), (6) дискретних моделей внутрішніх еквідистантних кривих, в залежності від параметру  $l_e$ , мають різні геометричні властивості. Дискретна модель еквідистанти 2 має такі ж геометричні властивості, як і базова крива, тобто є опуклою і регулярною, дискретні моделі еквідистант 3, 4, 5, 6 мають особливі точки, петлі та самоперетини, що є неприйнятним з точки зору їх використання як траєкторії руху навантажувального пристрою. Очевидно, треба визначити обмеження для параметру  $l_e$ , який унеможливить утворення нерегулярних точок на дискретних моделях формованих еквідистант.

Для визначення обмежень скористаємось дискретним аналогом кривини у точках змодельованої базової кривої.

Згідно роботи [7] дискретний аналог кривини у точках моделі можна подати у вигляді:

$$k_n = \frac{2 \sin \alpha}{[n-1, n+1]} \quad (7)$$

Точка або ряд точок, де кривина буде найбільшою є базовими для розрахунку максимального можливого значення радіусу кривини, який і встановить обмеження на максимальну відстань точок еквідистанти від дискретної моделі базової кривої, сформованої за допомогою одновимірних числових послідовностей (1).

$$l_e^{\max} \leq \frac{1}{k_n^{\max}} \quad (8)$$

Приклад роботи алгоритму побудови дискретних моделей внутрішніх еквідистант із забезпеченням умови відсутності на них нерегулярних точок математичним апаратом числових послідовностей наведено на рисунку 6.

**Висновки.** У роботі розглядається проблема побудови дискретних моделей траєкторій

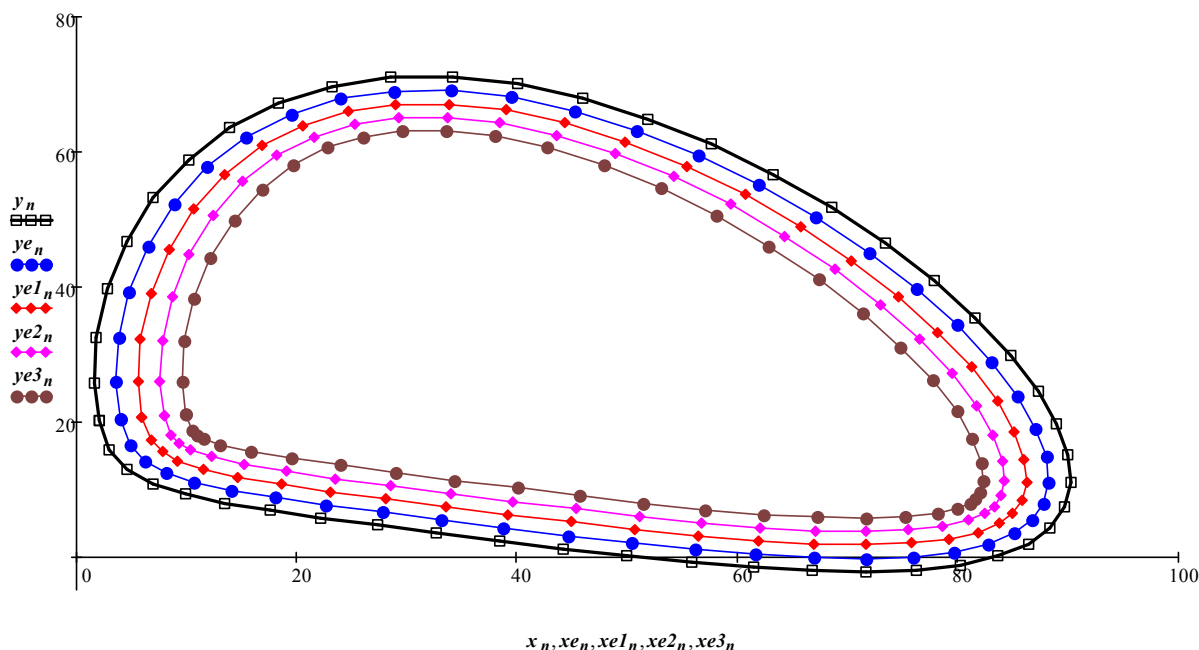


Рис. 6. Приклад побудови множини дискретних моделей еквідистант

руху навантажувальних пристроїв при організації відкритих складів сипких матеріалів на заданих площах, обмежених складним криволінійним контуром із заданими геометричними властивостями. Запропоновано алгоритм формування дискретних моделей внутрішніх та зовнішніх еквідистант до замкнутих кривих з використанням математичного апарату числових послідовностей. Проведені дослідження по визначенню обмежень на параметри внутрішніх еквідистант для унеможливлення утворення на них петель та самоперетинів. Майбутні дослідження пов'язані з розробкою алгоритмів дискретного моделювання поверхонь однакового відкосу з певними геометричними властивостями, формованих за допомогою математичного апарату подвійних числових послідовностей у певному часі, для організації складів сипких матеріалів.

1. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. – Москва: Стройиздат, 1977. – 256 с.
2. Бойцов Ю.А., Карталис Н.И. Определение внутреннего и внешнего трения сыпучих грузов. Санкт-Петербург НИУИТ. – 9 с.
3. Лигун А., Шумейко А. Асимптотические методы восстановления кривых. / Институт математики. / – К.: 1997, – 357 с.
4. Шоман О.В. Паралельні множини в геометричному моделюванні явищ і процесів: Монографія. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 288 с.
5. Пустюльга С.І., Самостян В.Р. Дискретне геометричне моделювання зрівноважених замкнутих кривих числовими послідовностями. Прикладна геометрія та інженерна графіка: Зб. наук. пр. – К.: 2011. – Вип. 87. – С. 314-319.
6. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Клак Ю.В., Хомич А. Дискретне моделювання замкнутих траєкторій числовими послідовностями. Наукові нотатки ЛНТУ. – Луцьк: ЛНТУ, 2011. – Вип. 31. – С. 295-298.
7. Найдиш В.М. Про гладкість дискретної інтерполяції. Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: 2003, Вип. 73, – С. 8-12.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.

УДК 539.3

В.П. Ревенко

### ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НАВАНТАЖЕНОГО НА ТОРЦЯХ ДВОШАРОВОГО ЦИЛІНДРА

Розглянуто вісесиметричний напружено-деформований стан скінченного двошарового циліндра, навантаженого на торцях. Розроблено метод аналітично-числового розв'язання крайових задач для двошарового циліндра. Вперше теоретично встановлені числові критерії збіжності методу і показано, що точність задоволення крайових умов оцінюється одним числом – мінімумом узагальненої квадратичної форми.

**Ключові слова:** скінченний двошаровий циліндр, напружено-деформований стан, узагальнена квадратична форма.

Рис. 1 Форм. 20. Літ. 13.

В.П. Ревенко

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРУЖЕННОГО НА ТОРЦАХ ДВУХСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРА

Рассмотрено осесимметричное напряженно-деформированное состояние конечного двухслойного цилиндра, нагруженного на торцах. Разработан метод аналитическо-численного решения крайевых задач для двухслойного цилиндра. Впервые теоретически установлены числовые критерии сходимости метода и показано, что точность удовлетворения крайевых условий оценивается одним числом – минимумом квадратичной формы.

**Ключевые слова:** двухслойный конечный цилиндр, напряженно-деформированное состояние, обобщенная квадратичная форма.

V.P. Revenko

### DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE OF TWO-LAYER CYLINDER OF LOADED ON THE ENDS

We consider axisymmetric stress-strain state of the finite two-layer cylinder on the ends loaded. The method of analytical and numerical solution of boundary value problems for two-layer cylinder is determined. For the first time theoretically established numerical criteria for convergence of the method and show that the accuracy of satisfaction of the boundary conditions is assessed by a single number – the minimum of a quadratic form.

**Keywords:** two-layer finite cylinder, the stress-strain state, generalized quadratic form.

**Вступ.** Багатошарові пружні циліндри, а особливо двошарові – поширені елементи будівельних та інженерних конструкцій. Огляд праць з розв'язування вісесиметричних задач для багатошарових циліндрів, напружено-деформований стан (НДС) яких залежать тільки від однієї просторової змінної, наведено у публікаціях [1, 2], а з врахуванням динамічних ефектів у [3, 4]. При розрахунку статичного напруженого стану двошарових циліндричних тіл широко використовують спрощені двовимірні моделі циліндричних оболонок [5, 6]. У працях [7–11] вивчалися задачі теорії пружності у циліндричній системі координат з використанням однорідних розв'язків (власних функцій).

Знайдемо вісесиметричний НДС шаруватого циліндра, який знаходиться в стані статичної рівноваги і має два шари: внутрішній шар  $D_1 = \{(r, \varphi, z) \in ([R_0, R_1] \times [0, 2\pi] \times [-h, h])\}$  з характеристиками матеріалу  $E_1$ ,  $\nu_1$ ,  $R_0 = 0$ ; зовнішній –  $D_2 = \{(r, \varphi, z) \in ([R_1, R_2] \times [0, 2\pi] \times [-h, h])\}$ ,  $E_2$ ,  $\nu_2$ , див. рис. 1. До торців циліндра прикладені неперервно-розподілені нормальні  $\sigma_m^j(r)$  і дотичні  $\tau_{zr}^j(r)$  навантаження.

$$\sigma_z^j(r, h_m) = \sigma_m^j(r), \quad \tau_{zr}^j(r, \pm h) = \tau_m^j(r). \quad (1)$$

де  $h_1 = -h$ ,  $h_2 = h$ , нижній індекс  $m$  описує торці, верхній індекс  $j = 1$  описує внутрішній,  $j = 2$  – зовнішній шар циліндра. Бічна поверхня вільна від навантажень

$$\sigma_r(z, R_2) = 0, \quad \tau_{rz}(z, R_2) = 0. \quad (2)$$

На поверхні контакту шарів виконуються умови ідеального контакту:

$$u_r^2 = u_r^1, \quad u_z^2 = u_z^1, \quad \sigma_r^2 = \sigma_r^1, \quad \tau_{rz}^2 = \tau_{rz}^1, \quad r = R_1. \quad (3)$$

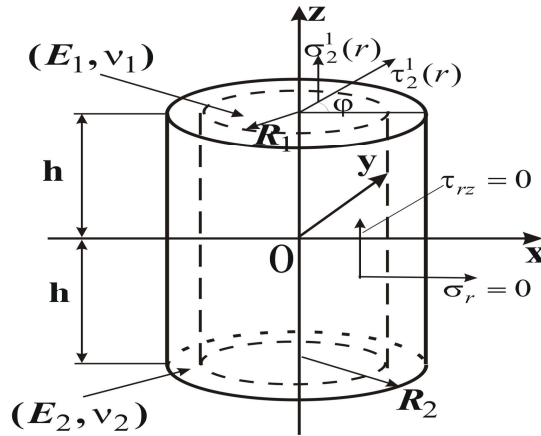


Рис. 1. Навантаження двошарового циліндра

Для визначення пружних переміщень  $u_r^j, u_z^j$  в  $j$ -шарі використаємо загальний розв'язок рівнянь Ляме [7, 11]:

$$u_r^j(r, z) = \frac{\partial P_j}{\partial r}, \quad u_z^j(r, z) = \frac{\partial P_j}{\partial z} - 4(1 - \nu_j)\Phi_j, \quad u_\phi^j = 0, \tag{4}$$

де  $P_j = z\Phi_j + \Psi_j$ , а  $\Phi_j, \Psi_j, j = \overline{1, 2}$  – гармонічні функції переміщень, які залежать тільки від двох координат.

Використавши переміщення (5) і закон Гука [11], знайдемо напруження

$$\begin{aligned} \sigma_r^j(r, z) &= 2G_j \left[ \frac{\partial^2 P_j}{\partial r^2} - 2\nu_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} \right], \quad \sigma_z^j = 2G_j \left[ \frac{\partial^2 P_j}{\partial z^2} - 2(2 - \nu_j) \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} \right], \\ \sigma_\phi^j &= 2G_j \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial P_j}{\partial r} - 2\nu_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} \right], \quad \tau_{rz}^j = 2G_j \left[ \frac{\partial^2 P_j}{\partial z \partial r} - 2(1 - \nu_j) \frac{\partial \Phi_j}{\partial r} \right], \quad \tau_{r\phi}^j = \tau_{z\phi}^j = 0, \end{aligned} \tag{5}$$

де  $G_j$  – модулі зсуву.

При задоволенні крайових умов потрібно із навантажень (1) виділити основний напружений стан, який відповідає заданим головним векторам сил і моментів [8, 11]. Це пов'язано з тим, що основний і самозрівноважений напружений стан мають різну фізичну природу [P20094R] і відповідно описуються різними функціями. При побудові загального виразу основного НДС у скінченному циліндрі використаємо працю [8]. Спочатку визначимо сили, прикладені до шарів на торцях циліндра

$$T_m^j = (-1)^m 2\pi \int_{R_{j-1}}^{R_j} r \sigma_m^j(r) dr, \quad m = \overline{1, 2}, \tag{6}$$

де індекс  $m$  відповідає торцям, а  $j$  – шарам циліндра. Нормальні  $T_m^j$  сили прикладені до середини відповідних торців циліндра, а їх напрямок співпадає з віссю  $Oz$ . Так як бічна поверхня вільна від навантажень, то сума проєкцій всіх зусиль на вісь  $Oz$ , рівна нулю

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 T_m^j = 0. \tag{7}$$

Згідно з [8] запишемо основний НДС: для внутрішнього  $r \leq R_1$

$$\begin{aligned} \sigma_z^{0,1} &= -\frac{T_1^1}{S_1} + \frac{T_2^1 + T_1^1}{2hS_1}(z+h), \quad \sigma_r^{0,1} = 0, \\ \sigma_\phi^{0,1} &= 0, \quad \tau_{rz}^{0,1} = -\frac{T_1^1 + T_2^1}{4hS_1}r, \end{aligned} \tag{8}$$

і зовнішнього  $R_1 \leq r \leq R_2$  шару



$$\begin{aligned} \sigma_z^{0,2} &= -\frac{T_1^2}{S_2} + \frac{T_2^2 + T_1^2}{2hS_2}(z+h), \quad \sigma_r^{0,2} = 0, \\ \sigma_\varphi^{0,2} &= 0, \quad \tau_{rz}^{0,2} = -\frac{T_1^2 + T_2^2}{4hS_2}r + \frac{A_2}{r}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $S_1 = \pi R_1^2$ ,  $S_2 = \pi(R_2^2 - R_1^2)$ ,  $A_2 = \frac{T_1^2 + T_2^2}{4hS_2}R_2^2$ , цифра 0 вверху відноситься до

компонентів тензора і напружень основного НДС. Відзначимо, що напруження (9) задовольняють крайові умови (2).

Із узагальненого закону Гука після інтегрування і перетворень знайдемо переміщення в шарах

$$\begin{aligned} u_z^{0,j} &= -\frac{T_1^j}{E_j S_j} z + \frac{T_2^j + T_1^j}{4hS_1 E_1} (z^2 - r^2 + 2hz) + \delta_j^2 \frac{A_j}{G_j} \ln r, \\ u_r^{0,j} &= \frac{\nu_j}{E_j} r \left[ \frac{T_1^j}{S_j} - \frac{T_2^j + T_1^j}{2hS_j} (z+h) \right], \quad j = \overline{1,2}, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\delta_j^2$  – символ Кронекера,  $G_j$  – модулі зсуву.

Після виділення напружень основного НДС (8), (9), до торців циліндра будуть прикладені самозрівноважені навантаження, які мають нульові головні вектори сил і моментів. Отже, самозрівноважений стан буде зникати при віддаленні від торців.

У працях [7, 11, 12] наведено алгоритм знаходження самозрівноваженого напруженого стану для суцільного і товстостінного циліндрів. Використавши цей алгоритм, виразимо самозрівноважений напружений стан кожного шару циліндра через три набори функцій переміщень, які відповідно відповідають за задоволення умов на торцях, зовнішній і внутрішній бічні поверхні шарів циліндра

$$\begin{aligned} \Phi_{j,N}(r, \gamma) &= \sum_{k=1}^N \mu_k^{-1} \{ R J_0(\mu_k \alpha) [a_k^j \exp(-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)) + a_{k+N}^j \exp(\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1))] + \\ &\quad + h [a_{k+2N}^j \sin(\mu_k \gamma) + a_{k+3N}^j \cos(\mu_k \gamma)] I_0(c\mu_k \alpha) + \\ &\quad + h [a_{k+4N}^j \sin(\mu_k \gamma) + a_{k+5N}^j \cos(\mu_k \gamma)] K_0(c\mu_k \alpha) \}, \\ \Psi_{j,N}(r, \gamma) &= \sum_{k=1}^N \mu_k^{-1} \{ h R J_0(\mu_k \alpha) [b_k^j \exp(-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)) + b_{k+N}^j \exp(\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1))] + \\ &\quad + h^2 [b_{k+2N}^j \sin(\mu_k \gamma) + b_{k+3N}^j \cos(\mu_k \gamma)] I_0(c\mu_k \alpha) + \\ &\quad + h^2 [b_{k+4N}^j \sin(\mu_k \gamma) + b_{k+5N}^j \cos(\mu_k \gamma)] K_0(c\mu_k \alpha) \}, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $N$  – довільне натуральне число,  $\gamma = z/h$ ,  $\gamma \in [-1, 1]$ ,  $\alpha = r/R$ ,  $\alpha \in [0, 1]$  – безрозмірні змінні;  $\mu_k = k\pi d_1$ ,  $d_1 < 0,4$ ;  $a_k^j$ ,  $b_k^j$  – невідомі коефіцієнти,  $c = R/h$ ,  $J_n(r)$ ,  $I_n(r)$ ,  $K_n(r)$  – функції Бесселя і Макдональда [13]. Тут і надалі  $a_k^1 = 0$ ,  $b_k^1 = 0$ , якщо  $k > 4N$ .

Використаємо подання функцій переміщень (11) і співвідношення (4) та знайдемо явний вираз переміщень у вигляді суми рядів:

$$\begin{aligned} u_r^j &= h \sum_{k=1}^N \{ -J_1(\mu_k \alpha) \exp(-\frac{\mu_k}{c}) [(a_k^j \gamma + b_k^j) \exp(-\frac{\mu_k}{c} \gamma) + (a_{k+N}^j \gamma + b_{k+N}^j) \times \\ &\quad \times \exp(\frac{\mu_k}{c} \gamma)] + [(a_{k+2N}^j \gamma + b_{k+2N}^j) \sin(\mu_k \gamma) + (a_{k+3N}^j \gamma + b_{k+3N}^j) \cos(\mu_k \gamma)] I_1(c\mu_k \alpha) - \\ &\quad - [(a_{k+4N}^j \gamma + b_{k+4N}^j) \sin(\mu_k \gamma) + (a_{k+5N}^j \gamma + b_{k+5N}^j) \cos(\mu_k \gamma)] K_1(c\mu_k \alpha) \}, \\ u_z^j &= h \sum_{k=1}^N \{ [-\gamma + (3-4\nu_j) c \mu_k^{-1}] a_k^j - b_k^j \} \exp(-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)) + \\ &\quad + \{ [\gamma - (3-4\nu_j) c \mu_k^{-1}] a_{k+N}^j \gamma + b_{k+N}^j \} \exp(\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1)) \} J_0(\mu_k \alpha) + \end{aligned} \quad (12)$$



$$+ [a_{k+2N}^j \eta_1^j(\mu_k, \gamma) + b_{k+2N}^j \cos(\mu_k \gamma) + a_{k+3N}^j \eta_2^j(\mu_k, \gamma) - b_{k+3N}^j \sin(\mu_k \gamma)] I_0(c\mu_k \gamma) + \\ + [a_{k+4N}^j \eta_1^j(\mu_k, \gamma) + b_{k+4N}^j \cos(\mu_k \gamma) + a_{k+5N}^j \eta_2^j(\mu_k, \gamma) - b_{k+5N}^j \sin(\mu_k \gamma)] K_0(c\mu_k \gamma)\},$$

де

$$\eta_1^j(\mu_k, \gamma) = \gamma \cos(\mu_k \gamma) - (3 - 4\nu_j) \mu_k^{-1} \sin(\mu_k \gamma),$$

$$\eta_2^j(\mu_k, \gamma) = -\gamma \sin(\mu_k \gamma) - (3 - 4\nu_j) \mu_k^{-1} \cos(\mu_k \gamma).$$

Підставимо функції (11) у співвідношення (5) та знайдемо компоненти тензора напружень у вигляді таких сум рядів:

$$\begin{aligned} \sigma_r^j &= 2G_j \sum_{k=1}^N \left\{ -hJ_1'(\mu_k \alpha) \left[ \exp\left(-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)\right) b_k^j + \exp\left(\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1)\right) b_{k+N}^j \right] + \right. \\ &+ U_{1,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_k^j + U_{1,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+N}^j + [b_{k+2N}^j \sin(\mu_k \gamma) + b_{k+3N}^j \cos(\mu_k \gamma)] \times \\ &\times hI_1'(c\mu_k \alpha) + U_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+2N}^j + U_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+3N}^j - [\sin(\mu_k \gamma) b_{k+4N}^j + \\ &+ \cos(\mu_k \gamma) b_{k+5N}^j] hK_1'(c\mu_k \alpha) + U_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+4N}^j + U_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+5N}^j \left. \right\}, \\ \sigma_\varphi^j(r, \gamma) &= 2G_j \sum_{k=1}^N \left\{ F_{1,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_k^j + F_{1,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+N}^j - \frac{1}{c\alpha} J_1(\mu_k \alpha) [b_k^j \times \right. \\ &\times \exp\left(-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)\right) + b_{k+N}^j \left. \right\} \exp\left(\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1)\right) + \frac{1}{c\alpha} I_1(c\mu_k \alpha) [\sin(\mu_k \gamma) b_{k+2N}^j + \\ &+ \cos(\mu_k \gamma) b_{k+3N}^j] + F_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+2N}^j + F_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+3N}^j + F_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+5N}^j + \\ &+ F_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+4N}^j - \frac{1}{c\alpha} K_1(c\mu_k \alpha) [\sin(\mu_k \gamma) b_{k+4N}^j + \cos(\mu_k \gamma) b_{k+5N}^j], \\ \sigma_z^j &= 2G_j \sum_{k=1}^N \left\{ S_{1,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_k^j + \frac{h\mu_k}{R} \left\{ \exp\left[-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)\right] b_k^j + \exp\left[\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1)\right] b_{k+N}^j \right\} \times \right. \\ &\times J_0(\mu_k \alpha) + S_{1,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+N}^j + S_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+2N}^j + S_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+3N}^j - \\ &- \mu_k [\sin(\mu_k \gamma) b_{k+2N}^j + \cos(\mu_k \gamma) b_{k+3N}^j] \left. \right\} I_0(c\mu_k \alpha) + S_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+4N}^j + \\ &+ S_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+5N}^j - \mu_k [\sin(\mu_k \gamma) b_{k+4N}^j + \cos(\mu_k \gamma) b_{k+5N}^j] K_0(c\mu_k \alpha) \left. \right\}, \\ \tau_{rz}^j &= 2G_j \sum_{k=1}^N \left\{ T_{1,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_k^j + T_{1,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+N}^j + \frac{h}{R} \mu_k [b_k^j \exp\left(-\frac{\mu_k}{c}(\gamma+1)\right) - \right. \\ &- b_{k+N}^j \exp\left(\frac{\mu_k}{c}(\gamma-1)\right)] J_1(\mu_k \alpha) + \mu_k [\cos(\mu_k \gamma) b_{k+2N}^j - \sin(\mu_k \gamma) b_{k+3N}^j] I_1(c\mu_k \alpha) + \\ &+ T_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+2N}^j + T_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+3N}^j + T_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+4N}^j + \\ &+ T_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) a_{k+5N}^j + \mu_k [\sin(\mu_k \gamma) b_{k+5N}^j - \cos(\mu_k \gamma) b_{k+4N}^j] K_1(c\mu_k \alpha), \end{aligned} \quad (13)$$

де

$$U_{1,m}^j(\mu_k, \alpha) = [-h\gamma J_1'(\mu_k \alpha) + (-1)^m 2\nu_j J_0(\mu_k \alpha)] \exp\left[\frac{\mu_k}{c}((-1)^m \gamma - 1)\right], \quad m = \overline{1, 2},$$

$$U_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = h\gamma I_1'(c\mu_k \alpha) \sin(\mu_k \gamma) - 2\nu_j I_0(c\mu_k \alpha) \cos(\mu_k \gamma),$$

$$U_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = h\gamma I_1'(c\mu_k \alpha) \cos(\mu_k \gamma) + 2\nu_j I_0(c\mu_k \alpha) \sin(\mu_k \gamma),$$

$$U_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = -h\gamma K_1'(c\mu_k \alpha) \sin(\mu_k \gamma) - 2\nu_j K_0(c\mu_k \alpha) \cos(\mu_k \gamma),$$

$$U_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = -h\gamma K_1'(c\mu_k \alpha) \cos(\mu_k \gamma) + 2\nu_j K_0(c\mu_k \alpha) \sin(\mu_k \gamma),$$

$$F_{1,m}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = [ -(-1)^m 2\nu_j J_0(\mu_k \alpha) - \frac{\gamma}{c\alpha} J_1(\mu_k \alpha) ] \exp\left(\frac{\mu_k}{c}((-1)^m \gamma - 1)\right), \quad m = \overline{1, 2},$$

$$F_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = \frac{\gamma}{c\alpha} \sin(\mu_k \gamma) I_1(c\mu_k \alpha) - 2\nu_j \cos(\mu_k \gamma) I_0(c\mu_k \alpha),$$

$$\begin{aligned}
 F_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \frac{\gamma}{c\alpha} \cos(\mu_k \gamma) I_1(c\mu_k \alpha) + 2v_j \sin(\mu_k \gamma) I_0(c\mu_k \alpha), \\
 F_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= -\left[ \frac{\gamma}{c\alpha} \sin(\mu_k \gamma) K_1(c\mu_k \alpha) + 2v_j \cos(\mu_k \gamma) K_0(c\mu_k \alpha) \right], \\
 F_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \left[ -\frac{\gamma}{c\alpha} \cos(\mu_k \gamma) K_1(c\mu_k \alpha) + 2v_j \sin(\mu_k \gamma) K_0(c\mu_k \alpha) \right], \\
 S_{1,m}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \left[ \frac{h\mu_k}{R} \gamma - 2(-1)^m (1 - v_j) \right] \exp\left[ \frac{\mu_k}{c} ((-1)^m \gamma - 1) \right] J_0(\mu_k \alpha), \quad m = \overline{1, 2}, \\
 S_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \varphi_1^j(\mu_k, \gamma) I_0(c\mu_k \alpha), \quad S_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = \varphi_2^j(\mu_k, \gamma) I_0(c\mu_k \alpha), \\
 S_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \varphi_1^j(\mu_k, \gamma) K_0(c\mu_k \alpha), \quad S_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = \varphi_2^j(\mu_k, \gamma) K_0(c\mu_k \alpha), \\
 \varphi_1^j(\mu_k, \gamma) &= -\mu_k \gamma \sin(\mu_k \gamma) - 2(1 - v_j) \cos(\mu_k \gamma), \\
 \varphi_2^j(\mu_k, \gamma) &= 2(1 - v_j) \sin(\mu_k \gamma) - \mu_k \gamma \cos(\mu_k \gamma), \\
 T_{1,m}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \left[ (1 - v_j) - (-1)^m \frac{h\mu_k}{R} \gamma \right] \exp\left[ \frac{\mu_k}{c} ((-1)^m \gamma - 1) \right] J_1(\mu_k \alpha), \quad m = \overline{1, 2}, \\
 T_{2,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= \psi_1^j(\mu_k, \gamma) I_1(c\mu_k \alpha), \quad T_{2,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = \psi_2^j(\mu_k, \gamma) I_1(c\mu_k \alpha), \\
 T_{3,1}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) &= -\psi_1^j(\mu_k, \gamma) K_1(c\mu_k \alpha), \quad T_{3,2}^j(\mu_k, \alpha, \gamma) = -\psi_2^j(\mu_k, \gamma) I_1(c\mu_k \alpha), \\
 \psi_1^j(\mu_k, \gamma) &= \mu_k \gamma \cos(\mu_k \gamma) + (2v_j - 1) \sin(\mu_k \gamma), \\
 \psi_2^j(\mu_k, \gamma) &= (2v_j - 1) \cos(\mu_k \gamma) - \mu_k \gamma \sin(\mu_k \gamma).
 \end{aligned}$$

Тут і надалі штрих вверху позначає похідну по  $r$ .

Підставимо компоненти вектора переміщень (12) і тензора напруження (13) в крайові умови (1)–(3) та після математичних перетворень одержимо систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=1}^M c_k A_{m,k}(\alpha) &= P_m(\alpha), \quad m = \overline{1, 4}, \quad \alpha \in [0, 1], \\
 \sum_{k=1}^M c_k A_{m,k}(\gamma) &= P_m(\gamma), \quad m = \overline{5, 10}, \quad \gamma \in [-1, 1],
 \end{aligned} \tag{14}$$

де

$$\begin{aligned}
 M &= 20N, \quad c_k = a_k^1, \quad c_{k+4N} = b_k^1, \quad k = \overline{1, 4N}, \quad c_{k+8N} = a_k^2, \quad c_{k+14N} = b_k^2, \quad k = \overline{1, 6N}, \\
 P_{2m-1}(\alpha) &= \frac{\sigma_m^1(R_2\alpha)}{2G_1}, \quad P_{2m}(\alpha) = \frac{\tau_m^1(R_2\alpha)}{2G_1}, \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{R_1}{R_2}, \quad P_{2m-1}(\alpha) = \frac{\sigma_m^2(R_2\alpha)}{2G_2}, \\
 P_{2m}(\alpha) &= \frac{\tau_m^2(R_2\alpha)}{2G_2}, \quad \frac{R_1}{R_2} \leq \alpha \leq 1, \quad m = \overline{1, 2}, \quad P_m(\gamma) = 0, \quad m = \overline{5, 10}.
 \end{aligned}$$

Значення функцій  $A_{m,k}$  легко визначається із умов (1)–(3).

**Зведення проблеми розв'язку системи рівнянь (14) до пошуку мінімуму узагальненої квадратичної форми.** Виражені через функції  $\Phi_{j,N}$ ,  $\Psi_{j,N}$  переміщення (4) і напруження (5) точно задовольняють співвідношення вісесиметричної теорії пружності. Для оцінки похибки наближеного розв'язку скінченної системи рівнянь (14), яка описує крайові умови на бічній поверхні і умови контакту шарів, запишемо нев'язки для заданого  $N > 1$

$$|f_{m,N}(\alpha) - P_m(\alpha)|, \quad m = \overline{1, 4}, \quad |f_{m,N}(\gamma) - P_m(\gamma)|, \quad m = \overline{5, 10}, \tag{15}$$

де  $f_{m,N}(\alpha) = \sum_{k=1}^M c_k A_{m,k}(\alpha)$ ,  $m = \overline{1, 4}$ ;  $f_{m,N}(\gamma) = \sum_{k=1}^M c_k A_{m,k}(\gamma)$ ,  $m = \overline{5, 10}$ . У працях [7, 8, 11]

розроблено метод, використання якого дозволяє одночасно мінімізувати всі нев'язки (15).

Використаємо його і зведемо процес числового задоволення умов (14) до пошуку мінімуму такої узагальненої квадратичної форми:

$$\begin{aligned} \Omega_N \{c_1, \dots, c_M\} &= \sum_{m=1}^4 \|f_{m,N}(\alpha) - P_m(\alpha)\|^2 + \sum_{m=5}^{10} \|f_{m,N}(\gamma) - P_m(\gamma)\|^2 = \\ &= \sum_{k,j=1}^M c_k c_j W_{kj} - 2 \sum_{k=1}^M c_k V_k + P^2, \end{aligned} \quad (16)$$

де норму в  $L_2$  позначатимемо  $\|f(\gamma)\| = \sqrt{\int_{-1}^1 f^2(\gamma) d\gamma}$ , або  $\|f(\alpha)\| = \sqrt{\int_0^1 \alpha f^2(\alpha) d\alpha}$ ;

$$W_{kj} = \int_0^1 \alpha \sum_{m=1}^4 A_{m,k}(\alpha) A_{m,j}(\alpha) d\alpha + \int_{-1}^1 \sum_{m=5}^{10} A_{m,k}(\gamma) A_{m,j}(\gamma) d\gamma, \quad W_{kj} = W_{jk};$$

$$V_k = \sum_{m=1}^4 \int_{-1}^1 \alpha A_{m,k}(\alpha) P_m(\alpha) d\alpha, \quad k, j = \overline{1, M}; \quad P^2 = \sum_{m=1}^4 \int_{-1}^1 \alpha P_m(\alpha)^2 d\alpha.$$

Там же запропонована методика аналітичного обчислення інтегралів  $W_{kj}$ ,  $V_k$ , які визначають коефіцієнти узагальненої квадратичної форми, що дозволяє знайти значення невідомих змінних  $c_k$  з високою точністю і підвищити швидкодію методу.

За своїм означенням узагальнена квадратична форма (16) є невід'ємна. Її мінімум позначимо  $F(N)$ , а змінні, на яких він досягається –  $c_k^N$ . Із умови мінімуму квадратичної форми одержимо систему лінійних рівнянь:

$$\sum_{k=1}^M c_k^N W_{kj} = V_j, \quad j = \overline{1, M}. \quad (17)$$

Із рівнянь (17) обчислимо змінні  $c_k^N$ ,  $k = \overline{1, M}$ , визначимо коефіцієнти  $a_k^j$ ,  $b_k^j$  і знайдемо шукані функції переміщень  $\Phi_{j,N}$ ,  $\Psi_{j,N}$ , через які виразимо компоненти вектора переміщень і тензора напружень у двошаровому циліндрі.

**Встановлення умов збіжності наближеного розв'язку.** Покажемо, що для побудованих функцій  $\Phi_{j,N}$ ,  $\Psi_{j,N}$  і знайденого мінімуму квадратичної форми (16) вірні наступні твердження:

**Лема.** Функція  $F(N)$  є невід'ємна і не зростає.

Доведення леми подібне, як в [11].

**Теорема.** Якщо для довільного  $\varepsilon > 0$  існує  $N$ , таке, що  $F(N) < \frac{\varepsilon^2}{4}$ , то існують межі послідовностей

$$\Phi_j = \lim_{N \rightarrow \infty} \Phi_{j,N}, \quad \Psi_j = \lim_{N \rightarrow \infty} \Psi_{j,N}, \quad j = \overline{1, 2},$$

а знайдені переміщення та напруження точно задовольняють крайові умови (1)–(3) у метриці  $L_2$ .

Відзначимо, що квадратична форма (16) вибрана таким чином, що для її мінімуму  $F(N)$  і знайдених невідомих коефіцієнтів  $c_k^N$  буде виконуватись рівність

$$F(N) = \sum_{m=1}^4 \int_0^1 [f_{m,N}(\alpha) - P_m(\alpha)]^2 \alpha d\alpha + \sum_{m=5}^{10} \int_{-1}^1 [f_{m,N}(\gamma) - P_m(\gamma)]^2 d\gamma. \quad (18)$$

**Доведення.** Розглянемо послідовність малих додатних чисел  $\varepsilon_N$ , яка збігається до нуля. Згідно з умовою теореми ця послідовність існує і їй відповідає послідовність натуральних чисел  $N \rightarrow \infty$ . Відповідно з лемою і умовою теореми для довільного  $\varepsilon > 0$  існує таке  $N$  і  $\varepsilon_N < \varepsilon$ , що виконується

$$F(N+k) \leq F(N) < \frac{\varepsilon_N^2}{4}$$

для будь-якого натурального  $k$ , а отже, якщо спрямувати  $\varepsilon \rightarrow 0$ , то одержимо в границі

$$\lim_{N \rightarrow \infty} F(N) = 0.$$

Покажемо, що при зменшенні  $\varepsilon_N$ ,  $\varepsilon \geq \varepsilon_N \geq 0$  і відповідно збільшенні  $N$ , переміщення і напруження побудовані з використанням коефіцієнтів  $c_k^N$  і функцій (11) задовольнятимуть умови (14) з заданою похибкою  $\varepsilon$  у метриці простору  $L_2$ . Дійсно, з умови (18) і нерівності трикутника слідує, що послідовності функцій  $f_{m,N}(\gamma) \in$  фундаментальними, оскільки

$$\|f_{m,j} - f_{m,k}\| \leq \|f_{m,j} - P_m\| + \|f_{m,k} - P_m\| \leq 2\sqrt{F(N)} < \varepsilon_N < \varepsilon, \quad m = \overline{1,10}$$

для будь-яких  $k, j \geq N$ . Отже, існують границі функцій  $f_{m,N}(\alpha)$ ,  $f_{m,N}(\gamma)$ , які позначимо

$$f_m(\alpha) = \lim_{N \rightarrow \infty} f_{m,N}(\alpha), \quad m = \overline{1,4}, \quad f_m(\gamma) = \lim_{N \rightarrow \infty} f_{m,N}(\gamma), \quad m = \overline{5,10}.$$

Крайові умови (14) також задовольняються із заданою похибкою  $\varepsilon_N > 0$  у метриці  $L_2$ , оскільки згідно з (18) одержимо наступні оцінки

$$\|f_{m,N}^n - P_m^n\| \leq \sqrt{F(N)} < \varepsilon_N/2, \quad m = \overline{1,10}. \quad (19)$$

Спрямуємо в нерівностях (19)  $\varepsilon_N \rightarrow 0$ , і в границі одержимо, що функції  $f_m^n(\gamma)$  точно задовольняють крайові умови (14) у метриці простору  $L_2$ . Отже, маємо

$$\|f_m^n - P_m^n\| = 0, \quad m = \overline{1,10}. \quad (20)$$

Ми показали, що у випадку виконання умов теореми, напруження які визначають функції

$$\Phi_j = \lim_{N \rightarrow \infty} \Phi_{j,N}, \quad \Psi_j = \lim_{N \rightarrow \infty} \Psi_{j,N}, \quad j = \overline{1,2}$$

точно задовольняють всі рівняння і співвідношення вісесиметричної теорії пружності та умови (14) у метриці  $L_2$ . Умови (14) повністю еквівалентні крайовим умовам (1)–(3). Кінець доведення.

Відзначимо, що у випадку коли функції  $P_m(\gamma)$  будуть неперервними, то умови (20) будуть задовольнятися у нормі простору  $C[0,1]$  або  $C[-1,1]$ .

**Висновки.** Обґрунтовано новий аналітично-числовий метод розрахунку НДС скінченного двошарового циліндра. Встановлено, що напружено-деформований стан двошарового циліндра з навантаженими торцями розділяється на основний напружений стан, який відповідає заданим головним векторам сил прикладеним на торцях, і самозрівноважений стан. Самозрівноважений стан описується трьома наборами базових функцій, які зникають при віддаленні від торців або бічної поверхні циліндра. Розроблена методика апроксимації умов ідеального контакту прилеглих шарів і крайових умов скінченною кількістю базових функцій. Знаходження вісесиметричного напруженого стану циліндра зведено до розв'язання скінченної системи одновимірних рівнянь. Дослідження розв'язку одержаних систем рівнянь зведено до знаходження мінімуму узагальненої квадратичної форми, коефіцієнти якої виражаються через тригонометричні і бesselеві функції. Вперше встановлено, що числове значення мінімуму узагальненої квадратичної форми визначає збіжність розв'язку і дає оцінку похибки задоволення всіх крайових умов на поверхні двошарового циліндра і умов ідеального контакту.

1. Tam J.Q., Wang, Y.M. Laminated composite tubes under extension, torsion, bending, shearing and pressuring: a state space approach // Int. J. Solids Struct. – 2001. – 38. – P. 9053-9075.
2. Tsukrov I., Drach B. Elastic deformation of composite cylinders with cylindrically orthotropic layers // Int. J. Solids Struct. – 2010. – 47. – P. 25-33.
3. Саврук М.П., Онишко Л.Й., Сенюк М.М.. Плоска динамічна осесиметрична задача для порожнистого циліндра // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Там же. – 2008. – 44, № 1. – С. 7-14.
4. Yin X. C., Yue Z. Q. Transient plane-strain response of multilayered elastic cylinders to axisymmetric impulse // J. Appl. Mech. – 2002. – 69, № 6. – P. 825-835.

5. Liu S., Soldatos K.P. Extension of a new approach towards accurate stress analysis of laminates subjected to thermomechanical loading // J. Eng. Math. – 2008. – 61. – P. 185-200.
6. Soldatos K. P. General solutions for the statics of anisotropic, transversely inhomogeneous elastic plates in terms of complex functions/ K. P. Soldatos // Math Mech Solids. – 2006. – 11. – P. 596-628.
7. Ревенко В.П. О решении трехмерных уравнений линейной теории упругости // Прикл. механика. – 2009. – 45, № 7. – С. 52-65.
8. Ревенко В.П. Дослідження напруженого стану навантаженого скінченного циліндра з використанням власних функцій // Прикл. проблеми мех. і мат. – 2009. – Вип. 7. – С. 183-190.
9. Улитко А.Ф. Метод собственных векторных функций в пространственных задачах теории упругости. – Киев: Наук. думка, 1979. – 261 с.
10. Robert M., Keer L.M. Stiffness of an elastic circular cylinder of finite length // J. Appl. Mech. – 1988. – 55, № 3. – P. 560-565.
11. Ревенко В.П. Знаходження напруженого стану вісесиметрично навантаженого на боковій поверхні циліндра // Вісник Дніпропетр. Ун-ту. Механіка. – 2009. – № 5. – Вип. 13, т. 2. – С. 158-166.
12. Ревенко В.П. Знаходження тривимірного тензора напружень у циліндричній системі координат і побудова власних функцій // Доп. НАН України – 2006. – 9. – С. 50-56.
13. Корн Г, Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М., 1974. – 831 с.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2014.

УДК 667.64:678.026

О.І. Редько

Луцький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТИЧНОГО ВМІСТУ НАПОВНЮВАЧІВ РІЗНОЇ ПРИРОДИ  
ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

*Досліджено вплив вмісту наповнювачів різної природи на експлуатаційні властивості епоксикомпозитів. Показано, що для підвищення когезійної міцності матеріалів у пластифікований зв'язувач необхідно вводити частки зольних мікросфер та карбіду кремнію з дисперсністю 63мкм. Встановлено оптимальний вміст зольних мікросфер 20-40мас.ч. і часток карбіду кремнію 50-60мас.ч., введення яких у епоксидний зв'язувач забезпечує збільшення модуля пружності при згині, руйнівного напруження при згині і ударної в'язкості матеріалів. Додатково показано, що для поліпшення когезійних властивостей композитів необхідно вводити у зв'язувач 5-15мас.ч. вспученого вермикуліта (10-20мкм).*

*Ключові слова:* епоксидна матриця, наповнювач, композит, властивості, міцність.

*Рис. 7. Табл. 2. Літ. 5.*

О.И. Редько

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ РАЗНОЙ  
ПРИРОДЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

*Исследовано влияние содержания наполнителей разной природы на эксплуатационные свойства эпоксикомпозитов. Показано, что для повышения когезионной прочности материалов в пластифицированное связующее необходимо вводить частицы зольных микросфер и карбида кремния с дисперсностью 63мкм. Установлено оптимальную концентрацию зольных микросфер 20-40мас.ч. и частиц карбида кремния 50-60мас.ч., введение которых в эпоксидное связующее обеспечивает увеличение модуля упругости при изгибе, разрушающего напряжения при изгибе и ударной вязкости материалов. Дополнительно показано, что для повышения когезионных свойств композитов необходимо вводить в связующее 5-15мас.ч. вспученого вермикулита (10-20мкм).*

*Ключевые слова:* эпоксидная матрица, наполнитель, композит, свойства, прочность.

O.I. Redko

**CRITICAL STUDY FILLER CONTENT OF DIFFERENT NATURE TO FORM A  
COATING WITH INCREASED OPERATIONAL PROPERTIES**

*The influence of the filler content on the performance of different nature epoxikompozitov properties . It is shown that to increase the cohesive strength of the materials in plasticized binder must enter ash microsphere particles and silicon carbide dispersion 63mkm. The optimum concentration of ash microspheres 20 40mas.ch. and silicon carbide particles 50 60mas.ch. introduction epoxy binder which provides increased flexural modulus, the flexural breaking stress, and the toughness of materials. Further shown that to increase the cohesive properties of the composites should be added to the binder 5-15mas.ch . exfoliated vermiculite (10-20mkm).*

*Keywords:* epoxy matrix filler composite properties, strength.

**Постановка проблеми.** Полімерні композитні матеріали (КМ) на основі епоксидних смол широко використовують для формування покриттів різного функціонального призначення у хімічній, нафтопереробній та харчовій промисловості. Їх застосування зумовлено комплексом переваг, порівняно з металами і металокompозитами, завдяки високій адгезійній і когезійній міцності, корозійній тривкості і стійкості до зміни температур [1-3]. Використання епоксидного зв'язувача і дисперсних наповнювачів відкриває широкі можливості для створення нових КМ і формування на їхній основі покриттів з високими експлуатаційними характеристиками. Особливістю полімеркомпозитних покриттів є формування у них неоднорідної структури внаслідок адсорбційної взаємодії матриці з наповнювачем та металевою основою. Різні швидкості фізико-хімічних процесів при формуванні КМ супроводжується виникненням залишкових напружень, які у більшості випадків корелюють з когезійною міцністю систем. Одним із способів поліпшення властивостей КМ є регулювання структуроутворення на межі поділу фаз, після введення дисперсних наповнювачів різної хімічної природи [2]. Водночас для отримання КМ з поліпшеною когезійною міцністю слід враховувати дисперсність і вміст введених у зв'язувач часток. Авторами [4] розвинуті і обгрунтовані уявлення про вплив наповнювачів на фізико-механічні властивості КМ, а також на їхню структуру при різних умовах її організації. Слід врахувати, що топологія і хімія поверхні часток мають важливе значення при регулюванні фізико-хімічної взаємодії на межі поділу фаз "полімер-наповнювач" і, відповідно, визначає когезійну міцність КМ при експлуатації. Авторами [5] обгрунтовано результати дослідження щодо впливу

хімічного складу наповнювача на залишкові напруження і руйнівне напруження при згині КМ. Зазначено важливість вибору наповнювачів різної фізичної природи з метою збільшення ступеня зшивання матриці, що поліпшує властивості КМ. Тому у подальшому важливим є дослідження впливу у комплексі фізичної природи, вмісту і дисперсності часток на когезійну міцність КМ, яка визначається такими основними критеріями як модуль пружності, руйнівне напруження при згині і ударна в'язкість.

**Метою роботи** є дослідження впливу дисперсних наповнювачів різної фізичної природи на модуль пружності, руйнівне напруження при згині і ударну в'язкість епоксидних КМ.

**Об'єктом дослідження** вибрано епоксидний олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78). Як пластифікатор використано дибутилфталат (ГОСТ 2102-72). Зв'язувач формували при такому вмісті інгредієнтів, мас.ч.: епоксидний олігомер ЕД-20 – 100, пластифікатор дибутилфталат – 8, твердник ПЕПА – 8. З метою з'ясування впливу фізичної природи і топології поверхні наповнювачів на властивості КМ використано грубодисперсні (63мкм) і дрібнодисперсні (10-20мкм) частки. Як грубодисперсні наповнювачі застосовували зольні мікросфери (ЗМ) (ТУ 5712-010-80338612-2008), частки коричневого шламу (КШ) і карбіду кремнію. Як дрібнодисперсні наповнювачі використовували частки вшпученого вермикуліта (ВВ), газової сажі (ГС) і оксиду хрому зеленого (ГОСТ 2912-79).

ЗМ є мінеральними відходами, що містяться у золі при спалюванні кам'яного вугілля на теплоелектростанціях. Перевагою їх використання є: низька густина, невеликі розміри, сферична форма, висока температура плавлення. Хімічний склад ЗМ наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Хімічний склад зольних мікросфер, %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Cl
55	27,0-31,0	4,6-5,5	3,2-3,7	1,1-1,8	1,3-1,7	0,1-1,1	0,05-1,00	< 0,1

КШ як доступний та активний наповнювач вводили з метою здешевлення композиції та збільшення адсорбційної взаємодії на межі фаз. КШ складається з суміші оксидів (мас.ч.): оксид заліза – 46-48, оксид алюмінію – 7-9, оксид кремнію – 12-14, оксид кальцію – 18-21, оксид магнію – 1-2, оксид титану – 4-7, оксид ванадію – 1,5-2,5, оксид олова – 0,9-1,6, оксид барію – 0,7-1,0, інші оксиди – до 100.

СВ є пористим матеріалом у вигляді чешуйчастих часток жовтого кольору, який отримують відпалом вермикулітового концентрата – гідрослюди, що містить між елементарними шарами зв'язану воду. Хімічний склад ВВ наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Хімічний склад спіненого вермикуліту, %

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Mn	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	pH(H <sub>2</sub> O)
33-36	5-17	0,2	6-18	14-25	1,2-2,0	3-5	0,06	0,5	0,4	6,8-7,0

КМ формували за такою технологією: дозування компонентів, суміщення пластифікатора та епоксидної смоли ЕД-20, термооброблення суміші протягом часу  $\tau=4,0\pm 0,1$  год при температурі  $T=393\pm 2$ К, суміщення часток і зв'язувача, введення твердника ПЕПА, затвердження композиції за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримка протягом 2-х год при температурі  $T=293\pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю 3град/хв до температури  $T=393\pm 2$ К, витримка протягом часу  $\tau=2,0\pm 0,05$  год, охолодження до температури  $T=293\pm 2$ К. Далі зразки витримували протягом часу  $\tau=60$  год на повітрі при температурі  $T=293\pm 2$ К з наступним проведенням випробувань.

Руйнівне напруження і модуль пружності КМ при згині визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина  $l = 120\pm 2$ мм, ширина  $b = 15\pm 0,5$ мм, висота  $h = \pm 0,510$ мм. Схему пристрою для дослідження руйнівного напруження і модуля пружності при згині КМ наведено на рис. 1. Ударну в'язкість досліджували, використовуючи маятниковий копер згідно з ГОСТ 4765-73. Шкала вимірюваного приладу відградуєвана так, що нуль знаходиться внизу, а максимальне значення відповідає висоті підйому маятника після руйнування зразка. При

відомому куті підйому шкала вимірювального приладу фіксує робочий кут проходження маятника після руйнування зразка, розміри якого становили  $60 \times 10 \times 8$  мм. Структуру зразків досліджували на оптичному мікроскопі "МБС-10" при збільшенні до 100 разів у відбитому світлі. Фрактографічні дослідження проведені методом електронної мікроскопії на рентгенівському мікроаналізаторі "Superprobe 733" фірми "Jeol" (Японія) у відбитих електронах, що дозволило виявити характер руйнування КМ, визначити топологію зерен і пор, а також провести якісний мікрорентгеноспектральний аналіз.

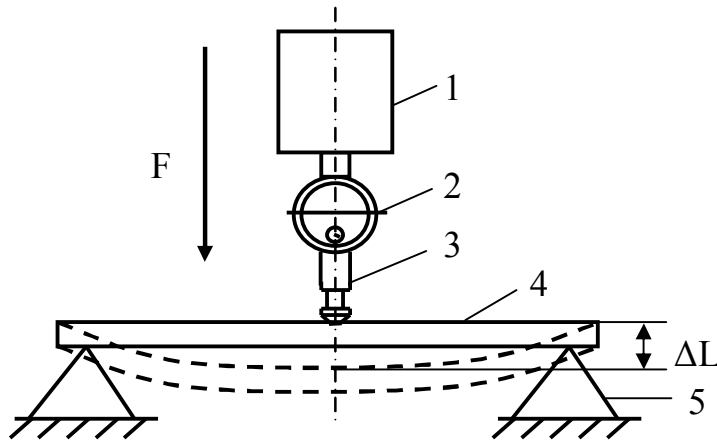


Рис. 1. Схема пристрою для дослідження руйнівного напруження і модуля пружності при згині КМ: 1 – несучий вантаж; 2 – індикатор; 3 – індентор; 4 – зразок; 5 – опора

На першому етапі досліджували вплив вмісту гребодисперсних часток (63 мкм): ЗМ, КШ і SiC на фізико-механічні властивості: модуль пружності, руйнівне напруження при згині і ударну в'язкість КМ. Встановлено, що модуль пружності при згині епоксидної матриці становить  $E=4,2$  ГПа (рис. 2). Введення часток забезпечує підвищення модуля пружності при згині КМ. Показано, що оптимальний вміст наповнювача ЗМ у КМ становить  $q=20-40$  мас.ч. (тут і далі за текстом мас.ч. наводяться на 100 мас.ч. епоксидного зв'язувача), а подальше збільшення його вмісту призводить до погіршення властивостей КМ. Введення часток ЗМ у зв'язувач забезпечує збільшення модуля пружності при згині з  $E=4,2$  ГПа до  $E=5,8-6,5$  ГПа. Результати дослідження руйнівного напруження при згині підтверджують достовірність отриманих результатів. Встановлено, що введення у зв'язувач часток ЗМ за оптимального вмісту ( $q=20-40$  мас.ч.) зумовлює підвищення руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{зг}=7,1$  МПа до  $\sigma_{зг}=15,2-18,1$  МПа (рис. 3). Збільшення вмісту часток у КМ до  $q=70-80$  мас.ч. спричиняє зменшення руйнівного напруження при згині КМ до  $\sigma_{зг}=13,8-14,2$  МПа.

Такий ефект пояснюють зміною швидкості структуроутворюючих процесів зшивання аморфних систем при полімеризації у присутності наповнювача. Введення наповнювача зумовлює різкий градієнт швидкості фізико-хімічних процесів у об'ємі матеріалу [2]. Відбувається локалізація макромолекул і надмолекулярних структур олігомера на поверхні часток, що підвищує ступінь зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах (ЗПШ). Зазначимо, що густина і ступінь зшивання матриці у ЗПШ залежать від активної площі поверхні часток. Під активною площею розуміємо ту площу поверхні часток, яка безпосередньо взаємодіє за рахунок адсорбційних, хімічних, фізичних процесів з макромолекулами зв'язувача. Недостатнє змочування часток (при відносно великому вмісті наповнювача у зв'язувачі) негативно впливає на міжфазову взаємодію у ЗПШ. В результаті у процесі фізико-хімічної взаємодії бере участь менша кількість активних центрів на поверхні наповнювача, що зумовлює погіршення фізико-механічних властивостей КМ [2-5].

Цікавими з наукової і практичної точки зору є результати дослідження ударної в'язкості КМ, наповнених ЗМ. Встановлено, що максимальні показники ударної в'язкості спостерігали при вмісті ЗМ  $q=10-20$  мас.ч. (рис. 4). Введення часток при такому вмісті забезпечує підвищення ударної в'язкості з  $a=3,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $a=4,3-4,4$  кДж/м<sup>2</sup>. Підвищення вмісту дисперсних часток призводить до зменшення показників ударної в'язкості до  $a=3,6$  кДж/м<sup>2</sup>. Відмінність кореляції між критичним вмістом наповнювача ЗМ для формування КМ з високими показниками ударної в'язкості ( $q=10-20$  мас.ч.) і руйнівним напруженням та модулем пружності при згині ( $q=20-40$  мас.ч.) можна пояснити таким чином. Когеційна міцність КМ, а, отже, і їх модуль пружності та руйнівне напруження при згині визначаються перебігом процесів міжфазової взаємодії у ЗПШ при формуванні матеріалів. Введення наповнювача призводить до кінетичної і термодинамічної не-



врівноваженості системи внаслідок утворення хімічних і фізичних зв'язків на межі поділу фаз "полімер-наповнювач". Виникають залишкові напруження як у самій матриці, так і у ЗПШ. Підтвердженням цьому є результати дослідження структури КМ методами оптичної та електронної мікроскопії. Показано, що зразки матриці у місці зламу мають яскраво визначену вигнуту форму (рис. 5,а). На отриманих методом електронної мікроскопії світлинах, які ілюструють поверхню зламу зразків матриці (рис. 6,а), спостерігали лінії сколювання (показано стрілками). Це свідчить про формування у матриці неуврівноваженого стану, який зумовлений наявністю надмолекулярних утворень у матриці, причому їх розподіл у одиниці об'єму є нерівномірним.

Введення часток ЗМ також зумовлює формування неуврівноваженого стану системи. Про це свідчить форма зразків після руйнування, які є також вигнутими, хоча не так суттєво, як зразки з матриці (рис. 5,б). Методом електронної мікроскопії показано, що введення ЗМ при оптимальному вмісті ( $q=20-40$ мас.ч.) спричиняє формування структури КМ з рівномірним розподілом наповнювача у системі (рис. 6,б). Це опосередковано свідчить про перехід значної кількості полімера у стан ЗПШ, внаслідок чого максимально зростають когезійні властивості а, отже, і руйнівне напруження та модуль пружності при згині КМ. Зазначимо, що когезійна міцність визначається міцністю зчеплення полімера до поверхні часток у ЗПШ.

Максимальну ударну в'язкість у КМ, які містять ЗМ, спостерігали при вмісті часток  $q=10-20$ мас.ч. з тої причини, що міцність при ударі визначається міцністю самої частки, матеріалу у стані ЗПШ і полімера у об'ємі. Очевидним є те, що при збільшенні вмісту часток до  $q=20-40$ мас.ч. значний імпульс сили удару зумовлює руйнування часток ЗМ, що спричиняє зменшення показників ударної в'язкості КМ.

Результати дослідження КМ, наповнених КШ і SiC, свідчать про кореляцію залежностей фізико-механічних властивостей від вмісту у матеріалах дисперсних часток. Встановлено, що найвищими показниками модуля пружності, руйнівного напруження при згині і ударної в'язкості відзначаються КМ при вмісті часток  $q=50-60$ мас.ч. (рис. 2-4). Це свідчить про суттєвий вплив як хімічної активності, так і їх твердості часток на показники когезійної міцності і ударної в'язкості КМ. При цьому доведено, що вищими, порівняно з КМ, наповненим КШ, показниками фізико-механічних характеристик відзначаються матеріали, які містять частки карбіду кремнію. Введення часток SiC за оптимального вмісту ( $q=50-60$ мас.ч) у зв'язувач забезпечує підвищення модуля пружності при згині з  $E=4,2$ ГПа (для пластифікованої епоксидної матриці) до  $E=6,2-6,3$ ГПа, руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{зг}=7,1$ МПа до  $\sigma_{зг}=18,6-20,2$ МПа і ударної в'язкості з  $a=3,4$ кДж/м<sup>2</sup> до  $a=4,7-5,0$ кДж/м<sup>2</sup>.

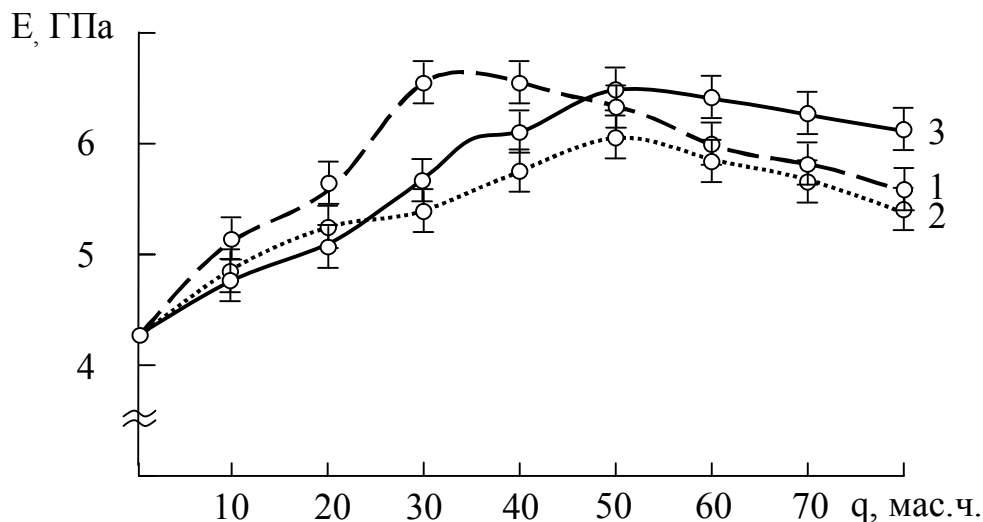


Рис. 2. Залежність модуля пружності при згині від вмісту дисперсного наповнювача (63мкм):  
1 – ЗМ;  
2 – КШ;  
3 – SiC

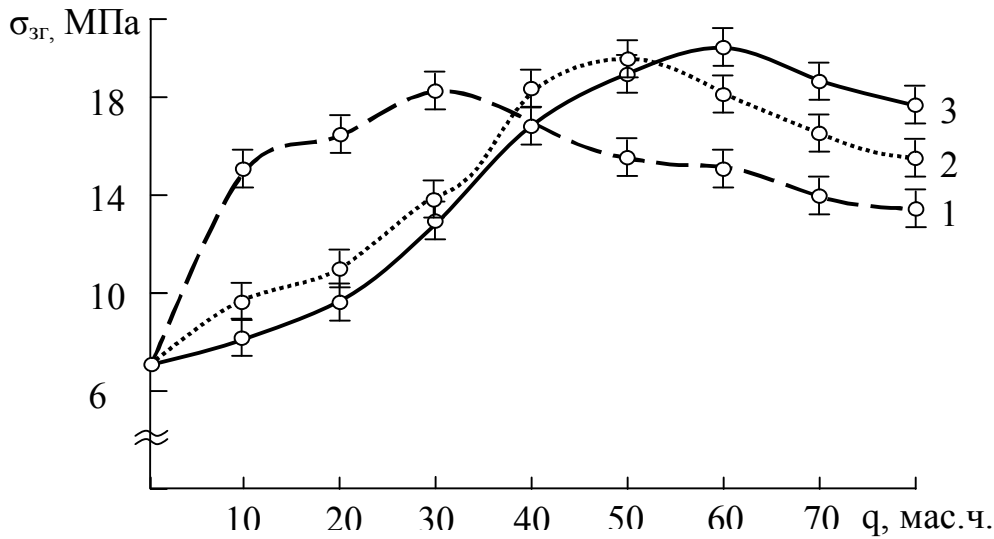


Рис. 3. Залежність руйнівного напруження при згині від вмісту дисперсного наповнювача (63мкм):  
1 – 3М;  
2 – КШ;  
3 – SiC

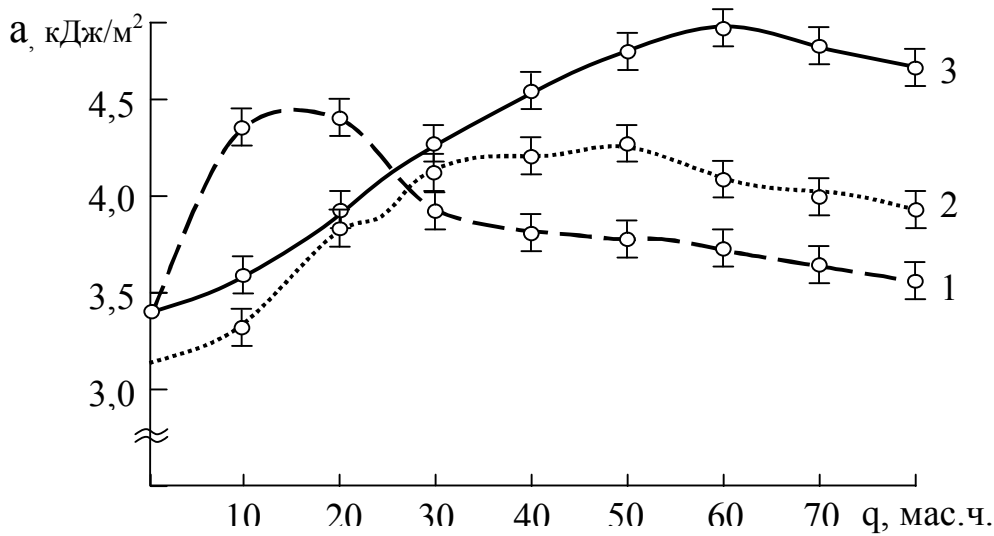


Рис. 4. Залежність ударної в'язкості від вмісту дисперсного наповнювача (63мкм):  
1 – 3М;  
2 – КШ;  
3 – SiC

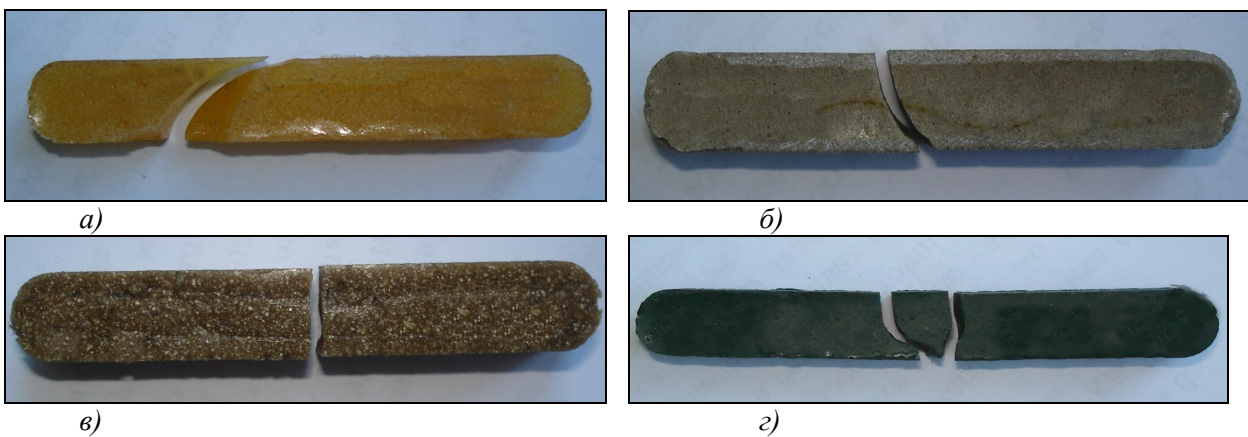


Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків після дослідження на руйнівне напруження при згині:  
а) епоксидна матриця; б) 3М; в) SiC; з) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

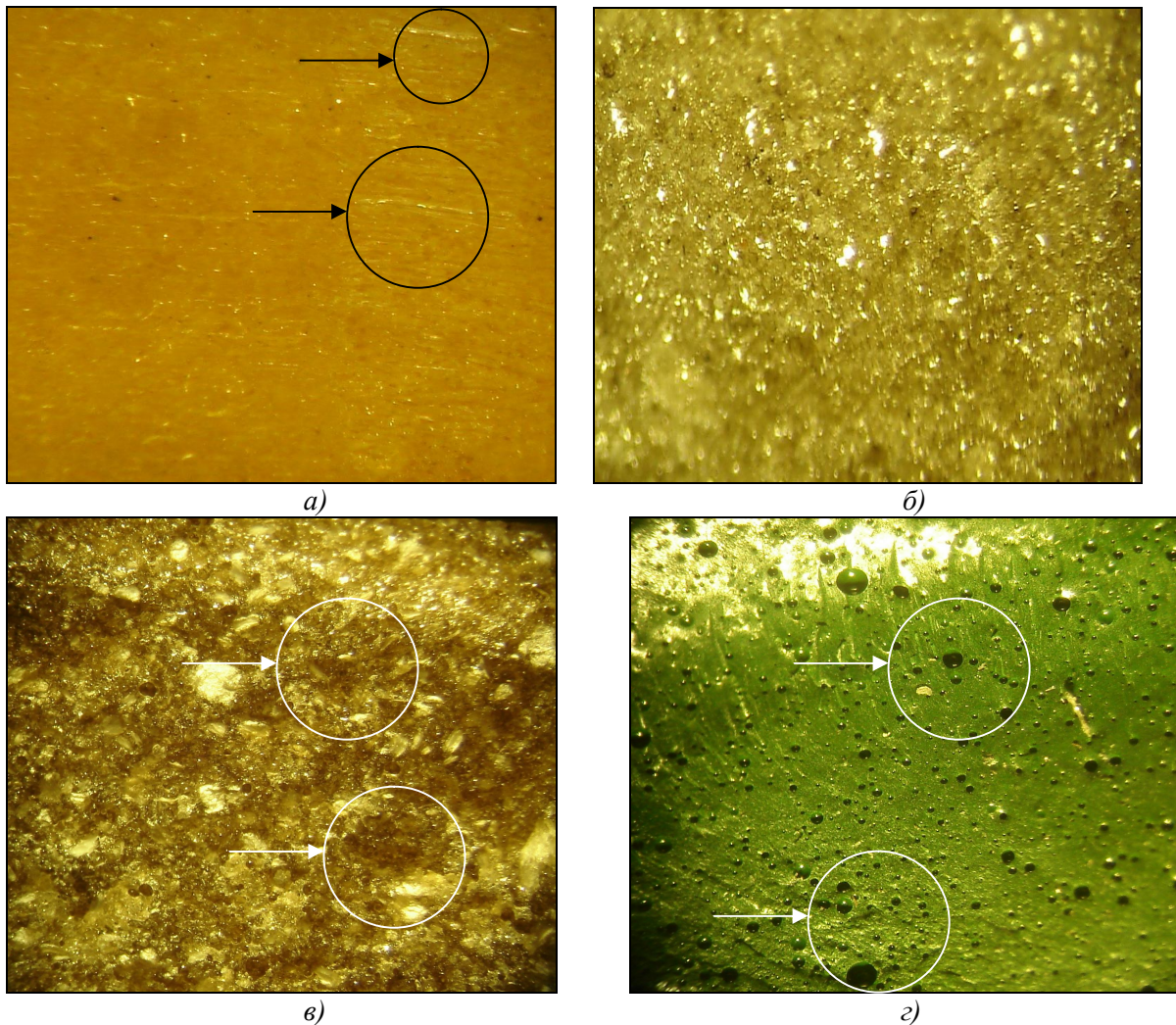


Рис. 6. Електронні світлини зламу КМ, які містять частки ( $\times 300$ ): а) епоксидна матриця; б) ЗМ; в) СВ; з)  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

На наступному етапі досліджували вплив вмісту дрібнодисперсних часток (10-20мкм): СВ, ГС і  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  на фізико-механічні властивості КМ. Експериментально встановлено, що найліпшими фізико-механічними властивостями відзначаються композити наповнені частками СВ (рис. 7). Введення спіненого вермикуліту за оптимального вмісту  $q=5-15\text{мас.ч.}$  забезпечує збільшення показників модуля пружності при згині КМ з  $E=4,2\text{ГПа}$  (для пластифікованої епоксидної матриці) до  $E=6,2-6,3\text{ГПа}$ , руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{зг}=7,1\text{МПа}$  до  $\sigma_{зг}=15,6-16,1\text{МПа}$  і ударної в'язкості з  $a=3,4\text{кДж/м}^2$  до  $a=4,1-4,2\text{кДж/м}^2$ . Можна стверджувати, що введення СВ при критичному вмісті приводить до формування КМ з високим показниками когезійних характеристик. Результатами дослідження КМ, наповнених СВ, методом оптичної мікроскопії підтверджено, що руйнування відбувається по прямій, розміщеній перпендикулярно до напрямку осі (рис. 5,в). Крім того, методом електронної мікроскопії (рис. 6,в) на поверхні зламу зразків встановлено існування незначних кратерів (показано стрілками). Це свідчить про те, що руйнування відбувається не на межі поділу фаз, а у об'ємі полімера, який не знаходиться у стані ЗПШ. Виходячи з цього можна стверджувати, що СВ є хімічно активним наповнювачем, введення якого у зв'язувач при незначному вмісті сприяє суттєвому поліпшенню когезійних властивостей КМ.

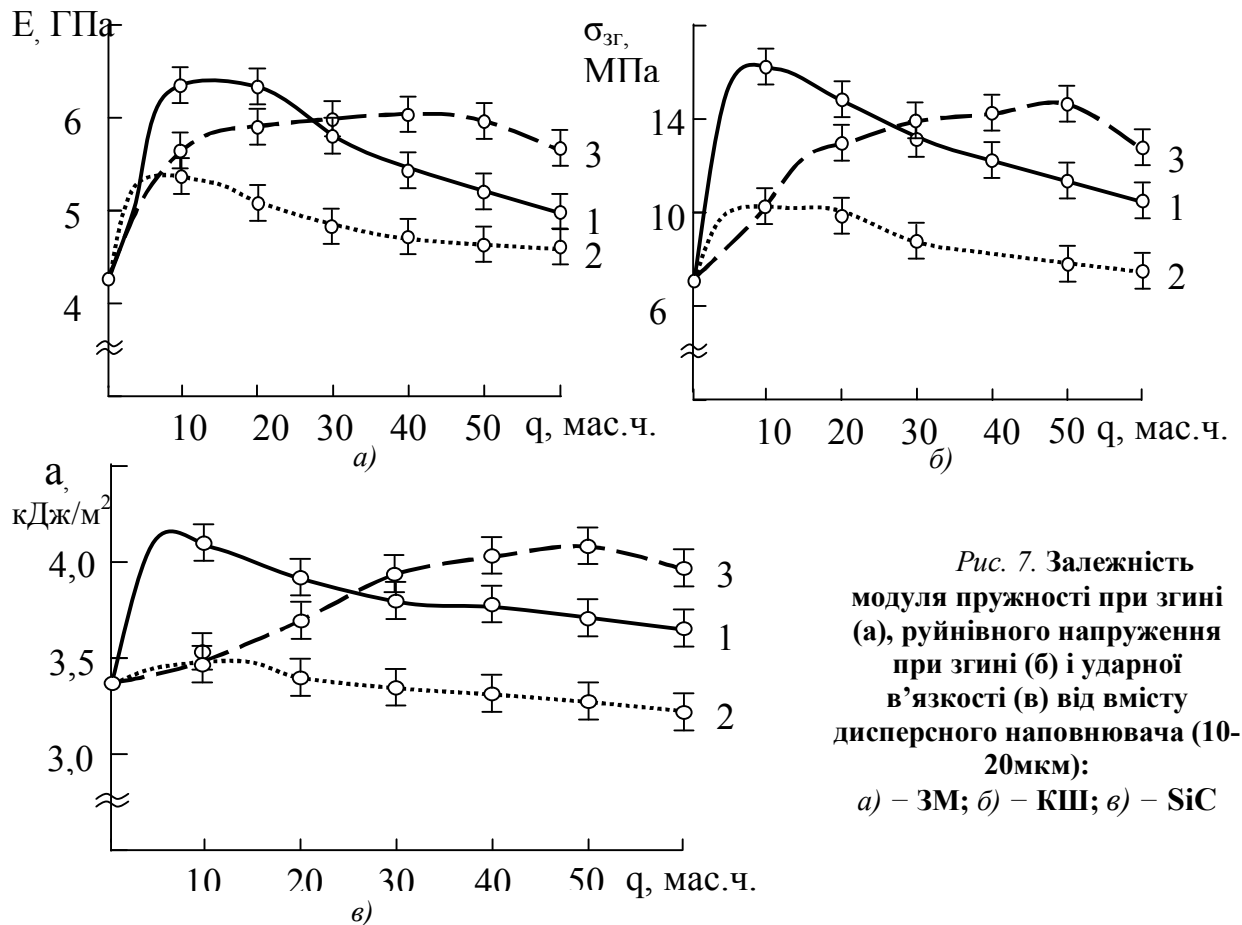


Рис. 7. Залежність модуля пружності при згині (а), руйнівного напруження при згині (б) і ударної в'язкості (в) від вмісту дисперсного наповнювача (10-20 мкм): а) – ЗМ; б) – КШ; в) – SiC

**Основні результати досліджень.** За результатами досліджень встановлено критичний вміст наповнювача оксиду хрому у КМ –  $q=40-50$  мас.ч. Показано, що введення часток  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  за оптимального вмісту забезпечує підвищення показників модуля пружності при згині КМ з  $E=4,2$  ГПа (для пластифікованої епоксидної матриці) до  $E=5,9-6,0$  ГПа, руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{zr}=7,1$  МПа до  $\sigma_{zr}=14,0-14,8$  МПа і ударної в'язкості з  $a=3,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $a=4,0-4,1$  кДж/м<sup>2</sup> (рис. 7). Методом оптичної мікроскопії встановлено, що руйнування зразків відбувається за складною траєкторією (рис. 5,г). Це є свідченням формуванням структури матеріалу з напруженим станом. Підтверджують дане припущення результати дослідження поверхні зламу КМ методом електронної мікроскопії. Показано, що при зшиванні КМ з частками оксиду хрому формуються повітряні включення (показано стрілками), завдяки яким утворюється нестабільна у часі структура матеріалу зі значним залишковими напруженнями (рис. 6,г). Отже, можна стверджувати, що такі КМ швидко старіють у часі, внаслідок чого різко погіршуються їх фізико-механічні властивості.

Додатково встановлено, що введення часток ГС не забезпечує суттєвого поліпшення фізико-механічних властивостей КМ. Показано, що введення часток ГС за оптимального вмісту  $q=5-15$  мас.ч. забезпечує збільшення показників модуля пружності при згині КМ з  $E=4,2$  ГПа (для пластифікованої епоксидної матриці) до  $E=5,1-5,3$  ГПа, руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{zr}=7,1$  МПа до  $\sigma_{zr}=9,8-10,1$  МПа і ударної в'язкості з  $a=3,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $a=3,5$  кДж/м<sup>2</sup> (рис. 7). Очевидно, що використання таких часток є доцільним у вигляді додаткового дрібнодисперсного наповнювача, який необхідно вводити з метою поліпшення когезійних властивостей КМ, що містять основні грубодисперсні добавки.

**Висновки.** Отже, на основі результатів дослідження встановлено вплив дисперсних наповнювачів на фізико-механічні властивості епоксикомпозитів. Показано, що для підвищення когезійної міцності матеріалів у пластифікований зв'язувач необхідно вводити частки зольних мікросфер та карбіду кремнію з дисперсністю 63 мкм. Встановлено, що введення мікросфер у епоксидний зв'язувач за оптимального вмісту  $q=20-40$  мас.ч. забезпечує збільшення модуля пружності при згині з  $E=4,2$  ГПа (для пластифікованої епоксидної матриці) до  $E=5,8-6,5$  ГПа, а руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{zr}=7,1$  МПа до  $\sigma_{zr}=15,2-18,1$  МПа. Для підвищення ударної в'язкості з  $a=3,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $a=4,3-4,4$  кДж/м<sup>2</sup> необхідно у зв'язувач вводити частки зольних

мікросфер при оптимальному вмісті  $q=10-20$  мас.ч. Введення часток SiC за оптимального вмісту  $q=50-60$  мас.ч. у зв'язувач забезпечує підвищення модуля пружності при згині з  $E=4,2$  ГПа до  $E=6,2-6,3$  ГПа, руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{зг}=7,1$  МПа до  $\sigma_{зг}=18,6-20,2$  МПа і ударної в'язкості з  $a=3,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $a=4,7-5,0$  кДж/м<sup>2</sup>.

Крім того, встановлено критичний вміст дрібнодисперсних часток для формування епоксикомпозитів з поліпшеними когезійними властивостями. Доведено, що введення часток спіненого вермикуліту (10-20 мкм) за оптимального вмісту  $q=5-15$  мас.ч. забезпечує збільшення показників модуля пружності при згині КМ з  $E=4,2$  ГПа до  $E=6,2-6,3$  ГПа, руйнівного напруження при згині з  $\sigma_{зг}=7,1$  МПа до  $\sigma_{зг}=15,6-16,1$  МПа і ударної в'язкості з  $a=3,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $a=4,1-4,2$  кДж/м<sup>2</sup>.

1. Fortelny I. Theoretical description of steady droplet size in polymer blends containing a compatibilizer / I.Fortelny, I.Zivny // Polymer. – 2000. – V.41. – P.6865-6897.
2. Kal'ba E.M. Adhesion strength of polymer-containing protective coatings / E.M.Kal'ba, A.V.Buketov, P.P.Savchuk and S.M.Holotenko // Materials Science. Chemistry and Materials Science. – New York. – Volume 35, Number 1/January. – 1999. – P. 125-128.
3. Buketov A.V. Improvement of the accuracy of evaluation of the dynamic characteristics of epoxy composites / A.V.Buketov // Materials Science. Chemistry and Materials Science. – New York. – Volume 42, Number 4/July. – 2006. – P. 569-571.
4. Mamunya Ye.P. Dielectric properties of polymers filled with dispersed metals / Ye.P.Mamunya, V.V.Davydenko, L.Apekis, H.Zois, A.A.Snarskii, K.V.Slipchenko // Polym. & Polym. Compos. – 2002. – V.10, N 3. – P. 219-227.
5. Кальба Е.Н. Полимер-композиционные износ- и коррозионностойкие покрытия для деталей сельхозмашин / Е.Н.Кальба, В.Л.Кондратюк, И.В.Оверко, А.Т.Помелуйко // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1991. – N1. – С. 43-44.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.



УДК 621.941.323.2

**Р.Г. Редько, О.І. Редько, В.В. Шанайда, Р.А. Склярів**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНО-СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТИСКНИХ ЦАНГ,**  
**ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА ДІЮЧИМИ ТА НОВИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ**

*Відкориговано формулу згинальної жорсткості пелюстки цанги. При цьому брали до уваги вплив податливості защемлення як циліндричної оболонки при одночасному навантаженні всіх пелюсток і різній кількості розрізів ( $z, \psi_p$ ) та їх ширині ( $t_1, \psi$ ). Запропоновану формулу можна використовувати у всіх залежностях, що визначають силові характеристики, характеристики жорсткості і точності цангових затискних патронів.*

*Ключові слова:* затискна цанга, пелюстка цанги, пружно-силові характеристики, жорсткість пелюстки, защемлення.

*Рис. 3 Табл. 4. Літ. 10.*

**Р.Г. Редько, О.И. Редько, В.В. Шанайда, Р.А. Склярів**  
**ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИМНЫХ ЦАНГ,**  
**ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ДЕЙСТВУЮЩИМ И НОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

*Откорректирована формула изгибной жесткости лепестка цанги. При этом учитывали влияние податливости защемления как цилиндрической оболочки при одновременной нагрузке всех лепестков и разным количестве разрезов ( $z, \psi_p$ ) и их ширине ( $t_1, \psi$ ). Предложенную формулу можно использовать во всех зависимостях, определяющих силовые характеристики, характеристики жесткости и точности цанговых зажимных патронов.*

*Ключевые слова:* зажимная цанга, лепесток цанги, упруго-силовые характеристики, жесткость лепестка, защемление.

**R.G. Redko, O.I. Redko, V.V. Shanayda, R.A. Sklyarov**  
**INVESTIGATION OF ELASTIC - FORCE CHARACTERISTICS COLLET**  
**MANUFACTURED BY EXISTING AND NEW TECHNOLOGIES**

*Corrected formula flexural rigidity collet petals . In this case, taking into account the impact of compliance as a pinched cylindrical shell while loading all the petals and different number of  $(z, \psi_p)$  and width  $(t_1, \psi)$  cuts  $(z, \psi_p)$ . The proposed formula can be used in all the dependencies that determine the power characteristics, characteristics of rigidity and precision collet clamping cartridges.*

*Keywords:* Collet, Petal collet, elastic-strength properties, hardness petals, pinched.

**Постановка проблеми.** Вперше запропонований Ю.М.Кузнецовим [8, 9] підхід до розгляду згинальної жорсткості пелюстки з врахуванням податливості защемлення, що являє собою циліндричну оболонку, наблизив результати розрахунку до експерименту (фактичного значення). Але розгляд навантаженого стану защемлення без впливу навантаження інших пелюсток цанги і їх защемлень занижує значення розрахункової жорсткості при розв'язанні диференційного рівняння пружної лінії пелюстки з податливим защемленням [10].

Для доказу цього порівнюються дві схеми навантаження защемлення:

1. Навантажено першу пелюстку силою  $P$ ; при цьому спрощено її защемлення розглядається як балка на двох опорах із симетричним навантаженням при поперечному згині (рис. 1, а);
2. Навантажено одночасно всі пелюстки силою  $P$ ; при цьому пропонується защемлення пелюстки розглядати як балку на двох опорах із симетричним навантаженням при поперечно-поперечному згині (додаткові стискаючі сили  $P/2$ ), рис. 1, б.

Із "Опору матеріалів" відомо, що для першої схеми (рис. 1, а) рівняння пружної лінії

$$y_1 = \Delta_1(x) = \frac{Pl^3}{48EI} \left( 3 \frac{x}{l} - 4 \frac{x^3}{l^3} \right), \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2},$$

а прогин в середньому перерізі

$$\Delta_1 = \frac{Pl^3}{48EI}, \quad (1)$$

де  $l$  – відстань між опорами;

$E$  – модуль пружності;

$I$  – момент інерції пелюстки в перерізі защемлення відносно нейтральної осі.

Для другої схеми (рис. 1, б) рівняння пружної лінії:

$$y_2 = \Delta_2(x) = \frac{pl}{2S} \left( \frac{\sin \alpha x}{\alpha l \cos \frac{\alpha l}{2}} - \frac{x}{l} \right), \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2}.$$

При  $S = P/2$

$$y_2 = \Delta_2(x) = l \left( \frac{\sin \alpha x}{\alpha l \cos \frac{\alpha l}{2}} - \frac{x}{l} \right), \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2};$$

а прогин в середньому перерізі:

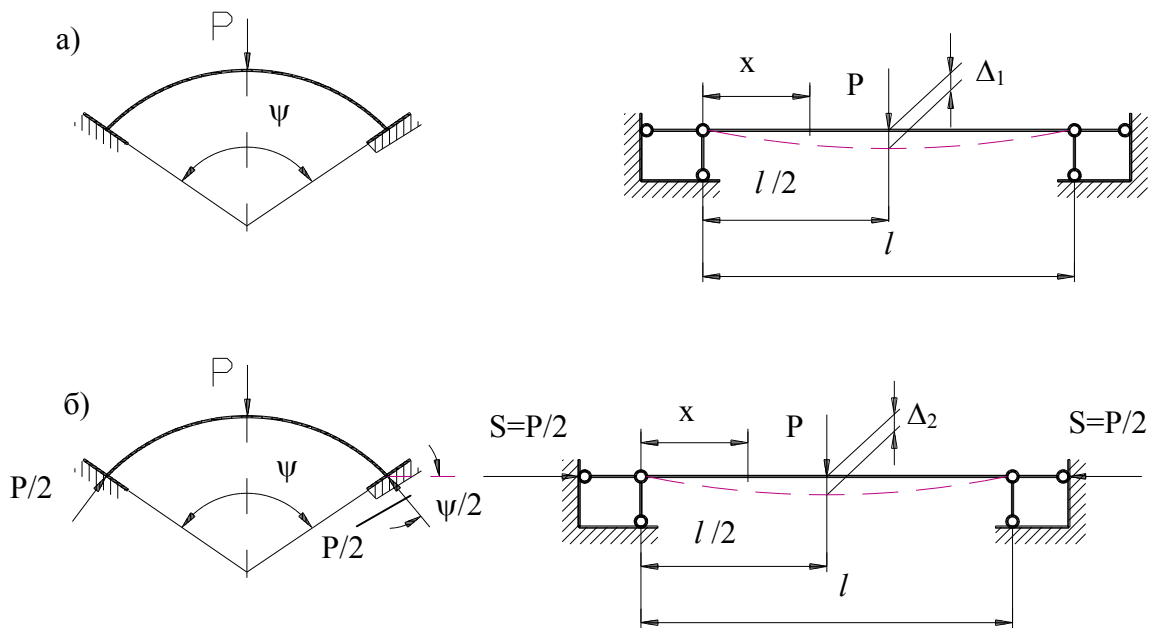


Рис. 1. Порівняння двох схем навантаження пелюстки затискної цанги і її защемлення: а – без врахування впливу навантаження інших пелюсток; б – із врахуванням цього впливу (підхід, що пропонується)

$$\Delta_2 = l \left( \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha l}{2}}{\alpha l} - \frac{1}{2} \right), \quad (2)$$

де  $\alpha = \sqrt{\frac{S}{EI}} = \sqrt{\frac{P}{2EI}}$ ,  $EI = \text{const}$ .

Згинальна жорсткість защемлення:

$$C_{31} = \frac{P}{\Delta_1}, \quad C_{32} = \frac{P}{\Delta_2}.$$

Якщо  $\Delta_2 < \Delta_1$ , то  $C_{32} > C_{31}$ .

Для доказу цього судження розглядається спрощений приклад за умов:  $P=10^3$  Н,  $l = 10^2$  мм,  $E=2 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>,  $I=10^3$  мм<sup>4</sup>.

Із формули (1)  $\Delta_1=0,104$  мм. Із формули (2) при  $\alpha=0,00158$   $\Delta_2=0,05$  мм. Таким чином, в другому випадку жорсткість защемлення вища.

Залежність для розрахунку згинальної жорсткості пелюстки може бути уточнена із додаткових міркувань і розглядом схеми навантаження, наведеної на рис. 2. В загальному випадку задача зводиться до розв'язку основного диференційного рівняння пружної лінії для малих переміщень при нових граничних умовах [1, 2, 4, 5].

Більш простим підходом до розв'язку цієї задачі є введення поправочних коефіцієнтів в залежності [7]:

$$C_n = \frac{3EI_n}{\xi l_n^3 + I_n \varepsilon l_n (1 + 2\lambda l_n)} \quad (3)$$

із таких міркувань:

1. із збільшенням кількості пелюсток (розрізів  $z$ ) вплив другого доданку в знаменнику залежності  $C_n$  зменшується, тобто зменшується вплив податливості циліндричної оболонки в місці защемлення пелюстки;

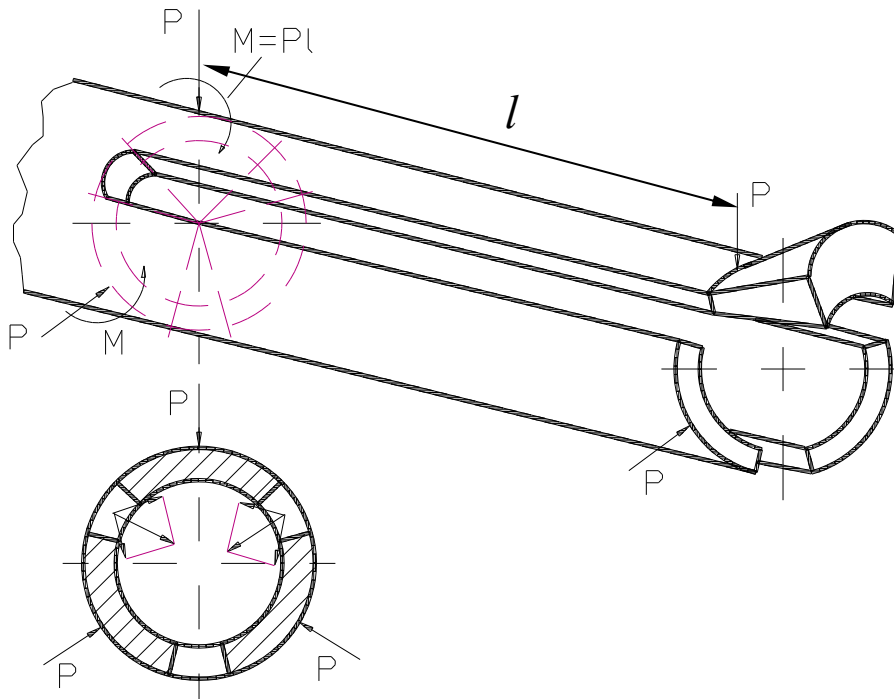


Рис. 2. Запропонована розрахункова схема для визначення жорсткості пелюсток із врахуванням одночасного їх навантаження

- 2) навіть при одній і тій кількості розрізів із збільшенням їх ширини вплив податливості циліндричної оболонки також зменшується, тобто при  $\psi_p = 360^\circ/z$  кут поперечного перерізу пелюстка в кінці розрізки зменшується в залежності:

$$\psi = \frac{360^\circ}{z} - 2 \arcsin \frac{t_1}{R + r},$$

де  $t_1$  – ширина розрізки;

$R$  і  $r$  – зовнішній і внутрішній радіуси перерізу пелюстки.



Напрямки зменшення впливу податливості циліндричної оболонки в місці защемлення пелюстки наведені на рис. 3.

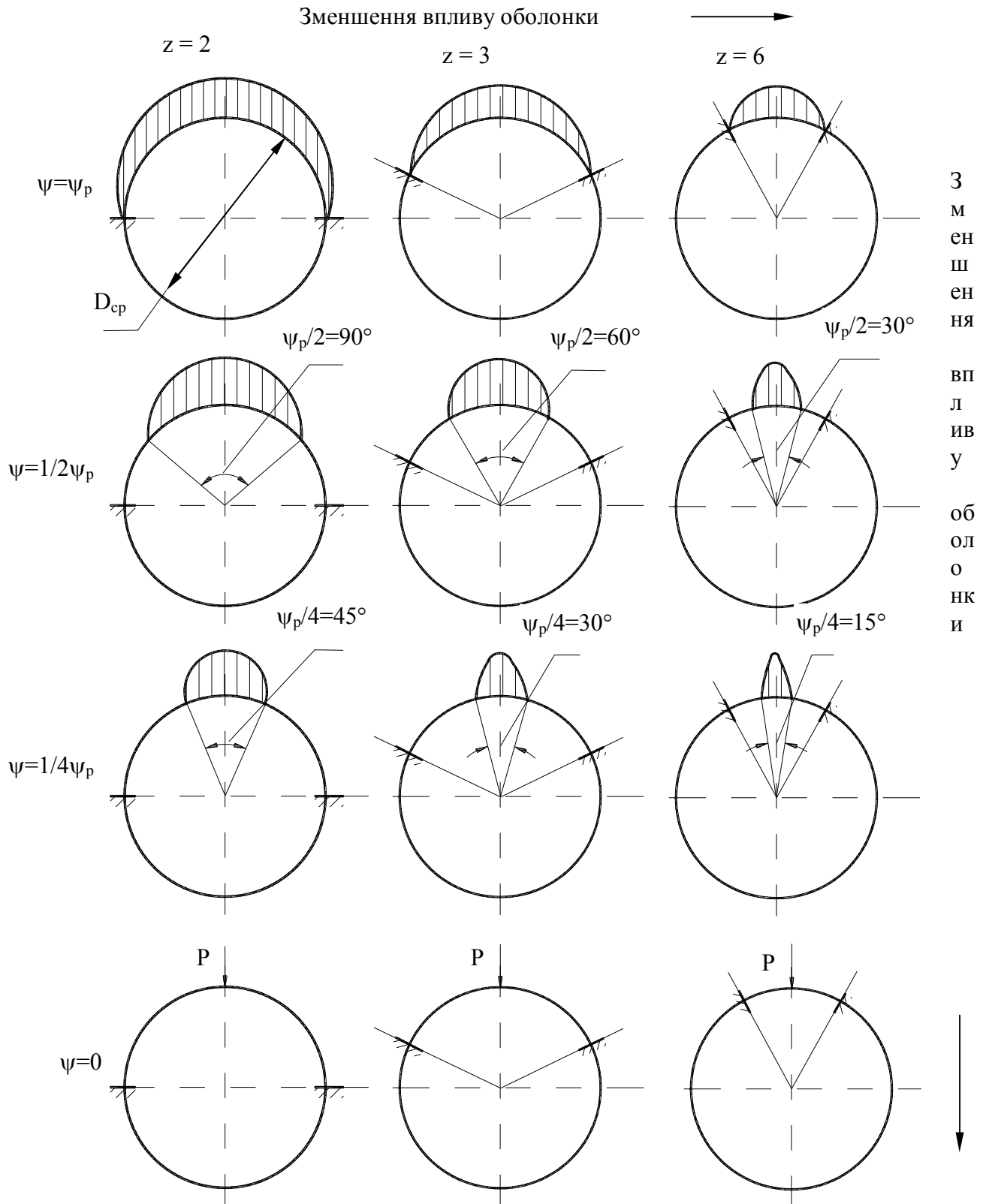


Рис. 3. Напрямок зменшення впливу податливості циліндричної оболонки в місці защемлення (кінці розрізки) пелюстки

**Основні результати дослідження.** Із врахуванням вищевикладеного в першому наближенні відкоригована формула згинальної жорсткості пелюстки. При цьому брали до уваги вплив податливості защемлення як циліндричної оболонки при одночасному навантаженні всіх пелюсток і різній кількості розрізів ( $z, \psi_p$ ) та їх ширині ( $t_1, \psi$ ).

Згинальна жорсткість пелюстки цанги дорівнює:

$$C_n = \frac{\left(3 - \frac{\sin \psi}{\sin \psi_p}\right) E I_n}{\xi l_n^3 + \frac{2}{z} I_n \varepsilon l_n (1 + 2 \lambda l_n)} \quad (4)$$

**Висновки.** Запропонована формула (4) повинна використовуватись у всіх залежностях, що визначають силові характеристики, характеристики жорсткості і точності цангових затискних патронів.

1. Кузнецов Ю.Н. Расчет угла контакта зажимной цанги со шпинделем. // Станки и инструмент. – 1970. – № 8. – С. 20-22.
2. Кузнецов Ю.Н., Вачев А.А., Редько Р.Г. Сравнительные исследования упруго-напряженного состояния зажимных цанг, изготовленных разными методами // Машиностроительна техника и конструирование: Сб. доклады. – Габрово, 1997. – С. 135-141.
3. Кузнецов Ю.М., Гордеев О.Ф., Редько Р.Г. Экспериментальні дослідження напруженого стану затискних цанг // Інтеграція освіти, науки та виробництва: Матеріали III міжнародної науково-методичної конференції. – Луцьк, 1997. – С. 27-29.
4. Кузнецов Ю.Н. Зажимная цанга со стабильной силой зажима. // Технология и организация производства. Киев. – 1971. – №1. – С.101-103.
5. Кузнецов Ю.Н. Влияние длины разрезки лепестка на характеристики зажимной цанги. // Технология и организация производства. Киев, 1972, №9, – С. 68-74.
6. Кузнецов Ю.Н. Влияние диаметра прутка на силы и упругие перемещения в цанговом механизме зажима. // Вестник КПИ, сер. Машиностроения – Киев. – 1978. – № 15. – С. 40-47.
7. Кузнецов Ю.Н., Орликов М.Л. Экспериментальное исследование влияния конструктивных элементов зажимных цанг на их характеристики. // Технология и организация производства. – Киев, № 11. – 1973. – С. 41-51.
8. Кузнецов Ю.Н. Деформация лепестков цанг при различных схемах нагружения. // Вестник КПИ, серия машиностроения. – 1975, N12. – С. 63-68.
9. Кузнецов Ю.Н. Жесткость зажима прутка в цанговом патроне. // Металлорежущие станки. – Киев, 1974. – Вып. 2. – С. 74-85.
10. Кузнецов Ю.Н., Орликов М.Л. Жесткость лепестков цанг. // Станки и инструмент. – 1968. – N4. – С. 39-42.

Стаття надійшла до редакції 21.01.2014.

С.В. Ротко, І.І. Мельничук

### ЗАХИСТ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ВІД КОРОЗІЇ ІНТЕГРАЛЬНИМИ КАПІЛЯРНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ МІНЕРАЛЬНИХ І ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ

*Досліджуються властивості мінерально-полімерних композицій (Кальматрон, Кальмофлекс, Акватрон-6, Гідротекс-К та інші), їх вплив на антикорозійні властивості залізобетонних конструкцій. Встановлено, що такі покриття збільшують водонепроникність бетону до 1,9 МПа, забезпечують велику глибину проникнення і зчеплення з поверхнею бетону.*

*Ключові слова:* вторинний захист, корозія, інтегральні капілярні системи.

*Рис. 5. Літ. 4.*

С.В. Ротко, И.И. Мельничук

### ЗАЩИТА ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ОТ КОРРОЗИИ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ КАПИЛЛЯРНЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

*Исследуются свойства минерально-полимерных композиций (Кальматрон, Кальмофлекс, Акватрон-6, Гидротэкс-К и др.), их влияние на антикоррозионные свойства железобетонных конструкций. Установлено, что такие покрытия увеличивают водонепроницаемость бетона до 1,9 МПа, обеспечивают большую глубину проникновения и сцепление с поверхностью бетона.*

*Ключевые слова:* вторичная защита, коррозия, интегральные капиллярные системы.

S.V. Rotko, I.I. Melnychuk

### PROTECT CONCRETE FROM CORROSION INTEGRAL CAPILLARY SYSTEMS BASED ON MINERAL AND POLYMER COMPOSITIONS

*The properties of the mineral-polymer composites (Kalmatron, Kalmofleks, Akvatron-6 Hidroteks-K, etc.), their effect on the corrosion resistance of concrete structures. Established that such coverage increases water resistance of concrete to 1.9MPa, provide a greater depth of penetration and adhesion to the surface of concrete.*

*Keywords:* secondary protection, corrosion, integral capillary systems.

**Актуальність дослідження.** Інтенсивні темпи будівництва, ремонту та реконструкції будівель і споруд різного призначення висувають на перший план проблему забезпечення довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій.

Недотримання вимог щодо забезпечення довговічності при проектуванні, будівництві, експлуатації конструкцій, впливі агресивних факторів зовнішнього середовища (повітря, ґрунтових вод, мінусових кліматичних температур тощо), часто в поєднанні з низькою якістю будівельних робіт призводить до передчасного руйнування будівельних конструкцій.

Під впливом навколишнього середовища відбувається руйнування захисного шару бетону конструкцій, оголення і корозія арматури, вилугування і зниження міцності бетону. Особливо інтенсивно ці процеси протікають у місцях, де при зведенні порушувалась технологія виробництва робіт, внаслідок чого не забезпечувалась проектна міцність бетону, технологічні шви бетонування мали нещільності, раковини. Усунення пошкоджень звичайними бетонними сумішами не є довговічним через низьку адгезію нового бетону до основного бетону та подальшу усадку новоукладеного бетону. Практично неможливо таким способом усунути пошкодження у підземних спорудах, оскільки доступ до цих конструкцій є обмеженим.

**Основна частина.** Аналіз експериментальних матеріалів і практичного досвіду із вторинного захисту, накопиченого протягом останніх років, показав, що найбільш економічними, перспективними та широко використовуваними на практиці для захисту залізобетонних будівельних конструкцій є інтегральні капілярні системи на основі мінеральних і полімерних композицій [1].

До захисних матеріалів, які вироблені на теренах СНД відносять: Кальматрон, Кальмофлекс, Акватрон-6, Гідротекс-К та інші. Аналогами даних матеріалів у зарубіжній практиці є Пенетрон і Ксайпекс (США).

Ці покриття є тріщиностійкими. Вони можуть застосовуватися для захисту залізобетонних конструкцій, що допускають утворення тріщин у процесі експлуатації. Компоненти покриття глибоко проникають у бетон суцільним фронтом із заповненням капілярів, мікротріщин важкорозчинними кристалами.

Інтегральні капілярні системи на основі мінеральних і полімерних композицій стійкі до впливу критичних температур, агресивних хімічних середовищ, нафтопродуктів і до зовнішньої механічної дії, що актуально при захисті каналізаційних колекторів. Також покриття володіють біоцидними властивостями, що дозволяє використовувати їх при будівництві та ремонті об'єктів харчової промисловості та сільського господарства. Вони не токсичні, не горючі, вибухобезпечні. Дозволяють значно (більше, ніж у 5 разів) знизити поширення радіонуклідів. Це дозволяє рекомендувати матеріал для захисту бетонних інженерних споруд, що контактують із радіоактивними речовинами. Ці покриття не викликають корозії арматури, а також істотно уповільнюють карбонізацію бетону та зменшують швидкість проникнення у бетон хлористих солей.

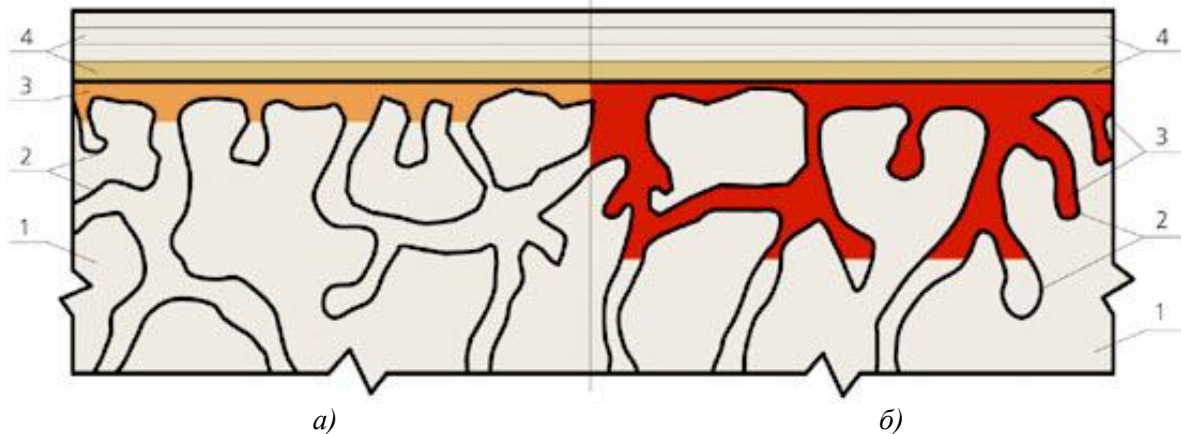
Встановлено, що оброблений капілярними системи бетон має здатність до самозаліковування, тобто якщо в конструкції з'явилися тріщини (усадочні, деформаційні тощо) із розкриттям до 0,2 мм, то вони здатні «затягуватися» при виконанні єдиної умови – наявності зволоження на даній ділянці. Вони можуть наноситися як ззовні конструкції, так і зсередини, незважаючи на напрямок тиску води.

Покриття є паропроникними. Спостерігається ефект «сита»: молекули води, залишаючись у контактній зоні, не проходять у товщу бетону, а молекули повітря проходять. Така природна фільтрація сприяє підвищенні довговічності конструкції в цілому.

Композиції на основі полімерних і мінеральних в'язучих дозволяють забезпечити міграцію складових у пори бетону з подальшою полімеризацією в них. При товщині таких покриттів у 4-5 мм забезпечений надійний захист бетону конструкцій у низці агресивних середовищ. Механізм їхньої дії дозволяє створити проміжний буферний шар між підкладкою і покриттям, регулювати температуру, вологість, усадочні деформації шарів, що призводить до зниження концентрації напружень у конкретній зоні виробів як у процесі їх виготовлення, так і в процесі експлуатації [2].

Встановлені взаємозв'язки між складом і структурою бетону, режимами їх обробки мономерами та олігомерами дозволяють отримувати надійні гідроізоляційні та корозійностійкі покриття на поверхні бетонів.

Різницю у механізмі захисту традиційними методами та новими композиційними полімерними та мінерало-полімерними композиціями добре видно на рис. 1.



**Рис. 1. Схема захисту полімерними матеріалами поверхні бетону: а) захист традиційними методами, б) захист новими капілярними системами**  
**1 – поверхня бетону, яка захищається; 2 – пори в бетоні; 3 – ґрунтовка (просочення); 4 – шпаклівка, основні покривні шари**

Технічний прогрес в області розробки засобів захисту від корозії спричинив істотні зміни номенклатури та властивостей матеріалів. Проведений аналіз науково - технічної документації показав, що на сьогодні немає єдиних уніфікованих показників, що характеризують якість систем антикорозійних покриттів для бетону [3]. Технічні вимоги пред'являються в основному до вихідних матеріалів (складу, технології нанесення, послідовності операцій), а також до властивостей покриттів: хімічної стійкості, еластичності, однорідності, суцільності, адгезії і товщини, які, крім останнього, характеризуються лише якісно.

Основні захисні властивості покриттів для бетону не нормуються, що ускладнює порівняльну оцінку різних варіантів захисту, тим більше, якщо вона здійснюється фахівцями різних організацій.

Для визначення властивостей захисних покриттів на основі мінерально-полімерних композицій були проведені випробування кількох систем вторинного захисту: Кальматрон, Кальмофлекс, Акватрон-6, Гідротекс-К, Ксайлекс, Пенетрон за основними показниками якості. Критеріями оцінки вторинного захисту було обрано такі характеристики систем покриттів для бетону: адгезія покриття до бетону, підвищення морозостійкості, водонепроникність, глибина проникнення у бетон. Результати випробувань наведені на рис. 2 у вигляді діаграм.

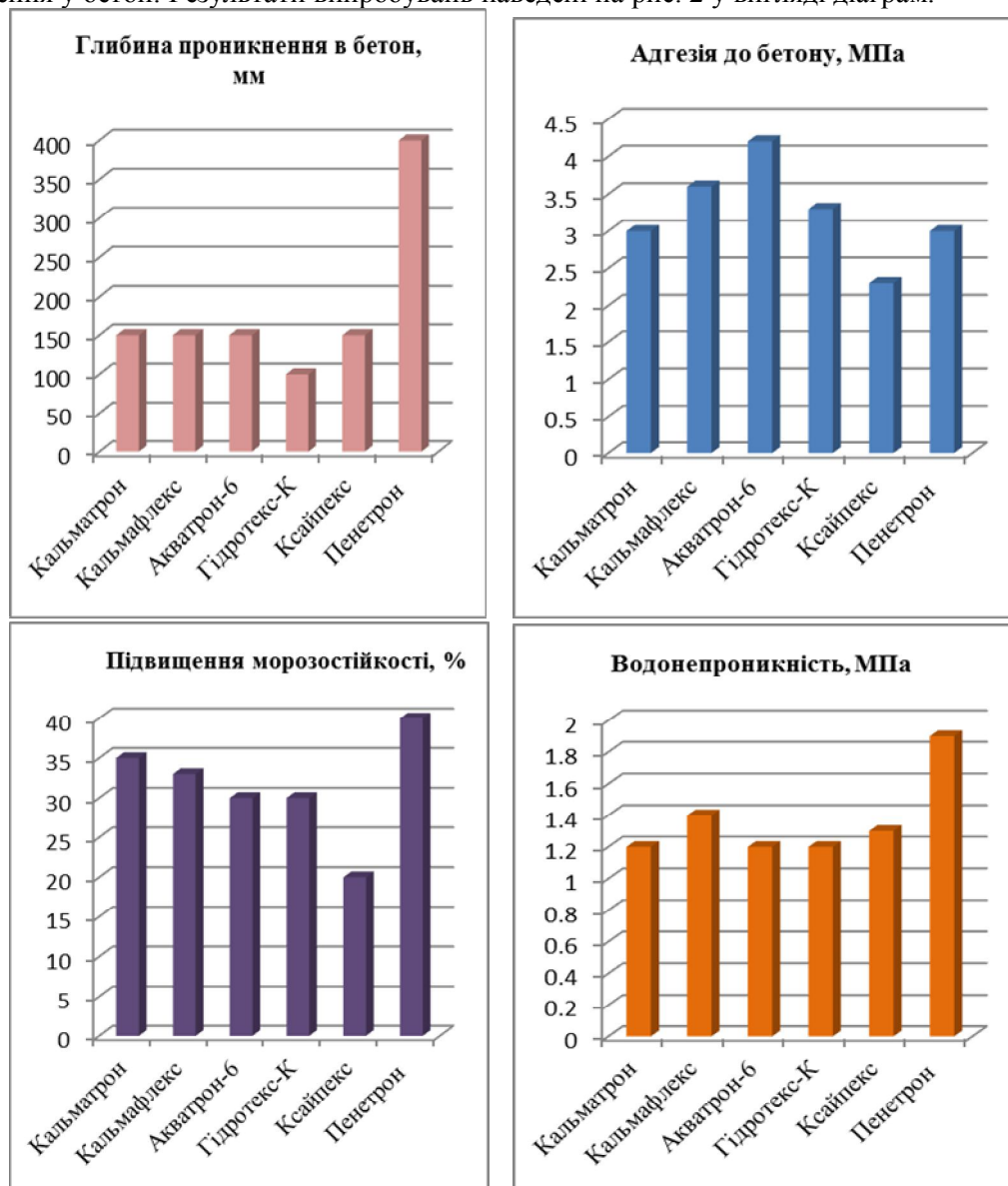


Рис. 2. Порівняння властивостей захисних покриттів на основі мінерально-полімерних композицій

Отримані результати підтверджують, що дані мінерально-полімерні композиції значно підвищують характеристики бетону.

Після нанесення матеріалу в результаті хімічної взаємодії утворюються кристали, які починають проростати у глибокі шари бетону суцільним фронтом перпендикулярно до поверхні нанесення, рухаючись по капілярних каналах, заповнюючи їх і значно зменшуючи площу поперечного перерізу, тим самим перебиваючи воді вільний шлях крізь товщу бетону. Водонепроникність зразків підвищується до 1,2-1,9 МПа. Це дає змогу використовувати ці види покриття для конструкцій, які піддаються постійному чи попереминому зволоженню водою. Найкращі показники за водонепроникністю у Пенетрону – 1,9 МПа.

Ефект водонепроникності забезпечується через виникнення послідовних реакцій, що проходять всередині бетону, між його складовими і компонентами, що містяться в інтегральних капілярних системах. На рис. 3 показані кристалічні включення полімерно-мінеральних композицій в мікропорожнинах структури бетону, що забезпечують непроникність структури бетону як в гелевій, так і в кристалічній фазах. У результаті даних хімічних реакцій утворюються слабозчинні новоутворення, які заповнюють капіляри, пори і мікротріщини, витісняючи при цьому воду. Хімічний склад новоутворень забезпечує високі гідроізоляційні властивості бетону. Крім того, завдяки утворенню гідратних з'єднань на межі контакту бетону і зовнішнього середовища досягається незалежність хімічних характеристик навколишнього середовища від властивостей матеріалу конструкції споруди, іншими словами – санітарно-екологічний захист середовища контакту. Це дає можливість використовувати покриття в спорудах господарсько-питного призначення.

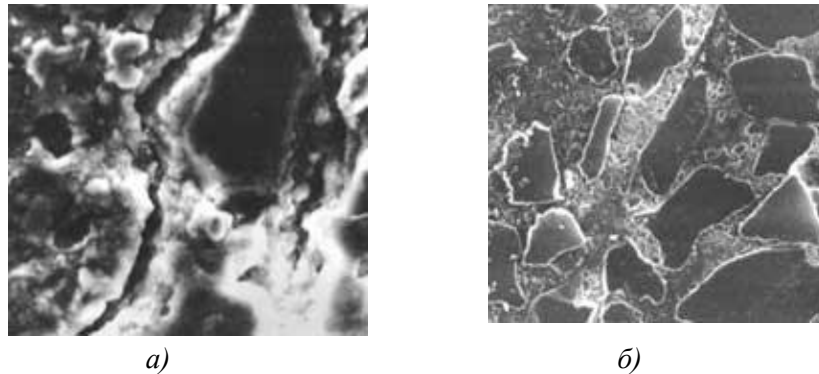


Рис. 3. Структура бетону до нанесення інтегральних капілярних систем на основі мінеральних і полімерних композицій (а) і після їх нанесення (б)

Для визначення величини адгезії покриття до бетону використовували метод нормального відриву, що полягає у вимірюванні сили відриву покриття від поверхні, що захищається за допомогою приклеєного до покриття металевого штампа та динамометра. Значення адгезії до бетону даних покриттів коливається від 2,3-4,2 МПа. Ці показники забезпечують хороше зчеплення з бетоном. Найкращі показники у Акватрону.

Також інтегральні капілярні системи на основі мінеральних і полімерних композицій підвищують морозостійкість бетону на 30-40%. Підвищення морозостійкості бетону досягається за рахунок кольтатації дефектів структури та усунення надходження вологи в тіло бетону. Ефективність захисту залежить від умов зволоження бетону до та після нанесення покриття і підвищується при твердненні у вологих умовах.

При нанесенні покриття на поверхню конструкції, коли бетон знаходився у стані водонасичення, меншому від його максимального водопоглинання за масою, спостерігали істотний ріст морозостійкості. За відповідного максимальній величині водопоглинання за масою початок процесу розморожування бетону відбувається пізніше.

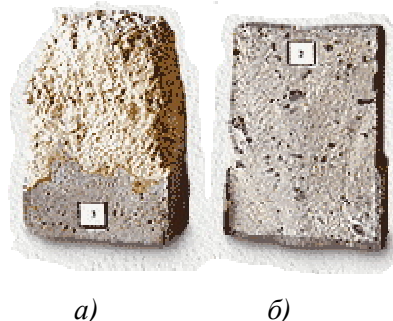
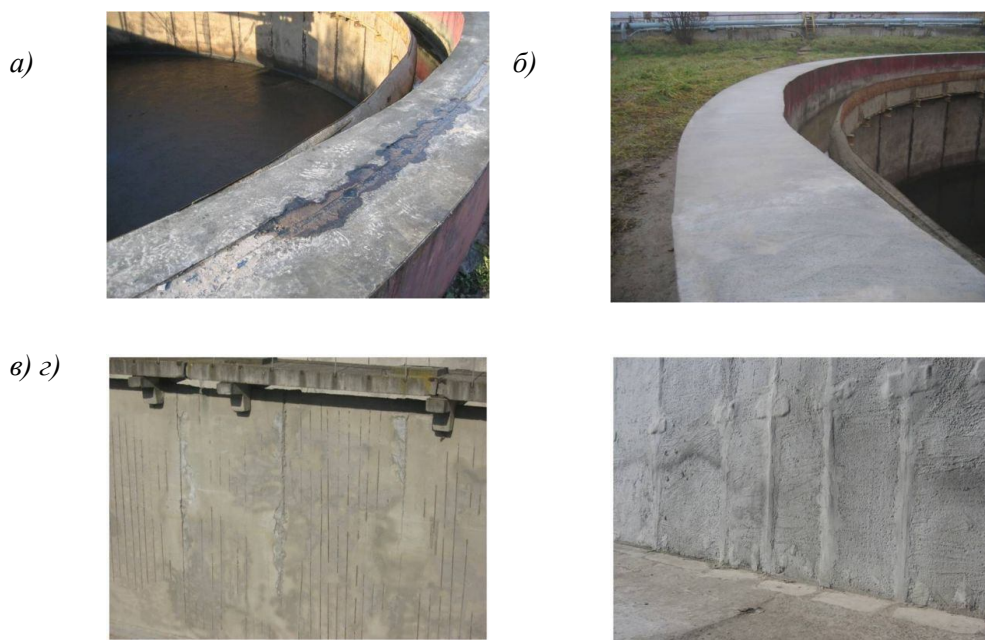


Рис. 4. Випробування бетону в розчині соляної кислоти а) без антикорозійного покриття; б) з нанесенням інтегральних капілярних систем

При односторонньому нанесенні покриття на поверхні конструкції з боку впливу мінусових температур морозостійкість конструкції зростає, як при зволоженні бетону з боку захищеної поверхні, так і з протилежного боку. Також такі покриття глибоко проникають у товщу бетону,



чим забезпечують високі показники корозійної стійкості у різних середовищах. На рис. 4 видно як впливає нанесення мінерально-полімерних композицій на антикорозійні властивості бетону.



**Рис. 5. Використання інтегральних капілярних систем: а) водоканал до обробки; б) водоканал після обробки; в) очисна споруда до обробки; г) очисна споруда після обробки**

**Висновки.** Інтегральні капілярні системи на основі мінеральних і полімерних композицій рекомендовано застосовувати при будівництві та ремонті залізобетонних конструкцій і споруд у якості захисного матеріалу від агресивної дії води та захисту від корозії при впливі рідких і газоподібних агресивних середовищ, а також конструкцій, що знаходяться під впливом мінусових температур в умовах безпосереднього зволоження або капілярного всмоктування тощо. Також їх рекомендовано застосовувати в якості ущільнюючого та герметизуючого матеріалу для стиків, швів і дефектних ділянок бетонних і залізобетонних конструкцій. Приклади використання таких покриттів зображено на рис. 5. Ці матеріали заповнюють порожнини, які утворюються на поверхні конструкцій в умовах впливу води, циклічного заморожування і видів корозії, встановлених Москвіним В.М. [4].

Проведені дослідження допомогли встановити, що інтегральні капілярні системи на основі мінеральних і полімерних композицій допомагають:

- забезпечити на 100 % захист бетону від проникнення вологи;
- підвищити морозостійкість бетону на 30% ;
- підвищити величину водонепроникності бетону до 1,9 МПа;
- забезпечити високу адгезійну міцність зчеплення покриття з бетоном;
- забезпечити велику глибину проникнення у бетон, що сприятиме високій корозійній стійкості бетону у різних середовищах.

1. Бабушкин В.И., Гусев Б.В., Кондращенко Е.В. Осмотический эффект объёмных изменений в структурирующихся системах // Научный вестник строительства. Харьков, вып. 12, 2001 г.
2. Степанова В.Ф., Соколова С.Е. Дифференцированные способы антикоррозионной защиты строительных конструкций на основе полимерных материалов. – Правительство Москвы, Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции города, ЗАО НПВФ «Стройтехинновация» // Техническая информация «Новые материалы, конструкции, оборудование и технологии в строительном комплексе Москвы» – вып. 4, 2004, Москва.
3. Степанова В.Ф., Соколова С.Е., Полушкин А.Л. Выбор критериев оценки и основных показателей качества антикоррозионных покрытий на бетоне. Долговечность и защита конструкций от коррозии/Материалы междунар. конфер. 25–27 мая 1999 г.
4. Москвин В.М. Коррозия бетона / В.М. Москвин. – М.: Стройиздат, 1952. – 342 с.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2014.

УДК338.49:332.12

**Н. Рудь, Ю. Гнускова, О. Марчук**  
**ІНДУСТРІАЛЬНІ ПАРКИ В УКРАЇНІ: ДОЦІЛЬНІСТЬ СТВОРЕННЯ**

*В статті досліджено питання створення та функціонування індустріальних парків в економіці України, вивчено зарубіжний досвід діяльності таких структур та показано їх ефективність в сприянні сфері залучення інвестицій. Розглянуто специфічні особливості створення індустріальних парків. Наведено основні характеристики індустріальних парків в Україні.*

**Ключові слова:** індустріальний парк, інноваційна інфраструктура, іноземні інвестиції, спеціальні економічні зони.

Табл. 3. Рис. 1. Літ. 18.

**Н. Рудь, Ю. Гнускова, О. Марчук**  
**ІНДУСТРИАЛЬНЫЕ ПАРКИ В УКРАИНЕ: ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОЗДАНИЯ**

*В статье исследованы вопросы создания и функционирования индустриальных парков в экономике Украины, изучен зарубежный опыт деятельности таких структур и показано их эффективность в содействии сферы привлечения инвестиций. Рассмотрены специфические особенности создания индустриальных парков. Приведены основные характеристики индустриальных парков в Украине.*

**Ключевые слова:** индустриальный парк, инновационная инфраструктура, иностранные инвестиции, специальные экономические зоны.

**N. Rud, Yu. Gnuskova, O. Marchuk**  
**INDUSTRIAL PARKS IN UKRAINE: FEASIBILITY OF ESTABLISHING**

*This paper investigates the creation and operation of industrial parks in Ukraine, shows international experience of such structures and reveals their effectiveness and facilitation of attracting investment. We consider the specific features of the creation of industrial parks. The basic characteristics of industrial parks in Ukraine are being investigated.*

**Keywords:** Industrial Park, innovation infrastructure, foreign investment, special economic zones.

**Постановка проблеми.** Аналіз світового досвіду показує, що економічне зростання розвинутих країн та їх окремих регіонів вже давно базується на використанні сфери знань і високих технологій у виробництві, а їх ефективно поєднання гарантує прогресивний розвиток країни. Однією з найбільш вдалих форм такої інтеграції є індустріальні парки. Світова практика не залишає сумніву щодо ефективності та надзвичайної корисності таких типів спеціальних економічних зон (СЕЗ), як індустріальні парки. Ці зони відзначаються високим рівнем інноваційної діяльності, являють собою форму інтеграції науки та виробництва. Отже, головна ідея, покладена в основу створення такого типу організаційних структур, полягає у створенні у певному обмеженому просторі виключно сприятливих умов для інноваційної діяльності та інвестиційної привабливості регіону.

Залучення інвестицій є однією із проблем створення індустріальних парків України. Найбільшою перешкодою на цьому шляху є недосконалість законодавства та надмірна тривалість реалізації інвестиційної фази проекту для інвестора, що зумовлено бар'єрами щодо набуття права власності чи отримання в оренду земельної ділянки, відсутністю виробничої інфраструктури. Численні погодження та дозволи для початку будівництва інфраструктури розтягнуті в часі та потребують значних організаційних і фінансових витрат. «Час до ринку» для багатьох проектів іноді складає від 3 до 5 років і більше, що нівелює суть проекту та робить його неконкурентним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукові дослідження щодо функціонування СЕЗ в Україні здійснюють такі науковці як М. Влашук, В. Лушкін, О. Єгорова, О. Мазур, О. Чмир та інші. Вчені зробили значний внесок в аналіз досвіду функціонування СЕЗ в Україні, зокрема індустріальних парків.

**Мета статті** – дослідити роль індустріальних парків, як об'єктів інноваційної інфраструктури, їх призначення та вплив на інноваційний розвиток України.

**Виклад основного матеріалу.** У 2012 р. в економіку України іноземними інвесторами вкладено 6013,1 млн \$ прямих інвестицій (акціонерного капіталу).

Обсяг внесених з початку інвестування в економіку України прямих іноземних інвестицій (акціонерного капіталу) на 31 грудня 2012 р. становив 54462,4 млн. \$, що на 8,2% більше обсягів інвестицій на початок 2012 р. Протягом останніх років обсяг прямих іноземних інвестицій в Україну у розрахунку на душу населення залишається на досить низькому рівні – близько 1000 дол. США, тоді як у сусідніх державах, які є і конкурентами України за інвестиції, даний показник



набагато вищий: Чехії – 7418 дол. США, Болгарії – 6226 дол. США, Казахстані – 3706 дол. США, Польщі – 3155 дол. США, Румунії – 2350 дол. США [15].

На даний час Україна поступається основним конкурентам у боротьбі за інвестиції. Надходження іноземних інвестицій в Україну збільшується, проте до 2010 року позитивна тенденція була зумовлена зростанням обсягів глобальних інвестиційних потоків. Водночас Польща, Туреччина, Росія, Чехія з 1998 р. почали формувати портфелі інструментів і стимулів, що сприяють залученню іноземних інвестицій.

Як показує досвід відзначених вище держав, одним із дієвих інструментів і водночас стимулів сприяння інвестуванню є створення на території країни індустріальних парків (визначення земельних ділянок, привабливих для започаткування на них промислового виробництва, облаштування їх необхідною інженерно-технічною інфраструктурою).

Результативні показники дієвості індустріальних парків, як інструменту для залучення інвестицій, на прикладі Чехії (дані Чеського агентства сприяння інвестуванню CzechInvest):

1) 100 індустріальних парків створено за державної підтримки;  
2) 3000 га ділянок підготовлено (в середньому один парк – 30 га), а це становить 0,038% від загальної площі Чехії;

3) 200 млн євро витрачено з державного та місцевих бюджетів;

4) 450 інвестиційних проектів успішно реалізовано;

5) 9,0 млрд євро інвестицій залучено на ці ділянки (в середньому по 3 млн євро на 1 га);

6) 70000 нових робочих місць створено.

Слід відмітити і хронологію успіху Туреччини:

1) 2000 рік – прийняття закону «Про організовані промислові зони»;

2) створено 263 індустріальних парків, із них – 148 діючих;

3) 94,0 млрд \$ інвестицій залучено за 8 років (2002–2010);

4) ВВП – 231 млрд \$ (2002);

5) ВВП – 736 млрд \$ (2010);

6) експорт – 36,0 млрд \$ (2002);

7) експорт – 114,0 млрд \$ (2010).

Росія також розпочала діяльність зі створення індустріальних парків:

1) заплановано створення 204 індустріальних парків у 83 регіонах Росії;

2) 51 – розпочали свою діяльність;

3) успішний приклад: Калузька область – близько 6,0 млрд євро інвестицій.

Держінвестпроект докладає значних зусиль для створення індустріальних парків на території України. Так, з 4 вересня 2012 року набрав чинності Закон України «Про індустріальні парки», підготовлений робочою групою під керівництвом голови Держінвестпроекту В. Каськіва. Закон створює додаткові переваги для започаткування промислового виробництва на території України, а саме:

1) «час до ринку» для інвесторів скоротиться з 2–3 років до 6–9 місяців завдяки підготовці промислових майданчиків, облаштованих необхідною інфраструктурою;

2) надається законний доступ до земельних ділянок державної чи комунальної власності та забезпечення захисту від зловживань;

3) визначається чіткий механізм взаємодії держави, ініціаторів створення, керуючих компаній та учасників індустріальних парків;

4) забезпечення прозорості процедур започаткування індустріальних парків і вибору керуючих компаній шляхом встановлення вичерпних переліків документів та визначення чітких критеріїв відбору;

5) передбачення інструментів державного стимулювання створення індустріальних парків на території України.

Завдяки створенню індустріальних парків, Туреччина продемонструвала фантастичне економічне зростання і протягом 10 років примножила ВВП держави у 3,5 рази. Україні вкрай важливо виробити подібні точки розвитку. Індустріальні парки значно покращать ситуацію із залученням інвестицій у розвиток індустрії держави і стануть тими окремими територіями, які сприятимуть стрімкому розвитку України.

Водночас з підготовкою до прийняття згаданого вище Закону, Держінвестпроектом за допомогою регіональних центрів з інвестицій та розвитку проводилась інвентаризація земельних ділянок, придатних для створення індустріальних парків, в усіх регіонах України. На даний час опрацьовано більше 90 промислових майданчиків, 43 з яких вже пропонуються потенційним

інвесторам для започаткування індустріального парку, а для 15 потенційних індустріальних парків підготовлено концептуальні дизайни.

Україні потрібні нові стимули зростання економіки, якими мають стати спеціальні економічні території, – індустріальні парки. Індустріальні парки – це спеціальні території, на яких буде створено всю необхідну для ведення бізнесу інфраструктуру. Прикладами ефективності роботи подібних спеціальних економічних зон у світі можуть бути: у Туреччині було створено 260 особливих виробничих та технологічних зон, із яких близько 140 вже діють. Завдяки їм протягом останніх 10 років Туреччина змогла збільшити ВВП країни у 3,5 рази, що є безпрецедентним випадком економічного росту у XXI столітті. Крім того, є позитивні приклади роботи подібних спеціальних територій у Китаї, В'єтнамі та Польщі. Окремо можна виділити успіх Калузької області Російської Федерації, яка за короткий час завдяки масштабним інвестиціям в інфраструктуру (понад 3,3 млрд. руб при населенні області майже 1 млн. чоловік) залучила понад 7 млрд. доларів промислових інвестицій. Це в декілька разів більше, ніж залучила вся Україна протягом останнього року [8].

Подібні економічні зони вже створювали та продовжують активно розвивати усі найближчі сусіди України, тож державі для конкурентоспроможності економіки необхідно забезпечити промисловим інвесторам легке входження на український ринок. Після створення економічних зон в Угорщині та Словаччині бізнес припинив активно цікавитися Закарпатською областю, яка до цього посідала перші позиції за темпами залучення інвестицій в Україні.

Індустріальні парки є одними з найпоширеніших видів спеціальних економічних зон (СЕЗ), які створені як в економічно розвинутих країнах, так і у країнах, що розвиваються. Більшість країн, які є сусідами України, тобто прямими конкурентами за інвестиції в регіоні, також активно розвивають систему індустріальних парків. Як показує практика, індустріальні парки в Україні часто ідентифікують із «віртуальним» фіскальним простором, у якому зменшене податкове навантаження. Насправді, індустріальний парк – це лише юридично відокремлена земельна ділянка, призначена для розміщення промислового виробництва. Площа земельної ділянки або сукупна площа суміжних земельних ділянок повинна становити не менше 15 гектарів та не більше 700 гектарів (згідно статті 8 ЗУ «Про індустріальні парки»). На них досить часто (але необов'язково) поширюються спеціальні режими економічної діяльності, в окремих випадках і особливий податковий режим, відмінний від загального.

Поширеність індустріальних парків обумовлена певними чинниками [7].

По-перше, вони сприяють підвищенню інвестиційної активності в економіці, адже сама суть функціонування індустріальних парків полягає у збільшенні інвестицій. Допуск в індустріальний парк, як правило, обмежений мінімальним обсягом інвестицій, який компанія має вкласти у розвиток виробництва. Крім того, виробництво в межах індустріального парку автоматично розширює попит на продукцію суміжних галузей промисловості, чим стимулює їх розвиток. Додатковим джерелом інвестицій також є бюджетні видатки на розбудову в межах індустріальних парків інфраструктури та логістики.

По-друге, індустріальні парки дозволяють легітимно (з точки зору дотримання норм і правил СОТ) субсидувати пріоритетні галузі промисловості, як правило, високотехнологічні. Будь-яка субсидія в кінцевому підсумку покликана зменшити витрати підприємств: держава може надавати її у формі бюджетних видатків на розвиток інфраструктури або звільнити підприємство від сплати частини податків. Безумовно, держава не може надавати таку допомогу для всієї економіки, оскільки просто не матиме фінансових ресурсів на реалізацію своїх функцій. Більше того, запровадження пільгового податкового режиму для всієї економіки не має сенсу, оскільки не потрібно стимулювати, наприклад, торгівлю чи експлуатацію природних ресурсів. Ці галузі, хоч і є важливими, проте не впливають на якісний розвиток економіки. Але існує комплекс галузей промисловості, які можуть принести значні економічні вигоди, навіть якщо вони сплачують досить незначні обсяги податків. Такими вигодами можуть бути інвестиції, робочі місця, приплив валюти, зростання доходів населення, попит на освіту тощо. Очевидно, що розвиток суднобудування чи літакобудування, навіть якби вони не приносили жодної копійки до бюджету, матиме набагато більше загальної користі для економіки та держави загалом, ніж добування й експорт газу та нафти, які дають наддоходи до бюджету. Через це держава готова відмовитися від частини власних доходів у вигляді податків заради того, щоб дані підприємства розміщувалися на її території. Індустріальні парки дозволяють надати особливо сприятливий режим економічної діяльності для таких галузей.

По-третє, розвиток індустріальних парків дозволяє економічно, екологічно та естетично структурувати населені пункти, «очистивши» міста від промислового виробництва. В останнє десятиліття існує тенденція до розширення середньої площі індустріальних парків, що пов'язано з бажанням органів влади сконцентрувати в них як новостворені підприємства, так і діючі промислові підприємства (фактично, винести їх за територію населеного пункту). Концентрація промислового виробництва на обмежених площах за межами житлових, історико-культурних та рекреаційних територій не лише робить економіку громади більш ефективною через зниження трансакційних витрат, але й дозволяє поліпшити якість життя й екологічний стан у відповідному населеному пункті. Уже зараз у багатьох європейських містах уся місцева промисловість концентрується виключно у межах індустріального парку.

Для України, міста якої становлять конгломерат із житлових масивів та екологічно шкідливих підприємств, даний аспект є вкрай важливим. Відзначимо, що попри значну поширеність індустріальних парків, існують і певні проблеми. На практиці багато індустріальних парків, особливо у країнах, що розвиваються, або взагалі незадіяні, або мають значний обсяг вільних площ [7]. Це обумовлено:

1) профіцитом створених потужностей – якщо ініціатором створення індустріального парку виступають місцеві громади, то виникає ситуація, коли кожна громада зазвичай намагається створити власний індустріальний парк, незважаючи на те, що поруч уже може функціонувати подібний парк;

2) обмеженістю терміну дій пільг – частими є випадки, коли компанії приходять в індустріальний парк на термін дії податкових пільг, після чого перебазовуються в інший індустріальний парк у межах або за межами країни, бажаючи отримати нові пільги;

3) слабкою та низькою ефективністю роботи щодо залучення інвесторів;

4) наявністю більш привабливих режимів економічної діяльності в сусідніх країнах.

Значною мірою дієвість індустріальних парків як інструментів стимулювання промислової активності визначається рядом регулятивних механізмів їх функціонування, поміж яких найважливішими є питання управління та власності, механізму залучення інвесторів і система стимулів й пільг, що надаються на їх території.

Розглянемо більш детально специфічні особливості створення індустріальних парків в Україні.

1. *Управляюча (керуюча) компанія та питання власності.* Ініціатором створення парку може виступати як держава, так і приватні інвестори. Водночас в Україні, як і в більшості країн, що розвиваються, приватні індустріальні парки, скоріш за все, у класичному вигляді не знайдуть зацікавленості у приватних інвесторів. Це пояснюється тим, що привабливість індустріальних парків для інвесторів полягає в тому, що певний суб'єкт (таким може бути лише держава) безкоштовно бере на себе частину їх витрат на ведення бізнесу. У такий спосіб інвестори (особливо іноземні) отримують премію за ризик, пов'язаний із нестабільністю ведення бізнесу у таких країнах, як Україна. Очевидно, якщо облаштуванням та забезпеченням діяльності індустріальних парків займатимуться приватні компанії, то вони перекинуть свої витрати на плечі учасників парку, включаючи власну норму прибутку. В результаті для інвесторів втрачаються економічні стимули для розміщення виробництва у приватному індустріальному парку. Як правило, ініціатором створення індустріального парку є органи місцевої влади, які зацікавлені у стимулюванні інвестиційної активності на своїй території. Вони краще обізнані з географічним, технологічним та інфраструктурним потенціалом, тому компетентніше можуть розробити бізнес-план індустріального парку, ніж спеціалісти центральних органів влади. Для облаштування території індустріального парку та подальшого її обслуговування створюється окрема юридична особа – керуюча компанія. У більшості випадків у кожному індустріальному парку діє власна окрема керуюча компанія. Водночас існує практика, коли керуюча компанія обслуговує декілька СЕЗ. Зокрема, у РФ у 2006 році була створена керуюча компанія ВАТ «Особливі економічні зони», у віданні якої знаходяться діючі та новостворювані особливі економічні зони Росії. Єдиним акціонером компанії є держава. Компанія також здійснює пошук та залучення інвесторів із найбільших міжнародних і російських корпорацій або незалежних спеціалізованих компаній середнього розміру [7].

У країнах Центрально-Східної Європи (Словаччина, Польща, Угорщина) діє дещо відмінна система і, на наш погляд, більш ефективна за відсутності чіткої адміністративної вертикалі, яка притаманна Росії. Оскільки ініціатором створення індустріального парку є муніципалітет, то у статутному фонді керуючої компанії йому належить контрольний або найбільший міноритарний

пакет акцій. Центральний уряд, здійснюючи політику стимулювання інвестицій, може викупити частину акцій для підтримки розвитку проекту, якщо вважатиме його ефективним. Інша частина акцій розподіляється між учасниками індустріального парку з метою забезпечення можливості впливати на діяльність керуючої компанії. Такий механізм зручний тим, що через інструменти додаткової емісії дозволяє здійснювати підтримку керуючої компанії з метою реалізації нових заходів щодо якіснішого забезпечення діяльності індустріального парку [7].

2. *Механізм залучення інвесторів.* Процес пошуку та переконання інвесторів, що саме даний індустріальний парк є привабливим для нього, є досить складним. Цим мають спільно займатися керуючі компанії, муніципалітети, регіональні та державні органи влади. Звичайно роль регіональної та місцевої влади досить значна у цьому процесі, проте вони (а тим більше керуючі компанії) не мають ресурсів для пошуку та залучення потужних іноземних інвесторів. Більше того, інвесторам складно визначити свої пріоритети, якщо одночасно вони отримують інформацію про десятки індустріальних парків. Для забезпечення ефективнішого пошуку інвесторів центральний уряд часто створює окремі органи центральної влади, метою яких є пошук іноземних інвесторів за кордоном для їх залучення до індустріальних парків. Зокрема, у Словаччині, яка «перетягнула» на свою територію виробничі потужності багатьох світових корпорацій, цим питанням займається центральне державне агентство розвитку торгівлі та інвестицій. Воно формує каталог пропозицій місцевих органів влади (тобто перелік доступних та запланованих індустріальних парків у країні) і пропонує інвестору найцікавіший для нього варіант. Очевидно, що іноземному інвестору зручніше вести діалог з однією структурою, яка знаходиться у столиці держави, ніж самостійно аналізувати десятки варіантів, які до того ж часто знаходяться на периферійних територіях [7].

3. *Інструменти державної підтримки.* Для стимулювання приходу бізнесу в індустріальні парки держава застосовує широкий перелік інструментів підтримки. Передусім, підтримка діяльності індустріальних парків з боку держави полягає у здійсненні інженерної підготовки ділянки, забезпеченні постачання газу, електричної та теплової енергії, води, функціонування системи водовідведення, проведення та налагодження транспортних комунікацій (автомобільні дороги, доступ до портів, аеропортів, залізничних колій), розбудові логістичної інфраструктури (адміністративні будівлі, складські приміщення тощо) [7].

Практика функціонування європейських та російських індустріальних парків дозволяє виділити такі форми державної підтримки:

а) співфінансування інвестиційних проектів: наприклад, інвестор презентує проект будівництва певного підприємства на території індустріального парку. На основі кошторису проекту держава фактично бере на себе частину зобов'язань з його фінансування через різні способи фінансової підтримки (умовні податкові пільги, прямий трансферт, пільговий кредит тощо). На цьому підтримка держави закінчується, а підприємство продовжує користуватися лише інфраструктурними послугами індустріальних парків;

б) опосередковане зменшення витрат інвесторів, окрім як обслуговування парку: держава може взяти на себе забезпечення підготовки, проживання та доставку необхідних кваліфікованих кадрів, охорону промислових об'єктів, частину соціального страхування, пільговий доступ до транспортної та логістичної інфраструктури тощо;

в) надання податкових пільг: держава може надавати окремі податкові пільги на постійній основі без цільової прив'язки. Такі методи застосовуються з метою стимулювання збільшення обсягів виробництва шляхом розширення фінансових ресурсів підприємств.

Види податкових пільг, які можна надавати учасникам індустріальних парків, досить різноманітні:

– податкові канікули, передусім зі сплати податку на прибуток, землю та нерухоме майно, зміст яких полягає в тимчасовому звільненні підприємства від сплати цих податків за умови спрямування коштів на інвестиційні цілі або збільшення виробництва й експорту продукції;

– знижені (пільгові) податкові ставки податку на прибуток, землю та нерухоме майно як менш витратна для держави альтернатива податковим канікулам;

– інвестиційний податковий кредит, який може бути двох видів: відстрочення сплати нарахованого податку (часто з додаванням відсотків за користування); спрямування нарахованого податку на інвестиційні цілі;

– податкова знижка, тобто зменшення бази оподаткування шляхом внесення витрат на інвестиційні цілі до складу валових витрат;

– прискорений метод податкової амортизації: застосовується у переважній більшості країн не лише в індустріальних парках, але й у загальній системі оподаткування. При цьому норми амортизації значно вищі за український варіант прискореної амортизації. Зокрема, у Канаді програмне забезпечення амортизується за нормою 50%, матеріальні основні фонди – 30–50, нерухомість – 20%. Метод прискореної амортизації спрямований на те, щоб досягти перевищення фіскальної амортизації над економічною (бухгалтерською). Завдяки цьому підприємства отримують значний ресурс для інвестицій, не сплачуючи податок на прибуток чи відсотки за користування кредитом;

- амортизаційна премія, що передбачає можливість віднесення на валові витрати додаткового відсотка вартості основних засобів;
- звільнення від сплати ПДВ та мита обладнання, яке не виробляється у країні;
- знижена ставка відрахувань до соціальних фондів із фонду оплати праці працівників, зайнятих науково-дослідними розробками;
- можливість виписувати податкові векселі при імпорті продукції;
- звільнення чи пом'якшення вимог щодо обов'язкового продажу валютної виручки.

В кінцевому підсумку всі заходи державної підтримки зводяться до зменшення витрат інвесторів. Таким чином, держава для залучення інвестицій має не створювати видимість формування сприятливого економічного середовища, а взяти на себе частину реальних витрат.

Незрозумілими є дії держави щодо міжнародної співпраці технопарків. Найбільшими організаціями є Європейська мережа бізнес-інноваційних центрів та Міжнародна асоціація наукових та технологічних парків. Європейська мережа бізнес-інноваційних центрів (BIC) була заснована в 1984 р. як результат спільної ініціативи Європейської комісії, європейських промислових лідерів та центрів бізнесу та інновацій. Мережа наразі є найвагомішою неурядовою пан-європейською мережею, що об'єднує понад 200 центрів підтримки бізнесу та інновацій і подібних організацій, таких як інкубатори, центри інновацій та підприємництва тощо, у новій, збільшеній Європі. [4]. Міжнародна асоціація наукових та технологічних парків (IASP) є всесвітньою мережею наукових та технологічних парків. Вона була створена у 1984 р. та має штаб-квартиру в Іспанії. IASP пов'язує професіоналів з наукових парків з усіх країн світу та надає послуги, що прискорюють зростання та ефективність її членів. Учасники покращують конкурентоспроможність компаній та підприємців у містах, де вони розташовані і роблять свій внесок у глобальний економічний розвиток шляхом інновацій, підприємництва й трансферу технологій. У 2008 році IASP мала 359 членів, що охоплювали 150 тисяч компаній, розташованих у парках членів IASP у 74 країнах у п'яти регіональних підрозділах: IASP Азія – Тихоокеанський регіон, IASP Європа, IASP Латинська Америка, IASP Північна Америка, IASP Західна Азія. У період між 1984 та 2007 роками. IASP організувала 24 світові та 42 регіональні конференції. IASP також є членом-засновником Світового союзу інновацій [4].

Україна не є членом жодної з них, хоча річні внески складають 200–600 доларів. Представники влади посиляються на відсутність коштів для фінансування участі технопарків у міжнародних організаціях. Таким чином, держава відверто ігнорує міжнародну спільноту і забуває про те, що на сьогодні нормального науково-технологічного розвитку неможливо досягти ізольовано, дана сфера потребує тісної взаємодії та співпраці.

Досвід країн з розвинутою економікою засвідчує, що створення індустріальних парків в країні значно підвищує рівень інвестиційної привабливості, сприяє розвитку інфраструктури, створенню нових робочих місць. В Україні даний процес тільки набирає обертів і досліджень.

Найбільш відомим індустріальним парком, діючим, є: індустріальний парк «Соломоново», орієнтований на задоволення зростаючого попиту на промислову нерухомість, що зумовлений перенесенням виробництва із Західної та Центральної Європи далі на Схід. Надзвичайно вигідне розташування індустріального парку, адже знаходиться на території СЕЗ «Закарпаття» по сусідству із заводом з виробництва автомобілів "SKODA" і "VOLKSWAGEN" ЗАТ "Єврокар" та орієнтований на підприємства автомобілебудівної та автоагрегатної промисловості [10]. «Єврокар» планує побудувати виробничі цехи, а виробник комплектуючих буде мати можливість викупити їх або взяти в довгострокову оренду. Крім того, земельні ділянки будуть забезпечені інженерними комунікаціями та необхідною інфраструктурою. Індустріальний парк «Соломоново» має стати науковим центром розробок українських технологій у галузі автомобілебудування.

Досить цікавим проектом щодо створення індустріальної зони є програма створення індустріального парку «Новий Крим» в м. Джанкой, в м. Кременчук індустріальний парк

«Центральний», а також діючий індустріальний парк «Свема», де в даний період відбувається відпрацювання нової економічної моделі «потрійної спіралі». У таблиці 1 наведено основні характеристики діючих концепцій окремих індустріальних парків (ІП).

Таблиця 1. Основні характеристики окремих індустріальних парків України\*

Показники	ІП «Центральний»	ІП «Славута»	ІП «Свема»	ІП «Рясне -2»	ІП «Новий Крим»
Місце розташування	м. Кременчук, північний промисловий район: ст. Кагамлицька – залізничні колії Крюків – Кременчук	Земельна ділянка знаходиться у межах промислової зони міста поряд з виробництвом санітарно-гігієнічної кераміки «Славутський комбінат «Будфарфор» та виробництва меблів для ванних кімнат ТОВ «Аква-Родос».	Сумська область, м. Шостка, вул. Гагаріна, 1	Промислова зона Рясне – 2 у м. Львові	Крим, м. Джанкой
Площа	168,55 га	50 га	92 га	150 га	25 га
Функціональне призначення	Створення ІП включає детальну забудову відведеної земельної ділянки з облаштуванням сучасної інженерно-транспортної інфраструктури для розміщення на ній виробничих, складських та адміністративних приміщень.	Створення ІП «Славута» для розміщення на ділянці виробничих, складських та адміністративних приміщень. Перевага підприємствам металообробки, текстильним, виробництву будівельної промисловості, з обробки деревини, тваринних, харчових продуктів, і смакових речовин;	Розбудова сучасного виробничо-промислового комплексу з розвинутою інженерно-транспортною інфраструктурою, складськими та адміністративними приміщеннями.		Переробка сільськогосподарської продукції. Машинобудування і складальна промисловість. Будівельна індустрія. Легка промисловість.
Ініціатор створення індустріального парку	Кременчуцька міська рада, комунальне підприємство «Кременчук Інвест»	Славутська міська рада	Шосткінська міська рада.	Львівський регіональний центр з інвестицій та розвитку і Львівська міська рада	Джанкойська міська рада
Термін дії	30 років	49 років	30 років	49 років	49 років
Очікуваний обсяг надходжень	Мінімальна кількість робочих місць з одного господарюючого суб'єкта – 20	Мінімальна кількість робочих місць з одного господарюючого суб'єкта – 500		До 12 тис. робочих місць. Близько 38 млн. грн. надходжень щорічно.	Від 450 до 1130 робочих місць. Обсяг залучених інвестицій від 23 до 115 млн. грн.

**Висновки.** Індустріальні парки не лише у розвинутих, але і в країнах, що розвиваються, стають невід'ємною частиною економічної системи. Вони є інструментом стимулювання промислового виробництва, залучення інвестицій, збільшення зайнятості населення, вирівнювання рівня економічного розвитку регіонів. Загалом ідея індустріальних парків є досить перспективною та економічно вигідною як для підприємств, так і для держави. У даному контексті Україна, яка відчуває гострий дефіцит інвестиційних ресурсів і має деформовану структуру промисловості, має активно розвивати систему індустріальних парків. Доцільною є реалізація політики поетапного створення індустріальних парків: 1) розробка чіткої зрозумілої концепції розвитку індустріальних парків, яка має бути своєрідним проспектом із демонстрацією витрат і вигід держави та бізнесу, а також містити дієві механізми створення індустріальних парків, максимально наближеними до української практики; 2) прийняття ЗУ «Про проведення ряду пілотних проектів на одній із депресивних територій», який має стати «промо-роликом» для інвесторів та сформує певні позитивні очікування; 3) аналіз функціонування парків в українських умовах та формування законодавчої бази для широкого застосування індустріальних парків на території України.

На даний час Європа і світ зміщують центри промислової уваги на віддалені від густонаселених районів місця, переносючи туди індустріальне навантаження. Саме ці особливості слід взяти на «озброєння», розробляючи власну концепцію індустріального парку в Україні.

Поява таких парків є відповіддю на загальносвітові процеси глобалізації. Подібний формат має низку незаперечних переваг і зручностей для інвестора, зацікавленого у налагодженні сучасних технологій і випуску конкурентоспроможної в усьому світі продукції.

1. Чернадчук В.Д. Основи інвестиційного права України: навчальний посібник [2-ге вид., перероб. і доп.] / В.Д. Чернадчук, В.В. Сухонос, Т.О. Чернадчук; За заг. ред. В.Д. Чернадчука. – Суми: ВТД «Університетська книга»; К.: Видавничий дім «Княгиня Ольга», 2005. – 384 с.
2. Чудаєва І.Б. Технопарки світу: основні моделі та типи. // Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту. – 2010. – Випуск 2 (8). – С. 209–215.
3. Шкарлет С. М. Особливості функціонування та розвитку технопарків в Україні / С.М. Шкарлет, Л.А. Подимова [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://archive.nbuv.gov.ua/portal/soc\\_gum/ppei/2011\\_32/Shkerl.pdf](http://archive.nbuv.gov.ua/portal/soc_gum/ppei/2011_32/Shkerl.pdf).
4. Ремпф Г. Об'єднання в мережі інфраструктури підтримки інновацій та бізнесу / Г. Ремпф // Актуальні проблеми економіки. – 2010. – № 6. – С. 118–121.
5. Офіційний сайт Закарпатського інвестиційного агентства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [info@investments.uz.ua/ua](mailto:info@investments.uz.ua/ua).
6. Газета центральних органів виконавчої влади України «Урядовий кур'єр» від 20 лютого 2012 року [Електронний ресурс]. Режим доступу – <http://www.ukurier.gov.ua/uk/>.
7. Молдован О.О. Доцільність запровадження індустріальних парків в Україні / О.О. Молдован // Економіка промисловості. – 2011. – № 2. – С. 3–9.
8. Державне агентство по інвестиціях та управління національними проектами України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrproject.gov.ua/ru/node/2013>.
9. Feasibility Study For Establishing Hancesti Industrial Park / Developed by Business Consulting Institute/ January 2011. [http://miepo.md/public/files/Media/Feasibility\\_study\\_Hincesti\\_english.pdf](http://miepo.md/public/files/Media/Feasibility_study_Hincesti_english.pdf)
10. Попович О.С. Науково-технологічна та інноваційна політика: основні механізми формування та реалізації [Текст] / О.С. Попович. – К.: Фенікс, 2005. – 246 с.
11. Інформаційний вісник «Енергія розвитку» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrproject.gov.ua/page/prezentatsiini-materiali>.
12. Гуржій А.М. Інноваційна діяльність в Україні: монографія / А.М. Гуржій, Ю.В. Каракай, З.О. Петренко та ін. – К.: УкрІНТЕІ, 2007. – 144 с.
13. Мазур О.А. Технологічні парки. Світовий та український досвід / О.А. Мазур, В.С. Шовкалюк. – К.: Прок-Бізнес, 2009. – 70 с.
14. Гриньов Б.В. Технологічні парки України / Б.В. Гриньов, І.Б. Гагауз, Н.І. Єфімова, Т.О. Коваленко. – Центр «Харківські технології». – 2002. – 184 с.
15. Концепція державної цільової економічної програми розвитку інвестиційної діяльності на 2011-2015 роки [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/>.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.

УДК 514.18

**В.П. Самчук***Луцький національний технічний університет***ЗГУЩЕННЯ КАРКАСІВ ДИСКРЕТНО ПРЕДСТАВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ НА  
ОСНОВІ ПЕРЕРЕЗПОДІЛУ ФОРМУЮЧОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

*Запропоновано алгоритм перерахунку параметрів функції розподілу формуючого навантаження залежно від кроку дискретизації поверхні зі збереженням вихідних умов формування моделі дискретної поверхні. Це дозволяє змінювати щільність вузлів каркасу поверхонь при побудові моделей різноманітних об'єктів в машинобудуванні та будівництві. Отримані результати дають можливість поширити алгоритм на довільні криволінійні системи координат.*

*Ключові слова:* згущення, дискретні каркаси, дискретне геометричне моделювання.

*Рис. 7. Форм. 8. Літ. 5.*

**В.П. Самчук****СГУЩЕНИЕ КАРКАСОВ ДИСКРЕТНО ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
НА ОСНОВЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМИРУЮЩЕЙ НАГРУЗКИ**

*Предложен алгоритм определения параметров функции распределения формообразующей нагрузки в зависимости от шага дискретизации поверхности при сохранении начальных условий формирования модели дискретной поверхности. Это позволит управлять плотностью распределения узлов каркаса поверхностей при построении моделей разнообразных объектов в машиностроении и строительстве. Полученные результаты дают возможность распространить алгоритм на любые криволинейные системы координат.*

*Ключевые слова:* сгущение, дискретные каркасы, дискретное геометрическое моделирование.

**V.P. Samchuk****THICKENING FRAMES DISCRETE REPRESENTATION OF THE SURFACE  
THROUGH THE REALLOCATION OF FORMING LOAD**

*Solving tasks of discrete geometric modeling of various objects and processes there is a problem in finished model of spot carcasses node density. This is necessary to get more accurate solution of the problem, to clarify the results received on certain local areas generated image or to reduce the amount of discrete information necessary to represent geometric models of structural constructions.*

*The purpose of work is to analyze the well-known methods of thickening carcasses discretely represented surfaces conversion and algorithm development and formative load to determine the new canon distribution by changing the discretization grid in an arbitrary coordinate system.*

*In general, the distribution of effort in forming the grid can be specified as an arbitrary functional dependence and arbitrary set of values, so the solution of the problem of condensation discretely presented a grid of rectangular cells in an arbitrary curvilinear coordinate system is to reallocate effort between the nodes of the new grid with a modified sampling.*

*To solve the problem using the principle of beam cell, whereby the efforts of arbitrary concentrated force gradually transferred first to the main beam, then the nodes leaning main beam on the secondary beams, and are transmitted to the nodes of a discrete grid cells. Nodes that are transmitted forming load cell of arbitrary rectangular form discrete structures.*

*The received results allow thickening frames of discrete surfaces represented in order to get a more accurate model or specify received results on certain local areas. They allow to expand nodes in discrete carcass and to reduce the amount of numerical data necessary for formed model.*

*Keywords:* node density, discrete carcass, discrete geometric modeling.

**Постановка проблеми.** Під час вирішення задач дискретного геометричного моделювання різноманітних об'єктів та процесів виникає проблема згущення точкового каркасу моделі з метою отримання більш точного розв'язку або уточнення отриманих результатів на певних локальних ділянках сформованого образу.

Крім задач згущення важливою є і обернена задача, яка полягає у зменшенні густоти дискретної сітки, що дозволяє, у свою чергу, зменшити об'єм дискретної інформації, необхідної для представлення тієї чи іншої геометричної моделі особливо при формуванні структурних конструкцій.

Основним джерелом параметрів, за допомогою яких враховуються геометричні вимоги до дискретних моделей, виступає зовнішнє формуєтворююче навантаження [1]. Тому при вирішенні задач згущення каркасів, якими представляються модельовані об'єкти, виникає необхідність визначення закону, за яким необхідно змінити розподіл формуєтворюючого навантаження на вузли, для забезпечення зменшення кроку дискретизації і, як наслідок, для отримання більш точного розв'язку.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню згущення дискретних каркасів геометричних образів присвячені численні роботи вчених, що працюють у галузі дискретного геометричного моделювання, серед яких слід виділити публікації [2 – 5]. Проте в них не розглядалися задачі згущення сіток з комірками у формі довільних чотирикутників. В опублікованих працях відсутні дослідження, у яких крок дискретизації моделі визначається через параметри зовнішнього формоутворюючого навантаження у вузлах сітки.

**Формування цілей роботи.** Проаналізувати відомі методи згущення каркасів дискретно представлених поверхонь та розробити алгоритм перерахунку формоутворюючого навантаження з метою визначення нового закону його розподілу при зміні дискретизації сітки в довільній координатній системі.

**Основна частина.** У загальному випадку розподіл формуючих зусиль у вузлах сітки може бути заданий як довільною функціональною залежністю так і множиною довільних значень, тому розв'язок задачі згущення дискретно представленої сітки з чотирикутними комірками у довільній криволінійній системі координат полягає у перерозподілі зусиль між вузлами нової сітки зі зміненою дискретизацією. Якщо навантаження розглядається як реальне, тоді його необхідно дискретизувати і звести до вузлового, враховуючи навантажені площі комірок та топологію дискретної сітки.

Для розв'язання поставленої задачі доцільно використати принцип балкової клітки, згідно з яким зусилля від довільної сили  $P$  (рис. 1) спочатку передається на балку настилу  $AB$ , потім у вузлах  $A$  та  $B$  – на головні балки 1 - 4 та 2 - 3 з яких розподілиться у точках 1, 2, 3 та 4. Вузли 1, 2, 3 та 4 формують чотирикутну комірку довільної дискретної структури.

Розглянемо елемент сітки в декартовій прямокутній системі координат (рис. 2). Нехай у межах комірки в точці  $O$  прикладена одинична сила  $\bar{H}_0 = 1$ . Замінімо систему (рис. 2) статично еквівалентною. Для цього у вузлах комірки прикладемо функції впливу реакцій  $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{H}_3, \bar{H}_4$  (рис. 3).

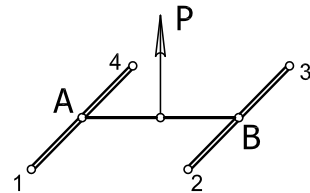


Рис. 1. Схема передачі зусилля за принципом балкової клітки

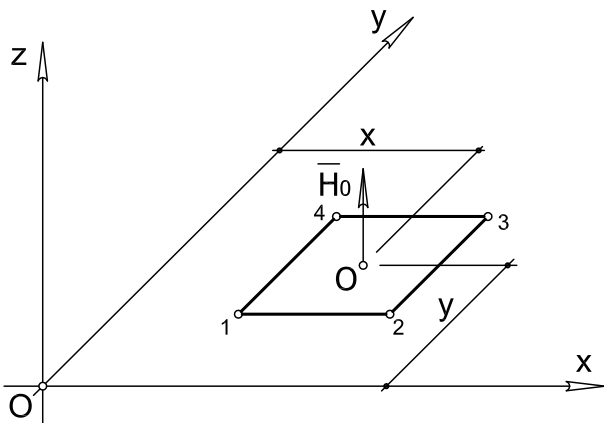


Рис. 2. Елемент сітки в декартовій системі координат

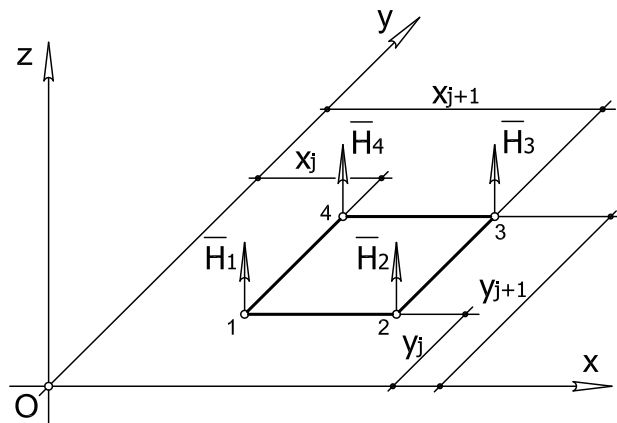


Рис. 3. Статично еквівалентна система

Щоб визначити невідомі функції  $\bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{H}_3, \bar{H}_4$  необхідно на систему (рис. 3) накласти додаткові умови, які випливають з властивостей прямокутника. Розглянемо алгоритм знаходження  $\bar{H}_1$ , та покладемо, якщо точка  $O(x, y)$  прикладання сили  $\bar{H}_0 = 1$  переміститься у вузол 1, тоді функція  $\bar{H}_1 = 1$ ; якщо  $\bar{H}_0 = 1$  переміститься на будь-яку пряму, що не проходить через точку 1 (точки 2 - 3 чи 3 - 4), тоді  $\bar{H}_1 = 0$ . Аналогічно формуються вимоги до функцій  $\bar{H}_2, \bar{H}_3$  та  $\bar{H}_4$ .

Запишемо визначники, які представляють подвоєні площі трикутників  $\Delta O23$  та  $\Delta O34$  (рис. 4):

$$S_2(x, y) = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x & y & 1 \end{vmatrix}, \quad S_3(x, y) = \begin{vmatrix} x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \\ x & y & 1 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

кожен з яких є лінійною функцією від  $x$  та  $y$ . Добуток  $S_2$  та  $S_3$  формує функцію другого порядку і забезпечує умову належності точки  $O(x, y)$  прямим 2 - 3 та 3 - 4. Таким чином забезпечується умова  $\bar{H}_1 = 0$  при  $\bar{H}_0 = 1 \in [2,3]$  або  $\bar{H}_0 = 1 \in [3,4]$ .

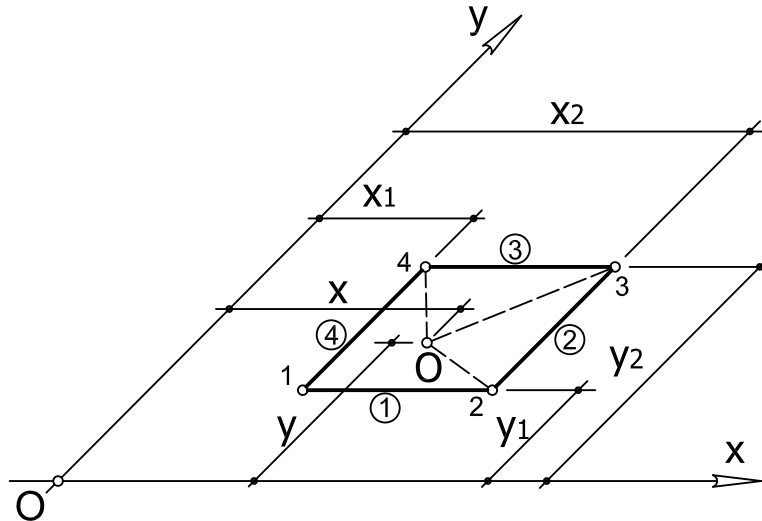


Рис. 4. Схема формування визначників  $S_i$

Для забезпечення умови  $\bar{H}_1 = 1$  при переміщенні одиничної сили в точку  $O(x, y)$  вводиться нормуючий множник  $h_1$ .

Отже, функція впливу  $\bar{H}_1$  має вигляд:

$$H_1(x, y) = h_1 S_2(x, y) S_3(x, y). \quad (2)$$

Коефіцієнт  $h_1$  знаходиться з поставленої умови:

$$h_1 S_2(x_1, y_1) S_3(x_1, y_1) = 1, \quad (3)$$

$$h_1 = \frac{1}{T_4 T_2}, \quad (4)$$

де  $T_4 = S_2(x_1, y_1) = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \end{vmatrix}$  та  $T_2 = S_3(x_1, y_1) = \begin{vmatrix} x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \end{vmatrix}$  значення функцій у

точці  $(x_1, y_1)$ .

Рисунок 5 ілюструє випадки, коли одинична сили послідовно співпадає з вузлами комірки. Відповідні функції впливу стають рівними добуткам площ трикутників побудованих на основах що не проходять через точку  $O(x, y)$ . З рис. 5 легко зрозуміти принцип за яким прийнята нумерація констант  $T$ .

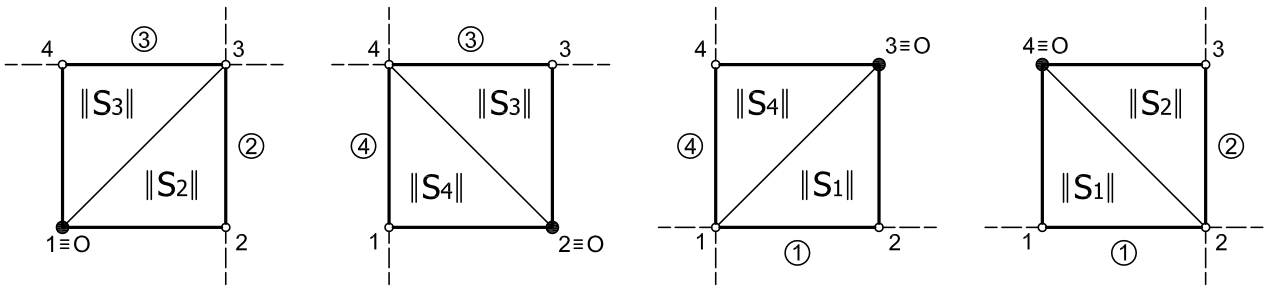


Рис. 5. Принцип формування нумерації констант  $T$

Аналогічно знаходяться вирази для функцій впливу в точках 2, 3 та 4:

$$\begin{aligned} \bar{H}_1(x, y) &= \frac{S_2(x, y)S_3(x, y)}{T_4 T_2}, & \bar{H}_2(x, y) &= \frac{S_3(x, y)S_4(x, y)}{T_1 T_3}, \\ \bar{H}_3(x, y) &= \frac{S_4(x, y)S_1(x, y)}{T_2 T_4}, & \bar{H}_4(x, y) &= \frac{S_1(x, y)S_2(x, y)}{T_3 T_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Кожна з функцій впливу (5) являє собою добуток двох лінійних функцій, який в загальному випадку представляється у виді:

$$\bar{H}_i(x, y) = (a_i + b_i x + c_i y)(d_i + e_i x + f_i y),$$

де  $i$  – номер функції впливу;

$a, b, c, d, e, f$  – коефіцієнти які залежать від координат вузлів комірки.

Реакції у вузлах однієї комірки від повного навантаження  $q(x, y)$  обчислюються як подвійний інтеграл по її площі:

$$H_i = \iint_{\Omega} \bar{H}_i(x, y) q(x, y) d\Omega, \quad (6)$$

де  $i$  – номер вузла комірки;

$\bar{H}_i(x, y)$  – функції впливу у відповідних точках;

$q(x, y)$  – функція формоутворюючого навантаження;

$d\Omega$  – елемент площі.

Щоб отримати значення навантаження в кожному вузлі дискретної сітки необхідно просумувати значення реакцій, знайдених за формулою (6) для одного і того ж вузла сусідніх комірок (рис. 6).

Для внутрішніх вузлів сітки з чотирикутними комірками навантаження обчислюється за формулою:

$$P_{i,j} = H_{i-1,j-1}^3 + H_{i,j-1}^4 + H_{i,j}^1 + H_{i-1,j}^2, \quad (8)$$

де верхній індекс – це номер вузла окремої комірки  $i, j$ .

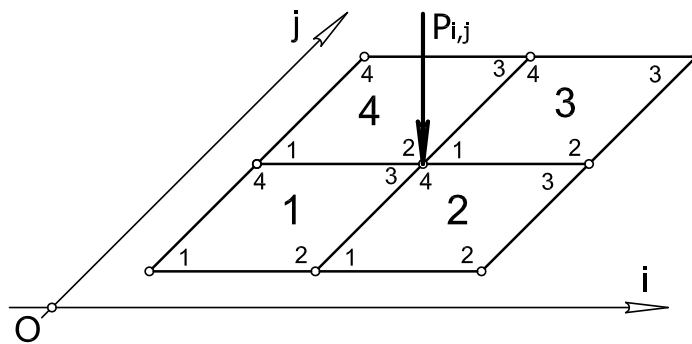


Рис. 6. Формування повного навантаження у вузлі сітки

Легко переконатись, що усе залишається справедливим і для довільної чотирикутної комірки у якої три точки не лежать на одній прямій. Тому даний спосіб можна поширити на криволінійні системи координат для дискретизації функції навантаження та приведення його до вузлового.

Вирішуючи задачі формоутворення поверхонь на планах сформованих в криволінійних системах координат, для обчислення функцій впливу найпростіше використати формули переходу між декартовою та відповідною криволінійною системою. Наприклад, для деяких криволінійних системи координат:

$$\text{полярної} - x = \rho \cos(\varphi), y = \rho \sin(\varphi),$$

$$\text{еліптичної} - x = a \operatorname{ch}(\xi) \cos(\eta), y = a \operatorname{sh}(\xi) \sin(\eta),$$

$$\text{параболічної} - x = \xi \eta, y = \frac{1}{2}(\xi^2 - \eta^2).$$

В багатьох випадках подвійний інтеграл (6) простіше обчислювати не в прямокутній системі координат, а в криволінійній яка відповідає закону формування горизонтальної проекції поверхні. Якщо дискретна сітка співпадає з координатними лініями криволінійної системи координат, тоді суттєво спрощується вид області інтегрування та весь процес інтегрування вцілому.

Елемент площі  $d\Omega$  для основних криволінійних систем координат:

$$\text{полярна} - d\Omega = \rho d\rho d\varphi,$$

$$\text{еліптична} - d\Omega = a^2(\operatorname{sh}^2(\xi) + \sin^2(\eta))d\xi d\eta,$$

$$\text{параболічна} - d\Omega = (\xi^2 + \eta^2)d\xi d\eta.$$

**Приклад.** Нехай на полярній дискретній сітці з заданим опорним контуром (рис. 7) необхідно сформулювати модель елемента конструкції у формі кільцевого сектора під дією формуючого навантаження виду  $q(\rho, \varphi) = 3 + 2\rho - \varphi$ .

$$\text{Параметри дискретизації: } \rho \in [1; 4], \varphi \in \left[0; \frac{\pi}{3}\right].$$

Крок дискретної сітки в радіальному та коловому напрямках:  $\delta = 1$ ,  $\varepsilon = \frac{\pi}{12}$ .

Перед тим, як описувати модель сітки системою скінчено-різницевих рівнянь, необхідно дискретизувати формуюче навантаження, привівши його до вузлового.

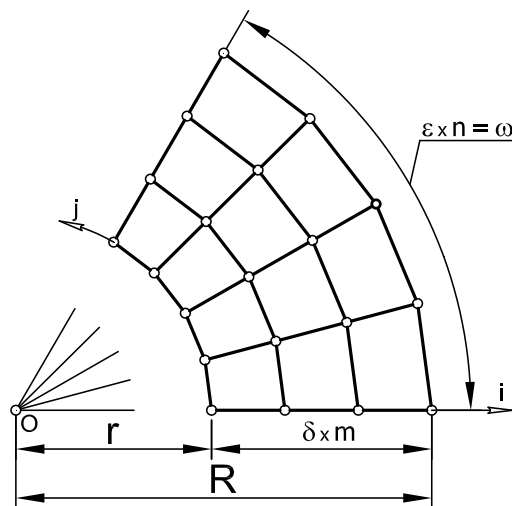


Рис. 7. План поверхні в полярній системі координат

Алгоритм обчислень:

1. Послідовно для чотирьох вершин кожної з комірок сітки знаходяться функції впливу (5), використовуючи формули переходу від полярної до прямокутної системи координат:

$$\begin{aligned}\bar{H}_{i,j}^1(x_i, y_j) &= \frac{S_2(x_i, y_j)S_3(x_i, y_j)}{T_4 T_2}, & \bar{H}_{i,j}^2(x_i, y_j) &= \frac{S_3(x_i, y_j)S_4(x_i, y_j)}{T_1 T_3} \\ \bar{H}_{i,j}^3(x_i, y_j) &= \frac{S_4(x_i, y_j)S_1(x_i, y_j)}{T_3 T_4}, & \bar{H}_{i,j}^4(x_i, y_j) &= \frac{S_1(x_i, y_j)S_2(x_i, y_j)}{T_3 T_1}\end{aligned}$$

де  $i, j$  – нумерація комірок сітки в глобальній системі координат (за номером лівої нижньої точки),  $i \in [0; 3]$ ,  $j \in [0; 4]$ .

2. За формулою (6) для кожної комірки окремо обчислюються інтерпольовані реакції у її вузлах від навантаження, розподіленого по площі комірки:

$$H_{i,j}^k = \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left( \int_1^4 \bar{H}_{i,j}^k(x(\rho, \varphi), y(\rho, \varphi)) q(\rho, \varphi) \rho d\rho \right) d\varphi,$$

де  $k$  – номер вузла окремої комірки,  $k \in [1; 4]$ ;

$i, j$  – нумерація комірок сітки в глобальній системі координат (за номером лівої нижньої точки),  $i \in [0; 3]$ ,  $j \in [0; 4]$ .

3. За формулою (8) обчислюються значення навантаження у внутрішніх вузлах сітки, сумуючи інтерпольовані реакції у спільних вузлах суміжних комірок сітки:

$$P_{i,j} = H_{i-1,j-1}^3 + H_{i,j-1}^4 + H_{i,j}^1 + H_{i-1,j}^2,$$

де  $i \in [1; 2]$ ,  $j \in [1; 3]$ .

На контурі сітки:

при  $i = 0$ ,  $j \in [1; 3]$ :  $P_{i,j} = H_{i,j-1}^4 + H_{i,j}^1$ , при  $i = m$ ,  $j \in [1; 3]$ :  $P_{i,j} = H_{i-1,j-1}^3 + H_{i-1,j}^2$ ,

при  $i \in [1; 2]$ ,  $j = 0$ :  $P_{i,j} = H_{i,j}^1 + H_{i-1,j}^2$ , при  $i \in [1; 2]$ ,  $j = n$ :  $P_{i,j} = H_{i-1,j-1}^3 + H_{i,j-1}^4$ .

**Висновки.** В роботі запропоновано алгоритм перерахунку формоутворюючого навантаження з метою визначення нового закону його розподілу при зміні дискретизації сітки в довільній координатній системі. Це дозволяє здійснювати згущення каркасів дискретно представлених поверхонь з метою отримання більш точної моделі або розрідження вузлів у дискретному каркасі з метою зменшення об'єму числових даних, необхідних для опису сформованої моделі.

1. Ковалев С.Н. Формирование дискретных моделей поверхностей пространственных архитектурных конструкций. Дисс. докт. техн. наук. – М.: 1986. – 348 с.
2. Пустюльга С.І. Дискретне визначення геометричних об'єктів числовими послідовностями. Дис. докт. техн. наук. 05.01.01. / К.: КНУБА, 2006. – 320с.
3. Найдыш В. М. Формирование загущения точечного ряда на основе разностных схем // Прикладная геометрия и инженерная графика. К.: Будівельник. – 1992. Выпуск 53. – С. 21-23.
4. Верещага В.М. Загальний метод згущення точкового ряду ДПК // Прикладна геометрія та інженерна графіка. К.: КНУБА. – 2002. Вип. 71. – С. 63-67.
5. Ахматшина О.І. Локальне загущення приконтурних чарунок дискретної сітки // Прикладна геометрія та інженерна графіка. К.: КНУБА. – 2003. Вип. 73. – С. 207-211.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2014.

УДК 621.746:669.2.8

Л.М. Самчук

Луцький національний технічний університет

**АНАЛІЗ МЕТАЛОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ТІ-С-ШХ15  
ОТРИМАНОЇ МЕТОДОМ СВС**

*В даній роботі представлено металографічне дослідження структури матеріалу ТІ-С-ШХ15 отриманої методом само поширюваного високотемпературного синтезу. Проведені дослідження показали наявність утворених інтерметалідів, які і забезпечать даному матеріалові високу міцність і твердість. Висновки та отримані результати спонукають до подальшого наукового та практичного дослідження.*

*Ключові слова: система ТІ-С-ШХ15, властивості, конструкційний матеріал, СВС-процес, застосування.*

*Форм. 1. Рис. 5. Літ. 10*

Л.М.Самчук

**АНАЛИЗ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТИ-С-  
ШХ15 ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СВС**

*В данной работе представлены металлографические исследования структуры материала ТИ-С-ШХ15 полученной методом же распространяемого высокотемпературного синтеза. Проведенные исследования показали наличие образованных интерметаллидов, которые и обеспечивают данному материалу высокую прочность и твердость. Выводы и полученные результаты побуждают к дальнейшему научного и практического исследования.*

*Ключевые слова: система ТИ-С-ШХ15, свойства, конструкционный материал, СВС-процесс, применение.*

L.M. Samchuk

**ANALYSIS SYSTEM FOR RESEARCH METALLOGRAFICHESKOHO TI-C-BBS15  
POLUCHENNOY BY SHS**

*In this work the metallographic investigation of the structure of the material TI-C-BBS15 obtained by similarly distributed high-temperature synthesis. Studies have shown the presence of intermetallic compounds formed, and that this material will provide high strength and hardness. Conclusions and findings encourage further research and practical research.*

*Key words: TI-C-BBS15, properties, construction material, SHS-process applications.*

**Постановка проблеми.** В світлі обмежених енергетичних ресурсів України проблема енергозаощадження є особливо актуальна. Пошуки розв'язання проблеми здійснюються по декількох напрямках. В першу чергу, це дослідження та впровадження у виробництво нових, прогресивних енергозберігаючих технологій порошкової металургії, саморосповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС-процесу), іонно-плазменного, лазерного напилення плівок, використання у якості сировини наноматеріалів та ін. [1]. Другим важливим резервом підвищення ефективності виробництва є використання відходів життєдіяльності людства, в тому числі і відходів машинобудівного комплексу[2].

Важливого значення вирішення цієї проблеми набуває і підвищення якості і надійності деталей і конструкцій за рахунок підвищення властивостей конструкційних матеріалів [3]. Одним із ефективних шляхів зменшення собівартості виготовлення деталей є використання відходів промислового виробництва. Особливу увагу приділяють відходам сталі ШХ15, що утворюються в процесі шліфування кілець шарикопідшипників. В Луцькому національному технічному університеті розроблено ряд технологічний процес отримання металевого порошку із шліфувальних шламів шарикопідшипникової сталі ШХ15[4].

**Мета статті:** провести аналіз металографічного дослідження для системи Ті-С-ШХ15 отриманої методом СВС.

**Виклад основного матеріалу.** Необхідність у матеріалі, що має високі експлуатаційні характеристики в екстремальних умовах з розвитком техніки і технологій постійно зростає. В залежності до поставлених вимог такі матеріали повинні бути зносостійкими, жароміцними, хімічно-інертними при контакті з агресивними рідинами і газами при високих температурах. Таким вимогам відповідають тугоплавкі з'єднання: карбіди, нітриди, бориди, силіциди, оксиди, а також тверді сплави і композиційні матеріали на їх основі. Отримання тугоплавких сполук і виробів з них пов'язане зі значними матеріальними витратами.

Винахід методу СВС (самопоширюваного високотемпературного синтезу) привело до розвитку нового напрямку як в науці про горіння, так і в технології отримання високоякісних матеріалів. На першій стадії розвитку цього процесу продукти реакції практично завжди були

достатньо слабоспеченими брикетами. В основному, для реалізації процесу використовувалися тугоплавкі металопоподібні карбіди, бориди і нітриди [5].

Розширення діапазону технологічних можливостей СВС дозволило синтезувати порошки з незвичайними, а інколи просто унікальними високими параметрами. Сьогодні такий підхід (створення методом СВС порошоків та виробів, що перевищують традиційні за технологічними характеристиками, або властивостям одержаних на їх основі матеріалів) фактично є домінуючим.

Метод СВС здійснюється за допомогою сильної екзотермічної взаємодії більшої кількості елементів періодичної системи з бором, вуглецем, азотом, кремнієм, що пов'язано з виділенням теплоти при утворенні продукту, і високих значень енергії активізації. В зв'язку з цими особливостями реалізується можливість протікання реакції взаємодії у вузькій зоні, що проходить по нагрітій суміші реагентів [6]. Вважається, що спікання сумішей починається з того, що в міжчастинкових контактах протікають дифузійні процеси [7]. Авторами [8] була запропонована схема процесу спікання пресовок із порошоків титану і заліза, суть якої полягає в тому, що рідка фаза евтектичного складу, яка виникає на границі частинок металу внаслідок контактного плавлення, добре розтікається по поверхні титану. На границях між частинками заліза і титану внаслідок інтенсивної контактної взаємодії, що веде до утворення інтерметалідів, процес розтікання рідкої фази гальмується і швидко припиняється. Рідина остаточно закристалізовується в інтерметалідну фазу [9].

При виконанні роботи були використанні матеріали: порошок титану марки ПТС-1 (ГОСТ 9722-79), вуглець С (сажа – ТУ 14-7-24-80) та порошок сталі ШХ 15. Хімічний склад порошку сталі ШХ15, який ми одержали із шламових відходів при виготовленні підшипників на ПАТ СКФ-України вивчали за допомогою спектрографа моделі ИСП-30. Для порівняння властивостей матеріалів, отриманих за різною технологією, проводилася серія паралельних дослідів. Зразки спікалися методом пічного спікання та в режимі СВС. Спікання пічним методом проводили в печі моделі СГО55-754 при температурі 1500 К під рідким затвором протягом двох годин. Перед спіканням робочу зону печі продували аргонем [10]. Методом СВС спікали в лабораторному реакторі, який був виготовлений в Луцькому національному технічному університеті. Синтез здійснюється в інтервалі температур від 557 – 1677 К. Зразки для металографічних досліджень готувалися за стандартною методикою. Шліфи зразків досліджували за допомогою мікроскопу моделі ММР-4 при збільшенні  $\times 600$ .

З метою отримання чіткого зображення границь зерен шліфи протравлювали 4%  $H_2SO_4$ . Площинну пористість визначали по мікрофотографіях шліфів за допомогою програми RНОТОМ та програми Smart-eye. Встановлено, що пористість рівна 30%. Об'ємну пористість визначали ваговим методом за геометричними параметрами зразків. На рис. 1. наведена структура зразків спечених методом СВС. Програмний продукт Smart-eye дозволяє проводити морфологічний аналіз рельєфу поверхні зразків. На рис. 2. наведено характер поверхні зразків після пічного спікання (до і після травлення). На рис. 3. представлена структура отриманих пічним методом ( $\times 600$  (до і після травлення)). На рис.4. показано рельєф поверхні зразків після пічного спікання (до і після спікання). Очевидно, що травлення зменшує висоту мікронерівностей поверхні. Із знімка видно: темні області – мартенсит; світлі області – інтерметаліди заліза:  $Fe_2Ti$ ,  $FeTi$ ; сірі області – карбід титану ( $TiC$ ).

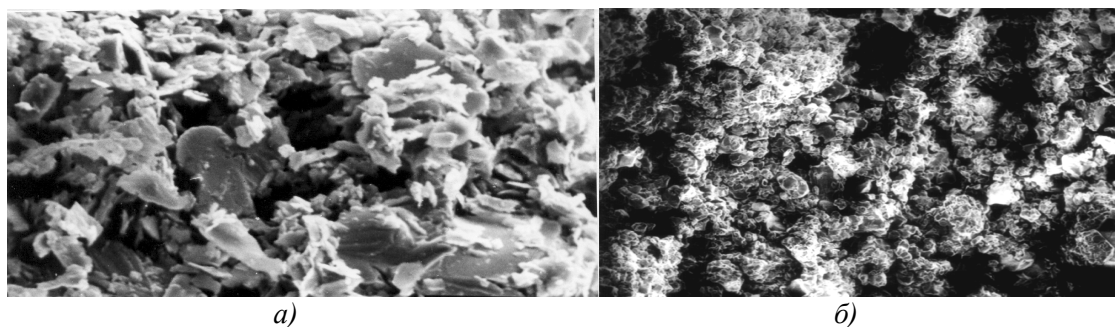
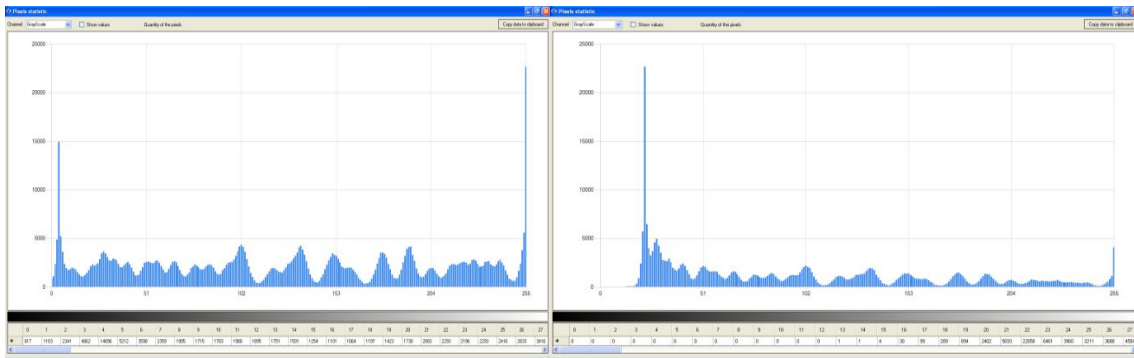


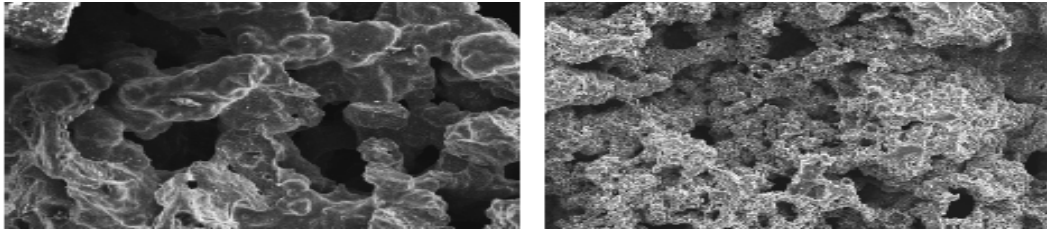
Рис. 1. Структура зразків спечених СВС при збільшенні  $\times 600$  (а – до і б – після травлення)



а)

б)

Рис. 2. Рельєф поверхні спечених методом СВС (а – до і б – після травлення)  $\times 600$



а)

б)

Рис. 3. Структура зразків спечених пічним методом при збільшенні  $\times 600$   
(а – до і б – після травлення)

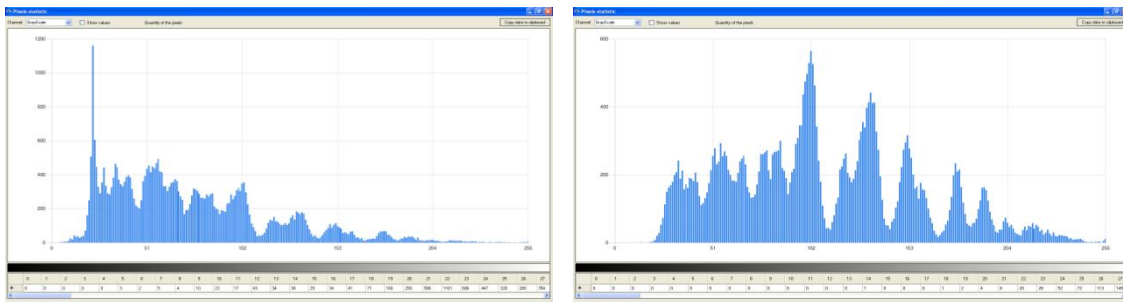
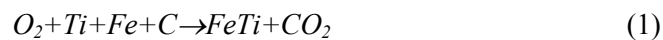


Рис. 4. Рельєф поверхні спечених пічним методом при збільшенні  $\times 600$   
(а – до і б – після травлення)

Методи СВС дозволяють отримувати інтерметаліди з великою теплою утворення. Особлива увага приділяється структурі твердого розчину інтерметаліду, що виникає в результаті досить швидкого протікання процесу [9].



В сплавах  $Fe-Ti$  є два інтерметалідних з'єднання. Фаза  $Fe_2Ti$  (фаза Лавеса типу  $MgZn_2$ ,  $a = 0,4774 \text{ нм}$ ,  $c = 0,7794 \text{ нм}$  при 27.4% (ат.)  $Ti$  і  $a = 0,785 \text{ нм}$  при 37% (ат.)  $Ti$ ) плавиться конгурентно при  $1427^\circ C$ . Область її гомогенності знаходиться в межах 27–33% (ат.)  $Ti$ . Фаза  $FeTi$  (типу  $CsCl$ ,  $a = 0,2976 \text{ нм}$  при 49.5% (ат.)  $Ti$ ) утворюється за перитектичною реакцією при  $1317^\circ C$  (склад евтектики 15% (ат.)  $Ti$ ). Залізо знижує температуру поліморфного перетворення титану до температури евтектоїдної рівноваги. Максимальна розчинність заліза в  $\beta-Ti$  становить 22% (ат.) при  $1085^\circ C$ , титану в  $\alpha-Fe$  – 9,8% (ат.) при  $1289^\circ C$ , титану в  $\gamma-Fe$  – 1% (ат.) при  $1100^\circ C$ . На рис.5. наведена діаграма стану системи  $Fe-Ti$ .



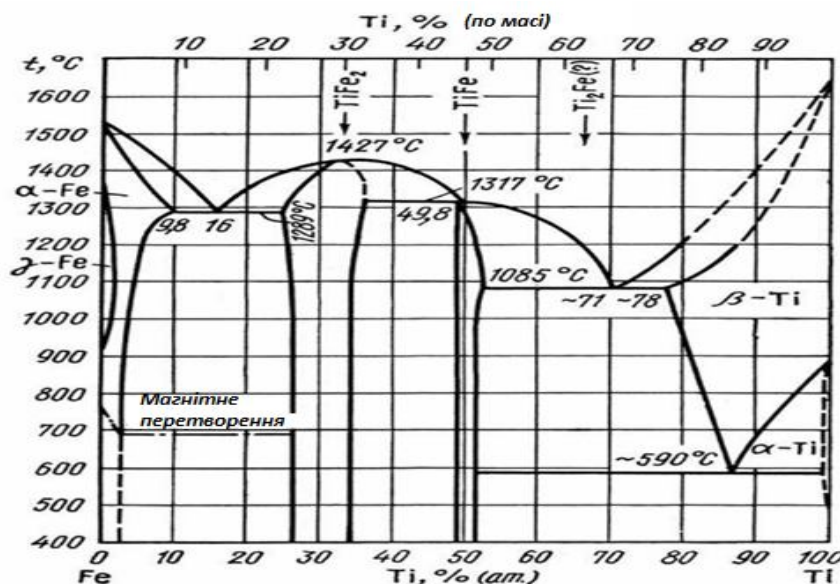


Рис. 5. Діаграма стану системи Fe–Ti

Авторами [10] досліджено зміни фазового складу пресовок з порошків суміші  $Fe-TiFe$ . Показано, що структура спеченого матеріалу по мірі збільшення вмісту інтерметалідної фази послідовно трансформується з матричної в каркасну, в тому числі в евтектичну, а потім в однофазну інтерметалідну, збагачену залізом.

**Висновок.** Метод СВС дозволяє синтезувати порошки з незвичайними, а інколи просто унікальними високими параметрами. Як показали металографічні дослідження, що при спіканні методом СВС забезпечується однорідність структури.

1. Мержанов А.Г., Шаривкер С.Ю. СВС-порошки и их технологическая переработка / И.П. Боровинская (ред.); РАН. Институт структурная макрокинетика и проблем материаловедения. – Черноголовка: Издательство ИСМАН, 2000. – 117 с.
2. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в химии и технологии тугоплавких соединений / А.Г. Мержанов, И.П. Боровинская // ВХО, 1999. – т. XXIV. №3. – С. 223-227.
3. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления: Справочное издание / Под ред. док. техн. наук, проф. Б.Б. Бобовича. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 496 с.
4. Дорофеев Ю.Г., Мариненко Л.Г., Устиненко В.И. Конструкционные порошковые материалы и изделия. – М.: Металлургия, 1986. – 144 с.
5. Патент України № 63558 А МПК 7 B22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, О.Ю. Повстяной; Заявл.06.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл. №1, 2004.
6. V. Kiebak, W. Shatt, G. Jangg. Titanium-alloyed sintered steels // Powder Met. Int., 16(5), pp. 207-212 (1984). R. German, W. Baek, J. Dillar. Microstructure and property development in transient liquid phase sintered iron-titanium alloys // Progress in Powder Metallurgy, 41, p. 765–790 (1985).
7. Жигуц Ю.Ю. Структура і властивості синтезованих твердих сплавів / Ю.Ю. Жигуц // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – Львів. – 2003. – №1. – С. 109-110.
8. Зарубицкая Л.И. Структура и некоторые свойства электролитических порошков интерметаллидов титана с железом / Л.И. Зарубицкая // Порошковая металлургия, (3). – 1991. – С. 1-3.
9. Петрик І.Я. Дослідження формування структури сплаву системи Fe -Ti в процесі дифузійного насичення та спікання з порошкових матеріалів і вплив її на триботехнічні властивості / І.Я. Петрик // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т.9, №3. – С. 567–573.
10. Петрик І.Я. Вплив режиму спікання зразків на структуру і фазовий склад системи Fe-Ti / І.Я. Петрик // Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – Т. 8, № 3. – С. 628–630.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2014.

УДК 669 (075.4)

**К.О. Сергеева, С.В. Жук, К.П. Грабівський, К.В. Жердєв***Національний технічний університет України «КПІ»***КРИТЕРІЙ ОПТИМАЛЬНОСТІ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ***Розроблений комплексний критерій оптимального керування киснево-конвертерною плавкою. Визначено вплив початкових умов на попадання плавки в межі задані маркою сталі. Отриманні чисельні значення цільової функції оптимального керування з мінімізацією собівартості сталі.**Ключові слова:* конвертер, критерій, керування.*Форм. 6. Літ. 5.***К.А. Сергеева, С.В. Жук, К.П. Грабовский, К.В. Жердев****КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКОЮ***Разработан комплексный критерий оптимального управления кислородно-конвертерной плавкой. Определено влияние начальных условий на попадание плавки в границы заданные маркой стали. Получены численные значения целевой функции оптимального управления с минимизацией себестоимости стали.**Ключевые слова:* конвертер, критерий, управление**K. Sergeeva, S. Zhuk, K. Grabovskij, K. Zherdev****CRITERION OF OPTIMALITY QUALITY OF CONTROL BOF***Application of developed complex optimal control BOF. The influence of the initial conditions on the verge of falling in melting specified grade of steel. The received numerical value of the objective function of optimal control minimizing the cost of steel.**Keywords:* converter, criterion, control.

**Вступ.** За останні роки спостерігається стійка тенденція до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі, що є наслідком освоєння проектної потужності агрегатів, подальшого вдосконалення технологічного процесу, підвищення стійкості футерівки конвертерів, використання засобів механізації, автоматизації технологічного процесу та керування ним. АСКТП конвертерної плавки забезпечує високовиробничу роботу агрегатів, отримання сталі заданого складу та температури, економні витрати матеріалів та кисню.

Критерій якості керування необхідний для розробки оптимального алгоритму керування процесом. Такий алгоритм від множини інших буде відрізнятися тим, що забезпечить екстремальне значення критерію якості керування [1, 2].

**Матеріали і методика експерименту.** Якісті критерію оптимальності можуть бути обрані різноманітні технічні та економічні показники. Задача пошуку критерію досить складна та визначається специфічними умовами, характерними для конкретного об'єкту. При цьому іноді виявляється, що відомі показники процесу – продуктивність, економічність, якість продукції – можуть бути в протиріччі один з одним. Тому необхідно або віднайти комплексний критерій оптимальності, що враховує всі ці характеристики, чи вибрати у якості критерію одну з них, але з обмеженнями інших характеристик.

Цільова функція включає розраховані на одиницю маси придатної сталі складові її собівартості від затрат на матеріали, енергоресурси, футерівку конвертера і працю, що виражені лінійною функцією від початкових умов і керуючих діянь [3]:

$$I = (\alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i) / (\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i), \quad (1)$$

$x_i \in m_{\text{б}}, m_{\text{ч}}, m_{\text{впн}}, m_{\text{вж}}, m_{\text{шж}}, V, \text{Si}_{\text{ч}}, \text{Mn}_{\text{ч}}, \text{S}_{\text{ч}}, t_{\text{ч}}, t_{\text{з}}, C_{\text{з}}, N, \tau_{\text{п}}, \tau_{\text{впн}}, \tau_{\text{вж}}, \tau_{\text{шж}}, \tau_{\text{тп}}, H, v, \text{Mn}_{\text{с}}, \text{Si}_{\text{с}}, C_{\text{с}}, S_{\text{с}}, P_{\text{с}}, m_{\text{FeMn}}, m_{\text{FeSi}}, m_{\text{SiMn}}$ .

де  $I$  – функціонал питомої собівартості сталі  $C_y$ , грн\_/т;  $x_i$  – параметри початкових умов і керуючих діянь;  $\alpha_0$  – вільний член, який включає загальнозаводські (умовно - постійні) витрати, які не залежать від керуючих діянь, грн;  $\alpha_i$  - коефіцієнти;  $n$  - число параметрів, які враховуються;

$\beta_0, \beta_1$  – коефіцієнти;  $m_b, m_{\text{ч}}$  – відповідно маса брухту і чавуну на плавку, т;  $m_{\text{вп}j}, m_{\text{в}j}, m_{\text{ш}j}$  – маса, т, вапняку, вапна та шпату в  $j$  - у добавку в момент часу від початку продувки  $\tau_j$ , хв;  $V$  – об'єм кисню на плавку, м<sup>3</sup>;  $\text{Si}_{\text{ч}}, \text{Mn}_{\text{ч}}, \text{S}_{\text{ч}}$  – вміст силіцію, марганцю та сірки в чавуні, %;  $t_{\text{ч}}, t_{\text{с}}$  – відповідно температура чавуну та температура металу згідно заданої марки сталі, °С;  $C_{\text{с}}$  – заданий вміст вуглецю у сталі, %;  $\tau_{\text{п}}$  – тривалість плавки, хв.;  $H$  – висота підняття фурми, м;  $\nu$  – інтенсивність продувки, м<sup>3</sup>/хв.;  $N$  – номер плавки по кампанії футерівки конвертера;  $\tau_{\text{тп}}$  – тривалість продувки, хв.;  $S_{\text{с}}, P_{\text{с}}$  – допустимі значення масових часток сірки і фосфору в сталі, які визначаються її маркою, %;  $\text{Mn}_{\text{с}}, \text{Si}_{\text{с}}, C_{\text{с}}$  – точки прицілу по масовим часткам марганцю, силіцію та вуглецю в сталі, %;  $m_{\text{FeMn}}, m_{\text{FeSi}}, m_{\text{SiMn}}$  – маса на плавку відповідно феромарганцю, феросиліцію і силікомарганцю, т.

Основою статичного керування конвертерною плавкою є розрахунок керуючих діянь до початку продувки. Невірно розраховані діяння призводять до необхідності проведення коректувань за наступними режимами:

а) додувки:

- 1) при нормальному положенні фурми;
- 2) те ж з переводом на іншу марку сталі;
- 3) при високому положенні фурми;
- 4) те ж з переводом на іншу марку сталі;

б) охолодження:

- 1) з додувкою;
- 2) те ж з переводом на іншу марку сталі.

При статичному керуванні плавкою критерій як функцію керуючих діянь можна представити у вигляді суми ймовірностей додувки, охолодження після першої повалки та проведення коректуючих операцій з переводом плавки на іншу марку сталі

$$\begin{aligned}
 I(m_{\text{бр}}, m_{\text{в}}, m_{\text{вп}}, V, \nu_{\text{сп}}, \overline{H}) = & \alpha_1 P[(t_1 \leq t_{\text{м}} < t_3), (C_{\text{м}} > C_3), \\
 & (S_{\text{м}} \leq S_1)] + \alpha_2 P[(t_2 \leq t_{\text{м}} < t_1), (C_1 \leq C_{\text{м}} \leq C_3), (S_1 \leq S_{\text{м}} < S_2)] + \\
 & + \alpha_3 P[(C_{\text{м}} < C_2), (t_1 \leq t_{\text{м}} \leq t_3), (S_{\text{м}} \leq S_1)] + \alpha_4 P[(t_{\text{м}} \leq t_2), \\
 & (C_{\text{м}} \leq C_3), (S_{\text{м}} \leq S_2)] + \alpha_5 P[(t_{\text{м}} > t_3), (C_{\text{м}} > C_3), \\
 & (S_1 \leq S_{\text{м}} < S_2)] + \alpha_6 P[(t_{\text{м}} > t_3), (C_{\text{м}} \leq C_2), (S_{\text{м}} > S_2)], \quad (2)
 \end{aligned}$$

де  $\nu_{\text{сп}}, \overline{H}$  – середньоінтегральне значення відповідно інтенсивності дугтя, м<sup>3</sup>/хв і положення фурми над рівнем спокійного металу, калібр;

$\alpha_1 \dots \alpha_6$  – вагові коефіцієнти;

$t_1, t_3$  – відповідно нижня та верхня межі температури металу при зливі з конвертера, °С;

$C_1, C_3$  – відповідно нижня та верхня межа по вмісту вуглецю в металі при зливі з конвертера, %;

$S_1$  – верхня межа по вмісту сірки у металі, %;

$t_2, C_2, S_2$  – межі відповідно температури, вмісту вуглецю та сірки після першої повалки, що потребують проведення коректуючих операцій з переводом плавки на іншу марку сталі [4].

Тут вираз з коефіцієнтом  $\alpha_1$  характеризує вірогідність додувки на вуглець відповідно режиму додувки при нормальному положенні фурми. Вираз з коефіцієнтом  $\alpha_2$  характеризує вірогідність додувки на вуглець відповідно режиму додувки при переводі на іншу марку сталі, з коефіцієнтом  $\alpha_3$  – вірогідність додувки при високому положенні фурми,  $\alpha_4$  – додувка по сірці при переведенні на іншу марку сталі,  $\alpha_5$  – охолодження з додувкою,  $\alpha_6$  – охолодження з переводом на іншу марку сталі.

Критерій (2) апроксимуємо виразом:

$$I(m_{\text{бр}}, m_{\text{в}}, m_{\text{вп}}, \tau_{\text{в}}, \tau_{\text{вп}}, \nu, H) = \alpha_7 M (C_{\text{м}} - C^*)^2 +$$

$$+ \alpha_8 M (t_m - t^*)^2 + \alpha_9 M (S_m - S^*)^2, \quad (3)$$

де  $\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9$  – коефіцієнти, що визначаються масштабами змінних, що входять у критерій, а також залежать від співвідношення частот додувок через непопадання по вуглецю, температурі та сірці відповідно;

$M$  – математичне сподівання;

$S^*, t^*, S^*$  – “точки прицілу” по вуглецю, температурі та сірці в металі, що визначаються методом експертних оцінок в залежності від виплавляємої марки сталі й технологічної ситуації на початку плавки (наявність замовлення, готовність і стан сталерозливного ковша, майданчика та установки позапічної обробки та ін.).

Обмеження по критерію мають вигляд:

– завантаження заданої маси металошихти в конвертер  $m_m = f(m_{бр} + m_ч)$ ; (сума мас чавуну та брухту у конвертері повинна дорівнювати ємності конвертера);

– збільшену переробку брухту  $0 \leq \sum_{j=1}^l m_{внj} \leq 0,5$ ; (засипати вапна не більше 0,5 тони, щоб не переохолодити метал);

– належну масу шлаку  $\sum_{j=1}^p m_{вj} \geq m_в$ ;

– економію плавикового шпату  $\sum_{j=1}^q m_{шj} \leq 1,5$ ;

– окиснення необхідної кількості вуглецю, кремнію та мангану  $V_{\phi} \geq V$ ;

– підтримання висоти фурми над рівнем спокійного металу в межах, що вказані технологічною інструкцією,  $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$ ;

– проектну продуктивність конвертера  $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$  (із збільшенням інтенсивності подання кисню збільшується продуктивність і менше часу триває продувка);

– засвоєння ванною сипких матеріалів  $0,9 \tau_{пр} \geq \tau_{вп} \geq 0,5 \tau_{пр}$  та  $\tau_в \leq 0,4 \tau_{пр}$ .

Якість вирішення будь-якої задачі оптимізації залежить у першу чергу від того, наскільки правильно вибраний критерій, а при байесовському підході якість критерію визначається ступенем близькості до реальної функції втрат. Для її побудови можна використовувати експертні оцінки за методом послідовних інтервалів [5].

Апріорі можна припустити, що частота корекцій за окремими компонентами не є постійною, а залежить від початкових умов плавки. Так, якщо поставлена задача отримати марку сталі з високим вмістом вуглецю з першої повалки, то масштаб коефіцієнта  $\alpha_7$  критерію (3.7) підвищується при інших рівних умовах, аналогічно підвищуються масштаби коефіцієнта  $\alpha_8$  при не збалансуванні плавки по теплоті і коефіцієнта  $\alpha_9$  при необхідності видалити значну кількість сірки (високий вміст сірки в чавуні і низький вміст її в сталі).

Нами було визначено вплив початкових умов на потрапляння плавки у задані межі. Для цього розраховані імовірності появи наступних подій  $NC$  – додувки на вуглець,  $NQ$  – нагріву,  $NT$  – охолодження,  $NS$  – додувка на видалення сірки.

Рівняння множинної регресії має вигляд

$$NC = 13,3 + 22C_ч - 11,2Si_ч + 22,9Mn_ч - 2070 P_ч + 130C_3 + 16,8(S_ч - S_3)/S_3 - 2,98V_{\Pi} + 0,000114Q_{\Pi}, \quad (4)$$

Коефіцієнти множинної кореляції  $R = 0,673$ ; середньоквадратичне відхилення  $\sigma = 14,2 \%$ ; достовірність коефіцієнта кореляції  $P > 0,950$ .

Відповідно

$$NQ = 134 + 41,5C_ч - 7,45Si_ч - 16,2Mn_ч + 46,6P_ч - 84,6C_3 - 38,3(S_ч - S_3)/S_3 - 2,05V_{\Pi} - 0,000121Q_{\Pi}; \quad (5)$$

$$R = 0,667; \sigma = 14,4 \%; P > 0,950.$$

$$NT = -1,52 - 10,9C_ч - 22,8Si_ч + 26,4Mn_ч - 568P_ч + 0,51C_3 + 27,9(S_ч - S_3)/S_3 + 1,61V_{\Pi} + 0,000152Q_{\Pi};$$

$$R = 0,787; \sigma = 12,9 \%; P > 0,950.$$

$$NS = -6,89 - 16,7C_ч - 36,1Si_ч - 5,49Mn_ч + 98,4P_ч +$$

$$+ 110C_3 + 11,6(S_4 - S_3)/S_3 + 4,42V_{II} - 0,000111Q_{II}; \quad (6)$$

$$R = 0,685; \sigma = 10,7\%; P > 0,950.$$

Тут  $V_{II}$  і  $Q_{II}$  відповідно значення кисневого, м<sup>3</sup>/т металошихти, і теплового потенціалу ванни, кДж/т.

Чим менша величина  $NC$ ,  $NQ$ ,  $NT$ ,  $NS$ , тим менша імовірність того, що потрібно буде коректувати плавку.

Якщо, наприклад,  $NS$  маленьке у порівнянні з іншими, то у рівнянні (3) коефіцієнт, який відповідає за вміст сірки  $\alpha_9$ , грає саму маленьку роль. Якщо на поточній плавці співвідношення ймовірностей інше, то і коефіцієнти  $\alpha_7$ ,  $\alpha_8$ ,  $\alpha_9$  будуть інші. Тобто в кожній плавці перед розрахунком оптимальних керуючих діянь по параметрам режиму дугтя визначаються конкретні значення цих коефіцієнтів.

Внаслідок того, що параметри  $NQ$  і  $NT$  зв'язані з необхідністю коректування плавки по температурі (відповідно нагрів чи охолодження), то коефіцієнт  $\alpha_8$  визначається для найбільшого параметра.

Поняття економічності процесу обмежимо розглядом питання про вихід сталі, що визначається як відношення рідкої сталі до маси металеві шихти, що загрузається в конвертер. Цей показник у конвертерній плавці має дуже важливе значення. Зменшення маси металеві ванни за час плавки пов'язано не тільки з окисненням домішок чавуну, що є метою конвертерного процесу, але й з втратою частини заліза, що пояснюється окисненням заліза з переходом його у шлак, випаровуванням заліза з утворенням бурого диму, викидами металу з конвертера та виносом металу, який зазвичай має місце на початку продувки при відсутності достатнього шлакового покриву. Дві останні статті витрат заліза необхідно зводити до мінімуму; кількість заліза, що переходить у шлак, повинна підтримуватись на оптимальному рівні, що визначається умовами шлакоутворення та видалення фосфору. Що стосується витрат заліза з димом у вигляді дисперсних частинок, то при існуючій технології конвертерної плавки немає ефективних способів їх зниження.

Таким чином, мінімізація витрат заліза пов'язана з умовами шлакоутворення (через винос металу) та з обмеженням швидкості окиснення вуглецю (через викиди). Необхідно підкреслити, що зв'язок між викидами металу та швидкістю зневуглецювання ще не встановлено достатньо повно та потребує додаткових досліджень.

Встановлення критерію оптимальності для конвертерного процесу можливо лише при умові проведення великої роботи по дослідженню техніко-економічних характеристик та взаємозв'язків. На практиці обмежуються вимогами до вихідних параметрів металу, особливо до температури та вмісту вуглецю. Для оцінки якості керування процесу зі сторони оператора або обчислювальної машини використовують два тісно пов'язаних між собою критерії:

1) стандартне (середньоквадратичне) відхилення отриманих значень вихідних параметрів від заданих;

2) частоту (ймовірність) попадання значень вихідних параметрів в задану область.

Найкращою формою критерію якості керування є збитки в гривнях, отримані в результаті неоптимального керування плавкою. Сума збитків за визначений період часу або за визначену кількість плавок може характеризувати якість керування процесом.

**Висновки.** Вдосконалено критерій статичного та динамічного керування плавкою, що забезпечує мінімізацію собівартості сталі за рахунок зниження кількості коректуючих операцій. Запропоновано новий підхід до визначення масштабних коефіцієнтів цільової функції, що полягає у визначенні впливу на неї окремих коректуючих операцій.

Вдосконалено критерій замкненого керування плавкою, що забезпечує побудову нової траєкторії керування при відхиленні від оптимальних процесів зневуглецювання, нагріву та окисненості ванни та повернення процесу до старої траєкторії при керуванні процесів шлакоутворення.

Запропоновано новий підхід до побудови цільової функції критерію оптимального керування з мінімізацією собівартості сталі, що полягає у розподіленні параметрів на три групи – витратних на плавку матеріалів, початкових та кінцевих умов плавки, а також керуючих параметрів, не пов'язаних явно із собівартістю сталі, з подальшою ідентифікацією функції в кожній групі окремо. Отримані чисельні значення цільової функції оптимального керування з мінімізацією собівартості сталі.

1. Туркенич Д.И. Управления плавкой стали в конверторе. – М.: Металлургия, 1971. – 360 с.
2. В.С. Богушевский, Л.Ф. Литвинов, Н.А. Рюмшин, В.В. Сорокин Математические модели и системы управления конверторной плавкой. – К.: НПО “Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
3. Богушевский В.С. Критерий оптимального управления конвертерной плавкой / В.С. Богушевский, Н.А. Сорокин, А.Г. Миски-Оглу // Автоматизация производственных процессов. – 1995. – 1. – С. 56-65.
4. Богушевський В.С., Автоматизована система керування конверторною плавкою / В.С. Богушевський, К.О. Сергєєва, С.В. Жук // Вісник НТУУ «КПІ». - К.: НТУУ «КПІ», 2011.- № 61 Т2. – С. 147 – 151 – (Серія Машинобудування).
5. Богушевський В.С. Система прийняття рішень при керуванні / В.С. Богушевський, В.Ю. Сухенко, К.О. Сергєєва киснево-конвертерною плавкою // Нові технології. – 2009. – № 1. – С. 98 – 101.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2014.

УДК 629.113

**О.П. Сітовський, В.Л. Деркач***Луцький національний технічний університет***ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕДПУСКОВОГО ПІДГРІВУ НА  
ХАРАКТЕРИСТИКУ РОБОТИ ДВИГУНА З ПІДВИЩЕНИМИ ОБЕРТАМИ ХОЛОСТОГО  
ХОДУ**

*Визначено залежність впливу передпускового підігріву двигуна на витрату палива, вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах при підвищених до 2500 хв<sup>-1</sup> обертах холостого ходу. Побудовані залежності вказаних параметрів від часу прогріву двигуна.*

*Ключові слова: передпусковий підігрів, витрата палива, вміст шкідливих речовин, холостий хід, температура, час прогріву.*

*Рис. 6. Літ. 4.***О.Ф. Ситовский, В.Л. Деркач****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА НА  
ХАРАКТЕРИСТИКУ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННЫМИ ОБОРОТАМИ  
ХОЛОСТОГО ХОДА**

*Определена зависимость влияния предпускового подогрева двигателя на расход топлива, содержание вредных веществ в отработавших газах при повышенных до 2500 мин<sup>-1</sup> оборотах холостого хода. Построены зависимости указанных параметров от времени прогрева двигателя.*

*Ключевые слова: предпусковой подогрев, расход топлива, содержание вредных веществ, холостой ход, температура, время прогрева.*

**O.F. Sitovskyi, V.L. Derkach****DETERMINING THE IMPACT OF PREHEATING ON ENGINE PERFORMANCE  
WITH HIGH IDLING**

*The dependence influence of engine preheating fuel consumption, the content of harmful substances in exhaust gases at elevated up to 2500 min<sup>-1</sup> idle. The dependences of these parameters on the time the engine warms up.*

*Keywords: preheating, fuel consumption, content of harmful substances, idling, temperature, heating time.*

**Вступ.** Експлуатація колісних транспортних засобів передбачає собою їх використання при різних температурних режимах. Тепловий стан двигуна внутрішнього згорання має прямий вплив на витрату палива, концентрацію шкідливих речовин у відпрацьованих газах, роботу двигуна [1]. У попередніх дослідженнях було визначено вплив передпускового підігріву на витрату палива, викиди шкідливих речовин при роботі двигуна на холостому ходу в режимі прогріву[2]. Виявлений позитивний ефект у використанні передпускового підігріву.

**Постановка проблеми.** Завданням роботи є дослідження впливу передпускового підігріву двигуна внутрішнього згорання на показники паливної економічності, викиди забруднюючих речовин при роботі двигуна на підвищених обертах.

**Аналіз останніх досліджень.** Робота виконується в продовження досліджень впливу передпускового підігріву на показники роботи двигуна при його пуску і прогріву [3]. Попередні дослідження проводились в режимі прогріву двигуна при мінімальній частоті обертання колінчастого валу двигуна. Ця частота обертання підтримувалась лише штатним регулятором частоти обертання колінчастого валу двигуна. Однак при експлуатації колісних транспортних засобів двигун працює навіть відразу після пуску зі значно більшою частотою обертання колінчастого валу.

**Результати дослідження.** Зазвичай після пуску двигуна в холодну пору року, рекомендується не допускати великої частоти обертання колінчастого валу та великих навантажень для покращення паливної економічності та збільшення ресурсу двигуна. При використанні автомобіля у міському циклі, двигун працює при обертах колінчастого валу до 2500хв<sup>-1</sup> і більших. Тому і проводились заміри параметрів паливної економічності та викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах при підвищеній частоті обертання колінчастого валу, яка наближені до міських умов з попереднім підігрівом двигуна та без нього. Дослідження впливу передпускового підігріву проводились на автомобілі Mitsubishi Lancer 9 1.6 MT Comfort (рис.1) з робочим об'ємом двигуна 1600 см<sup>3</sup> при частоті обертання колінчастого валу 2500 хв<sup>-1</sup>. На момент проведення порівняльних випробувань автомобіль знаходився в експлуатації 7 років і мав пробіг

70 000 км. У роботі значення, які показують дані без передпускового підігріву зображені лініями з ромбиками, а з використанням передпускового підігріву—лініями з квадратами.

Для визначення вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах використовувався п'ятикомпонентний газоаналізатор "Totalgas 8050" (рис.2). Для правильної роботи газоаналізатора останній розміщувався у теплому приміщенні. Проби газів подавалися з вулиці від автомобіля по прийомній трубці в приміщення до газоаналізатора. Миттєву витрату палива вимірювали за допомогою відтарованого бортового комп'ютера Multitronics TC750 (рис.3). Вміст шкідливих речовин визначався з урахуванням стандартів та Правила ЄЭК ООН №83(05) [4].

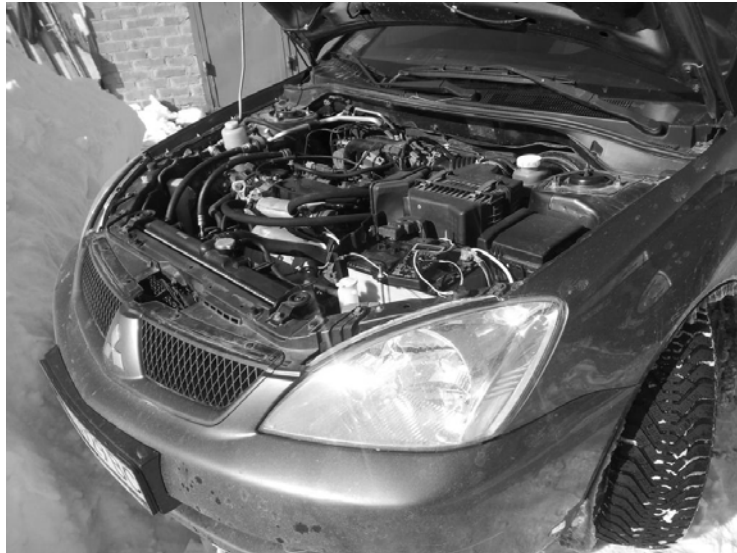


Рис. 1. Автомобіль Mitsubishi Lancer при безгаражному зберіганні під час випробувань



Рис. 2. Газоаналізатор п'ятикомпонентний "Totalgas 8050"



Рис. 3. Бортовий комп'ютер Multitronics TC 750

Визначення параметрів паливної економічності та викидів шкідливих речовин здійснювались у два етапи при температурі зовнішнього повітря  $-15... -17$  °С. Перед випробуваннями автомобіль зберігався на відкритій стоянці з вечора до ранку. Таким чином температура двигуна знижувалася до оточуючої температури. Випробування проводились у два етапи. Одного ранку заміри проводилися без передпускового підігріву. Другого ранку перед випробуваннями здійснювався передпусковий підігрів двигуна внутрішнього згорання протягом 20 хвилин. Підігрів здійснювався за допомогою електричного підігрівача потужністю 2 кВт, обладнаного електричним насосом для циркуляції охолоджуючої рідини. За цей час температура охолоджуючої рідини підвищилась з  $-15$ °С до  $+26$  °С.

Після запуску двигуна частота обертання колінчастого валу підвищувалась до  $2500$  хв<sup>-1</sup>. Після зняття показників оберти колінчастого валу на кілька секунд знижувалися до звичайних, а потім знову з перегазовкою підвищувалися до  $2500$  хв<sup>-1</sup>. Це робилося для того, щоб максимально



наблизити режим роботи двигуна до реальних умов при русі в місті та більше виділяти моменти забору контрольної газової суміші.

Після запуску двигуна без попереднього підігріву миттєва витрата палива  $Q_M$  становить 6,3 л/год. По мірі прогріву двигуна вона знижується до 2,66 л/год. З використанням передпускового підігріву миттєва витрата палива  $Q_M$  спочатку становить 3,9 л/год., а з прогрівом двигуна зменшується до 2,5 л/год. через 5 хв. Результати замірів представлені на рис. 4. Після 5 хв. роботи двигуна різниця у витраті палива зменшується практично до нуля.

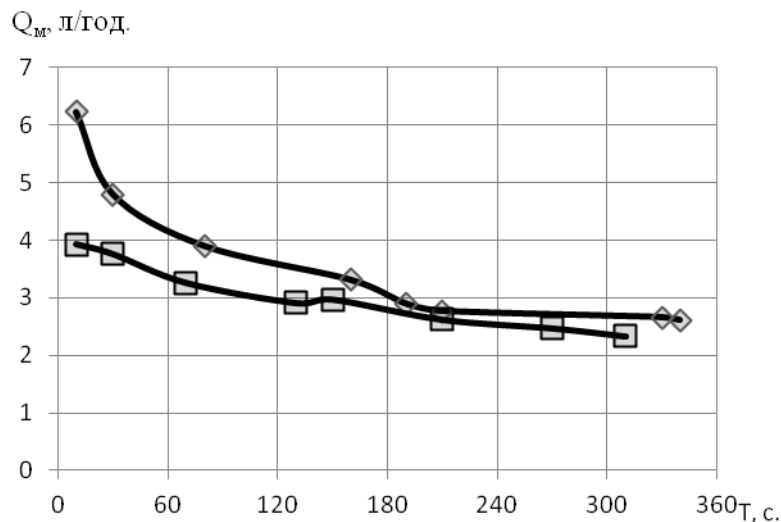


Рис. 4. Залежність миттєвої витрати палива від часу прогріву

Після запуску двигуна без попереднього підігріву вміст CO у відпрацьованих газах становить 12,5 % (рис. 5). Через 2 хв. прогріву двигуна на підвищених обертах концентрація монооксиду вуглецю знижується до нуля. При пуску двигуна з передпусковим підігрівом вміст CO у відпрацьованих газах спочатку становить 0,6 %, через 40 сек. – 0,16 %, а вже в кінці першої хвилини прогріву концентрація CO зменшується до нуля.

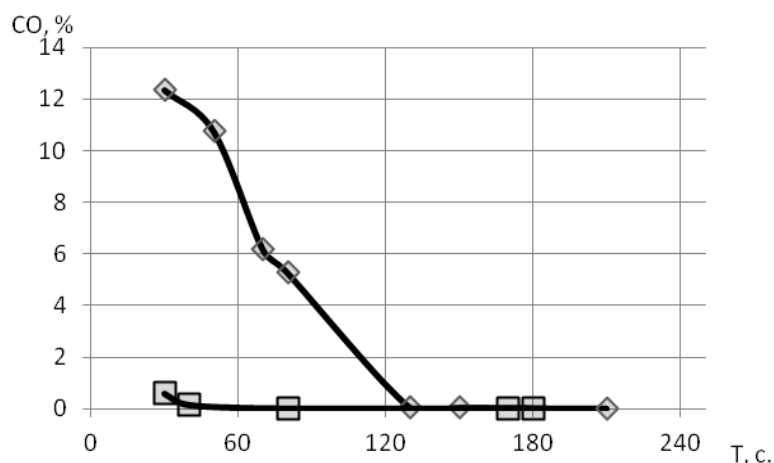


Рис. 5. Залежність вмісту CO у відпрацьованих газах від часу прогріву

Без попереднього підігріву вміст CH у відпрацьованих газах становить відразу після пуску двигуна більше 4000 ppm (рис. 6). Через 80 с. – 800 ppm, а через 200 с. – 180 ppm. З використанням передпускового підігріву в перші секунди роботи двигуна концентрація вуглеводнів не перевищує 50 ppm, а до кінця першої хвилини падає до нуля.

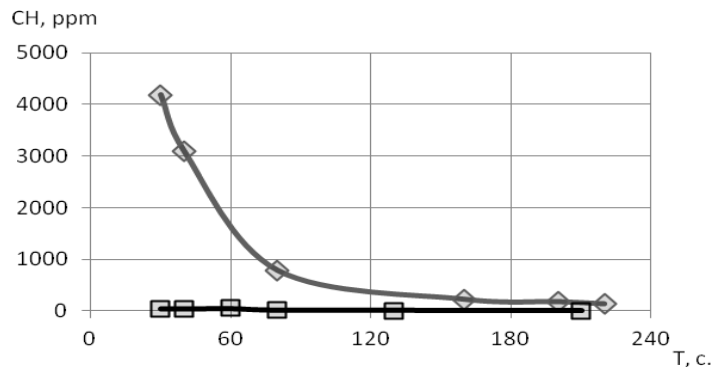


Рис. 6. Залежність вмісту СН від часу прогріву

Як показують результати досліджень передпусковий підігрів дає позитивний ефект на миттєву витрату палива, вміст  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  у відпрацьованих газах. Для автотранспорту досягнення необхідного теплового стану двигуна може забезпечити безпроблемний пуск при низьких температурах. При цьому збільшується ресурс акумуляторної батареї та стартера шляхом зменшення навантаження, та зменшення стартового струму, необхідного для запуску двигуна в холодну пору. Найбільше зменшення витрати палива та концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах спостерігається протягом перших двох хвилин після пуску двигуна. Позитивний вплив передпускового підігріву спостерігається і при його використанні не лише при великих морозах, які спостерігаються в північних районах, але і в географічних зонах з помірним кліматом, до якого зокрема належить і Волинська область.

Застосування передпускового підігріву двигуна може бути особливо актуальним для автомобілів, обладнаних системою нейтралізації відпрацьованих газів, які вже тривалий час знаходяться в експлуатації. Хоча прямих закономірностей впливу передпускового підігріву на вказані параметри не виявлено, є сподівання, що в подальших наукових дослідженнях ці залежності будуть встановлені.

#### Висновки.

1. Застосування передпускового підігріву двигуна зовнішнього згорання при температурі зовнішнього повітря  $-15 \dots -17 \text{ }^\circ\text{C}$  і роботі двигуна з підвищеною до  $2500 \text{ хв}^{-1}$  частотою обертання колінчастого валу в перші секунди після пуску двигуна дає:

- зниження миттєвої витрати палива  $Q_m$  з  $6,3 \text{ л/год.}$  до  $3,9 \text{ л/год.}$ ;
- швидше активування роботи каталітичного нейтралізатора;
- зменшення вмісту  $\text{CO}$  у відпрацьованих газах з  $12,5 \%$  до  $0,6 \%$ ;
- зменшення вмісту  $\text{CH}$  у відпрацьованих газах з  $4200 \text{ ppm}$  до  $50 \text{ ppm}$ .

2. Без застосування передпускового підігріву двигуна значення вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах, витрата палива зменшуються і досягають значень, які отримані із застосуванням передпускового підігріву, через 2-3 хвилини після пуску двигуна.

3. Рекомендується встановлення та використання передпускових підігрівачів для автомобільного транспорту для забезпечення надійного запуску двигунів при мінусових температурах, економії палива, зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище.

4. Застосування передпускового підігріву двигунів в холодну пору року у помірній кліматичній зоні, до якої відноситься значна частина України, має позитивний економічний та екологічний ефект, і тому рекомендується для використання як на нових автомобілях так і на автомобілях, які тривалий час знаходяться в експлуатації з пробігом.

1. Крамаренко Г. В., Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах. Г. В. Крамаренко, В. А. Николаев, А. И. Шаталов. – М.: Транспорт, 1984. – 136 с.
2. Найман В. С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях / В. С. Найман // АСТ, 2007 – С. 7-12.
3. Деркач В.Л., Визначення впливу передпускового підігріву на показники роботи двигуна в режимі холостого ходу. Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. серія: Автомобілі - та тракторобудування. – Х.: НТУ «ХП». – 2014. – № 31. – 162 с.
4. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів стосовно викидів забруднюючих речовин залежно від палива, необхідного для двигунів (Правила СЕК ООН № 83-02ABC: 1993, IDT) – Женева.: Европейская Экономическая комиссия Организации Объединенных наций, 2011. – 83 с.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2014.

**В.В. Ткачук***Луцький національний технічний університет***ІНФРАЧЕРВОНА СПЕКТРОСКОПІЯ БІОДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ**

*Методом інфрачервоної спектроскопії проведено дослідження ріпакової олії, її метилестерів та ізопропілестерів. Установлено перевагу застосування в якості палива ізопропілестерів у порівнянні з метилестерами в експлуатації у зимовий період.*

*Ключові слова: інфрачервона спектроскопія, біодизельні палива, естери ріпакової олії.*

*Рис. 3. Табл. 1. Літ. 2.*

**В.В. Ткачук****ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА**

*Методом инфракрасной спектроскопии проведено исследование рапсового масла, его метилэстеров и изопропилэстеров. Установлено преимущество применения в качестве топлива изопропилэстеров по сравнению с метилэстерами в эксплуатации в зимнее время.*

*Ключевые слова: инфракрасная спектроскопия, биодизельные топлива, эфиры рапсового масла.*

**V.V. Tkachuk****INFRARED SPECTROSCOPY BIODIESEL FUEL**

*The infrared spectroscopy method was used for investigation of rapeseed oil, its methylesters and isopropylesters. It is determined it is better to use isopropylesters as fuel than methylesters in the operation during the winter season.*

*Keywords: infrared spectroscopy, biodiesel, rapeseed oil esters.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями.** Інфрачервона спектроскопія естерів ґрунтовно і широко вивчена для поліестерів. Проте, враховуючи те, що полімер складається з великої кількості мономерних фрагментів, можна стверджувати про існування смуг поглинання в неполімерних естерах. Це смуги поглинання гліцедилового естеу, поліефірів:

- гексагідрофталевої кислоти з гександіолом – 1, 6;
- аліпінової кислоти з етиленгліколем;
- себацинової кислоти з гександіолом – 1,6;
- тимелінової кислоти з пентандіолом – 1, 5;
- естери фталевої, акрилової, метакрилової кислот та інших естерів.

Для вказаних естерів слід відмітити існування інтенсивної смуги поглинання карбонільних груп, невеликої інтенсивності смуги поглинання валентних коливань С – Н в групах –СН<sub>2</sub> і дуже інтенсивна смуга поглинання в областях 1200 см<sup>-1</sup> [1].

Враховуючи те, що молекула ріпакової олії має три органічні радикали, то в сумарному випадку її можна віднести до олігомеру з наявною трьохзначною розгалуженістю. Продукти переестерифікації спиртами будуть мати менші молекулярні маси, але це не буде впливати на характер спектроскопічної трактовки одержаних результатів по оцінці впливу хімічної будови спирту на характер проявлення смуг поглинання.

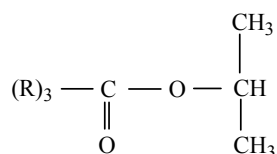
Оскільки ріпакову олію, її метилестери та ізопропілестери можна використовувати як біопаливо, то дослідження властивостей даних речовин є необхідними, тому що вони не достатньо вивчені. Застосування біопалива вкрай необхідне Україні в умовах сучасної енергозалежності та напруженої екологічної ситуації у світі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій,** в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Дана проблематика достатньо інтенсивно піднімається у працях відомих вітчизняних вчених, таких як Храновський В.А., Олейник Е.Й., Керча Ю.Ю. Вони використовували метод інфрачервоної спектроскопії для досліджень полімерів. Проте на даний час не дослідженими залишаються спектри поглинання ріпакової олії, її метилестерів та ізопропілестерів. А такі дослідження мають важливе практичне значення для вивчення структури та властивостей біопалива.

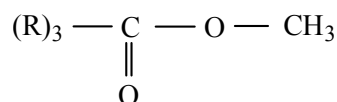
**Цілі статті.** У зв'язку з цим метою даної роботи виступає оцінка впливу природи спирту на зміну спектроскопічної поведінки сумарного складу естерів, одержаних переестерифікацією ізопропіловим спиртом у порівнянні з естерами, одержаними з використанням метилового спирту.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Естери жирних кислот одержувались шляхом переестерифікації ріпакової олії ізопропіловим та метиловим спиртами [2]

У першому випадку синтезувались естери,



а в другому ,

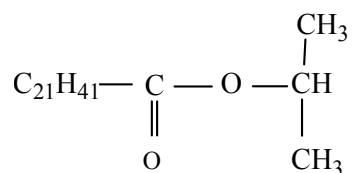


де (R)<sub>3</sub> – радикали трьох жирних кислот ріпакової олії.

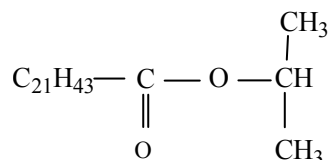
При переестерифікації одержались дві сумішеві трьохкомпонентні системи для ізопропілового та метилового спиртів.

*Перша суміш з використанням ізопропілового спирту*

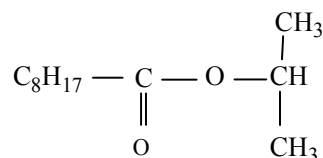
ерукової кислоти:



бегенової кислоти:

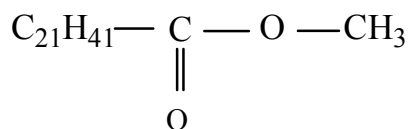


пеларгонової кислоти:

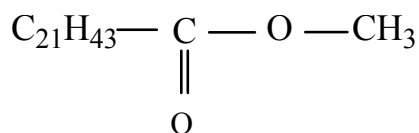


*Друга суміш з використанням метилового спирту*

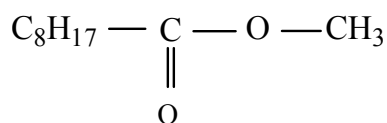
ерукової кислоти:



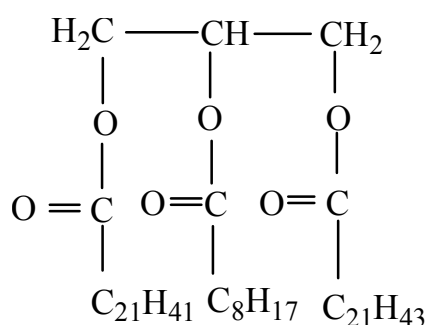
бегенової кислоти:



пеларгонової кислоти:



Вихідний гліцерид ріпакової олії схематично можна зобразити наступною схемою згідно формул ерукової  $\text{C}_{21}\text{H}_{41}\text{COOH}$ , бегенової  $\text{C}_{21}\text{H}_{43}\text{COOH}$  і пеларгонової  $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{COOH}$  кислот:



Радикали ерукової і бегенової кислот займають у гліцерині 1-3 або 3-1, а пеларгонової у положенні 2 вторинної – OH групи.

Інфрачервоні спектри, одержані на спектрометрі UR – 20 в діапазоні хвильових чисел від  $3200 \text{ cm}^{-1}$  до  $700 \text{ cm}^{-1}$  для ріпакової олії, естерів, переестерифікованих ізопропіловим спиртом і метилових естерів.

Із наведених результатів дослідження ріпакової олії (табл. 1, рис. 1) видно існування наступних смуг поглинання валентних коливань C – H в групах  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}_3$  при  $3025 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2945 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2870 \text{ cm}^{-1}$ ; карбонільних груп (C=O) при  $1765 \text{ cm}^{-1}$ ; смуги поглинання  $1477 \text{ cm}^{-1}$  – деформаційні коливання  $\delta(\text{CH}_2)$  груп;  $1180 \text{ cm}^{-1}$  – відноситься до коливань  $\nu_2 - \nu_2(\text{C} - \text{O} - \text{C})$ ;  $730 \text{ cm}^{-1}$  – чисте коливання вуглецевого скелету. Наявні смуги поглинання однозначно вказують на існування в олії гліцедилового естеру [2].

Таблиця 1. Смуги поглинання в ІЧ-спектрах ізопропілестерів, метилестерів та ріпакової олії

Валентні коливання	Смуги поглинання ріпакової олії, $\text{cm}^{-1}$	Смуги поглинання метилестерів, $\text{cm}^{-1}$	Смуги поглинання ізопропілестерів, $\text{cm}^{-1}$
1	2	3	4
C – H в $-\text{CH}_2$ і $-\text{CH}_3$	3025-2945-2870	3025-2950-2870	3022-2945-2870
C=O	1765	1760	1760
$\text{CH}_2$	1477	1475-1450	1475-1390
(C – O – C)	1180	1205-1180	1180-1170
Чисті коливання вуглецевих скелетів	730	730	730

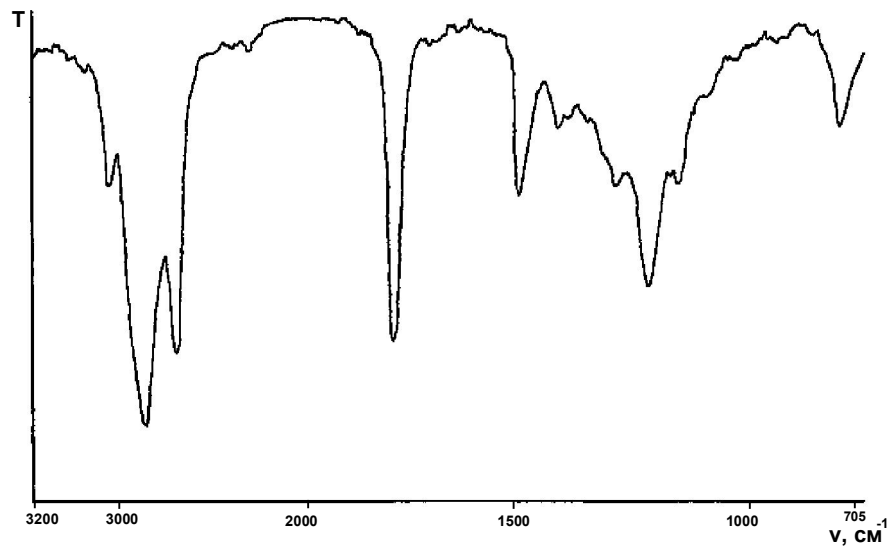


Рис. 1. ІЧ-спектр ріпакової олії

Для метилестерів (рис. 2, табл. 1) мають місце смуги поглинання при наступних смугах поглинання валентних коливань С – Н в групах  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$  при  $3025 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2950 \text{ cm}^{-1}$  та при  $2870 \text{ cm}^{-1}$ ; карбонільних груп ( $\text{C}=\text{O}$ )  $1760 \text{ cm}^{-1}$ ; смуги поглинання дублету  $1475 \text{ cm}^{-1}$  та  $1450 \text{ cm}^{-1}$  – деформаційні коливання  $\delta_2$  і  $\delta_3(\text{CH}_2)$  і  $(\text{CH}_3)$  груп;  $1180$  та  $1205 \text{ cm}^{-1}$  – смуги поглинання  $\nu_2 - \nu_3(\text{C} - \text{O} - \text{C})$ ;  $730 \text{ cm}^{-1}$  – чисте коливання вуглецевого скелету.

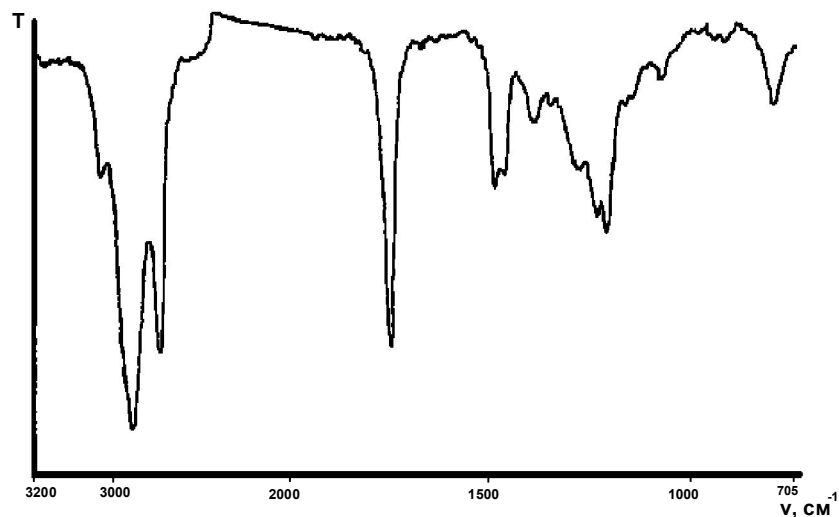


Рис. 2. ІЧ-спектр метилестерів

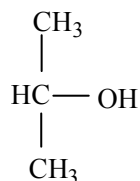
При аналізі одержаних результатів слід вказати, що має місце дублет деформаційних коливань у  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}_3$  групах, що не має місця у дослідженій олії. Валентні коливання карбонільних груп зміщується в сторону менших хвильових чисел, а валентні коливання С – Н зміщуються у сторону більших хвильових чисел ( $2945 \text{ cm}^{-1}$  на  $2950 \text{ cm}^{-1}$ ).

Для естерів переестерифікованих ізопропіловим спиртом вище вказані смуги поглинання проявляються при наступних значеннях хвильових чисел (рис. 3, табл. 1) валентних коливань С – Н в групах  $-\text{CH}_2$ ,  $-\text{CH}_3$  при  $3022 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2945 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2870 \text{ cm}^{-1}$ ; карбонільних груп ( $\text{C}=\text{O}$ )  $1760 \text{ cm}^{-1}$ ; смуга поглинання  $1475 \text{ cm}^{-1}$  – деформаційні коливання  $-\text{CH}_2$  і  $-\text{CH}_3$  груп; дублет  $1180 - 1170 \text{ cm}^{-1}$  – смуги поглинання  $\nu_2 - \nu_3(\text{C} - \text{O} - \text{C})$ ; смуга  $730 \text{ cm}^{-1}$  – чисте коливання вуглецевого скелету.

Наведені результати вказують, що в ізопропілестерах проявляється дуже щільне розділення смуг поглинання дублету  $1180-1170 \text{ cm}^{-1}$  у порівнянні з метилестерами, в спектрі олії дублету не проявляється, але незначно деформований пік смуги. Це вказує на те, що наявність двох  $-\text{CH}_3$  груп в ізопропілестерах призводить до більш квазіеластичності сумішевої системи естерів, а звідси слідує, що ця система має мати температуру застигання при більш низьких температурах. На це

вказує також і більш менші значення смуг поглинання (C – O – C). Все це має місце при незмінному чистому коливанні вуглецевого скелету (смуги поглинання  $730\text{ см}^{-1}$ ) і більш меншому значенні смуги поглинання валентних коливань C – H ( $2945\text{ см}^{-1}$  в порівнянні з  $2950\text{ см}^{-1}$ ) в інших досліджувальних системах.

Таким чином, проведені результати досліджень вказують на те, що наявність двох –CH<sub>3</sub> груп в ізопропіловому спирті:



приводить до більш технологічного ізопропілестерного біопалива в порівнянні з метилестерним у зв'язку з більшою надійністю експлуатації при низьких температурах.

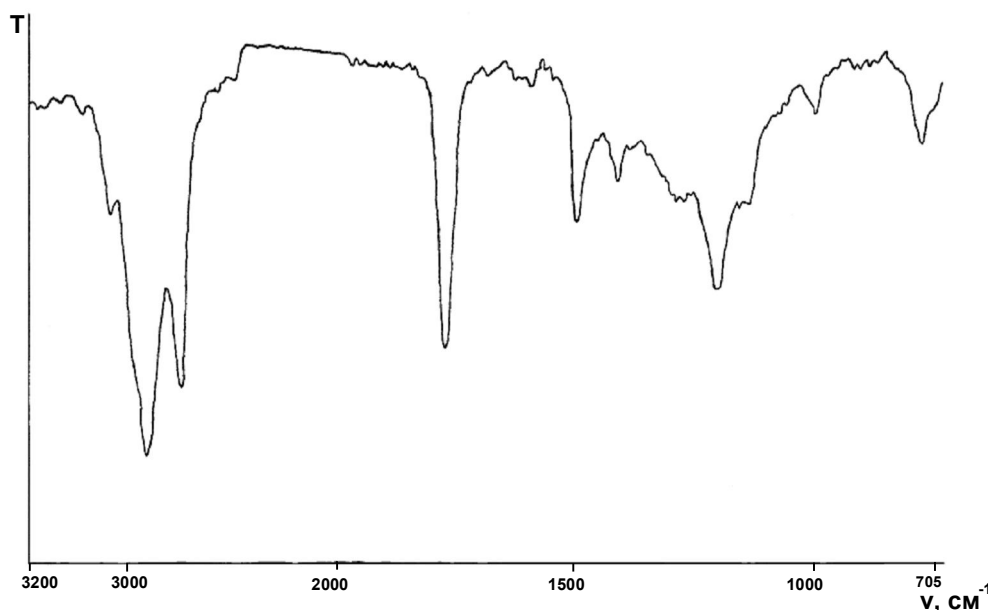


Рис. 3. ІЧ-спектр ізопропілестерів

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

1. Дослідженнями інфрачервоної спектроскопії гліцериду ріпакової олії, її метилестерів та ізопропілестерів показано наявність змін у валентних коливаннях C – H груп, карбонільних в групах –CH<sub>2</sub> та –CH<sub>3</sub>, а також смуг поглинання в (C – O – C), що дає підстави зробити висновок про різний складний вплив ізопропілового та метилового спиртів на структуру та властивості одержаних сумішевих естерів.

2. Одержані результати показали, що наявність двох –CH<sub>3</sub> груп в ізопропіловому спирті структурують ізопропілестери з більш низькою температурою застигання, завдяки створенню більшої квазіеластичності, обумовленої міжмолекулярними взаємодіями ліофобних та ліофільних груп з їх енергетичною перебудовою.

1. Дехант И., Данц Р., Коммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. Перевод с немецкого В.В. Архангельского. Под редакцией Э.Ф. Олейника. – М.: «Химия», 1976. – 471 с.
2. Чигибабин А.Е. Основные начала органической химии. М.: Госхимиздат, 1954. Т. 1. – 795 с.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2014.

**В.Я. Шемет, Ю.В. Садовська**

*Луцький національний технічний університет*

### **ХАЛЬКОГЕНІДИ У СУЧАСНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ**

*Охарактеризовано бінарні напівпровідникові сполуки, що обмежують квазіпотрійні системи, компонентами яких виступають РЗМ, р- та d- елементи I, II груп, р- елементи III, IV груп Періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва та халькогени (р- елементи VI групи). Визначено основні способи використання халькогенідів в сучасних технологіях. Досліджено найбільш вживані сучасні сполуки халькогенідів.*

**Ключові слова:** напівпровідникові сполуки, халькогеніди, інфрачервона область, фазовий перехід.

**Літ. 10.**

**В.Я. Шемет, Ю.В. Садовская**

### **ХАЛЬКОГЕНИДЫ В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

*Охарактеризованы бинарные полупроводниковые соединения, ограничивающие квазитройные системы, компонентами которых выступают РЗМ, р-и d-элементы I, II группы, р-элементы III, IV группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева и халькогены (р-элементы VI группы). Определены основные способы использования халькогенидов в современных технологиях. Исследованы наиболее употребляемые современные соединения халькогенидов.*

**Ключевые слова:** полупроводниковые соединения, халькогениды, инфракрасная область, фазовый переход.

**V.Ya. Shemet, Y.V. Sadovska**

### **CHALCOGENIDES IN MODERN MATERIAL SCIENCE**

*Characterized binary semiconductor compounds that limit quaternary system components which are the rare earth elements, p-and d-elements I, II group, p-elements III, IV of the periodic table of elements and chalcogens (p-elements of group VI). The main uses of chalcogenides in modern technologies has been defined. Studied the most commonly used modern chalcogenide compounds.*

**Keywords:** semiconductor compounds, chalcogenides, infrared region, phase transition.

**Постановка проблеми.** В умовах постійного розвитку сучасна промисловість потребує нових матеріалів, які б задовільняли всі потреби сучасного ринку. З розвитком науки і техніки перелік використовуваних матеріалів доповнюють нові матеріали з оптимальними властивостями. Розвиток науки і техніки досяг тієї межі, коли класичні матеріали не задовільняють їх потреб. Тому закономірно виникає проблема пошуку матеріалів з якісно новими властивостями. У наш час кількість напівпровідникових матеріалів, що застосовуються, значно розширена. Синтезовано ряд речовин, які мають важливе практичне значення.

Важливим напрямком сучасного напівпровідникового матеріалознавства є ускладнення досліджуваних систем і, відповідно, речовин, які в них утворюються. Серед складних напівпровідникових систем важливе місце займають тернарні та тетрарні халькогенідні системи, утворені бінарними напівпровідниковими сполуками, компонентами яких виступають РЗМ, р- та d- елементи I, II груп, р- елементи III, IV груп Періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва та халькогени (р- елементи VI групи) [1, 2].

Рідкісноземельні метали (РЗМ), їх сполуки та сплави за останні роки завоювали велике визнання в науці і техніці. Завдяки своїм унікальним властивостям, зокрема магнітним характеристикам, інтерметалічні сполуки використовують у електроніці, радіо – та електротехніці. Халькогеніди досліджуються завдяки їхнім специфічним термічним, електричним і оптичним властивостям. Матеріали на їх основі знайшли застосування в інфрачервоній та лазерній техніці, нелінійній оптиці, термоелектричних генераторах, запам'ятовуючих пристроях. Нові халькогенідні матеріали використовують для одержання плівок та композитів, вирощування монокристалів, виготовлення елементів напівпровідникових приладів.

РЗМ ефективно використовуються в металургії. Вони є цінними легуючими добавками до металів та сплавів, сприяють покращенню мікроструктури і властивостей, підвищують жаростійкість та міцність сплавів, їх антикорозійні властивості [2].

**Метою даного дослідження** є встановлення доцільності використання халькогенідів у сучасному матеріалознавстві, визначення основних напрямів їх використання.

**Основні методи дослідження.**

**Рентгенофазовий та рентгеноструктурний аналіз.** Розрізняють рентгенофазовий та рентгеноструктурний аналіз. Завдання першого – ідентифікація кристалічної речовини за таблицями рентгенівського показника. Найчастіше для рентгенофазового аналізу використовують



метод порошку. Кінцевим завданням рентгеноструктурного аналізу є одержання даних, за якими можна побудувати просторову модель кристалічної речовини: визначення сингонії та параметрів елементарного паралелепіпеда; типу решітки Браве; точкової та просторової групи; числа формульних одиниць в елементарному паралелепіпеді; координат атомів. Основні методи рентгеноструктурного аналізу: Лауе, обертання коливання, гоніометричні та порошку.

Основною задачею рентгенофазового аналізу є ідентифікація різних фаз в їх суміші на основі аналізу дифракційної картини. Проходження рентгенівського випромінювання через речовину супроводжується взаємодією рентгенівських променів з речовиною. Відомо три типи взаємодії: розсіювання рентгенівського випромінювання (зі зміною і без зміни довжини хвилі), фотоелектричний ефект і утворення електронно-позитронних пар.

Речовина, яка піддається дії рентгенівського випромінювання, випускає вторинне випромінювання, довжина хвилі якого або дорівнює довжині падаючих променів, або незначно відрізняється. При розсіюванні без зміни довжини хвилі змінне електромагнітне поле, яке створюється пучком рентгенівських променів, викликає коливання електронів опромінюваної речовини, і вони стають джерелом когерентного випромінювання.

Внаслідок когерентності променів, які розсіюються різними атомами, можуть дифрагувати. Відстань між атомними площинами в кристалах співрозмірні з довжинами хвиль рентгенівських променів, тому кристал є дифракційною решіткою для рентгенівського випромінювання.

Для виникнення дифракційної картини необхідно, щоб виконувалась умова:

$$2d\sin\theta = n\lambda - \text{рівняння Вульфа - Брега;}$$

а також три умови Лауе:

$$a(\cos\varphi_1 - \cos i_1) = h\lambda;$$

$$b(\cos\varphi_2 - \cos i_2) = k\lambda;$$

$$c(\cos\varphi_3 - \cos i_3) = l\lambda,$$

де  $d$  - міжплощинні віддалі;  $\theta$  - кут падіння;  $n$  - порядок відбиття;  $\lambda$  - довжина хвилі;  $a, b, c$  - періоди ідентичності;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - кути падіння рентгенівських променів;  $i_1, i_2, i_3$  - кути відбиття рентгенівських променів;  $h, k, l$  - індекси площини.

На використанні рівняння Вульфа-Брега базуються всі ті розрахунки рентгеноструктурних досліджень, що зв'язані з міжплощинними віддальми в кристалі [1, 3].

**Електронографія та нейтронографія.** Існує певна аналогія в законах дифракції рентгенівського випромінювання та пучка електронів або нейтронів у кристалах, але розсіювання як електронів, так і нейтронів відбувається внаслідок взаємодії з нуклонами ядер, тоді як рентгенівське випромінювання розсіюється при взаємодії з електронними оболонками.

Дифракція електронних променів значно сильніша, ніж рентгенівських, але внаслідок інтенсивного поглинання їх атомами електронні промені проходять лише крізь тоненькі пластинки кристалів. Тому електронографія незамінна при дослідженні поверхневих шарів, дрібнодисперсних фаз та дуже малих кількостей речовин. Так кристалічну структуру Полонію було визначено електронографічним методом у зразку, що містив лише  $10^{-7}$  г.

Джерелом пучка нейтронів є атомний реактор, тому метод нейтронографії дуже дорогий. Поки, що не вдається добувати вузькі монохроматичні пучки нейтронів. Звичайно пучок нейтронів містить невеликий інтервал довжини хвиль (близько 0,108 нм). Фактори розсіювання нейтронів, на відміну від атомних факторів для рентгенівського випромінювання, практично однакові для більшості елементів, але для деяких, зокрема  $^1\text{H}$  і Марганцю, мають від'ємну величину, тому основне застосування методу електронографії – локалізація атомів водню в структурі.

**Основні результати дослідження.** Щоб говорити про застосування халькогенідів, для початку розглянемо їх властивості. Властивості халькогенідів різноманітні. В основному, вони мають ковалентний зв'язок. Ширина забороненої зони від сотих часток до 4 еВ. Із збільшенням температури в багатьох халькогенідів зменшується рухливість носіїв струму, оскільки вони розсіюються на оптичних коливаннях решітки за законом  $U = T - 5/2$ . Провідність їх залежить від домішок, причому роль донорів і акцепторів можуть грати стехіометричні дефекти кристалів. Більшість сульфідів, селенідів і телуридів мають ширину забороненої зони в межах 0,01...0,5 еВ.

Всі халькогеніди застосовуються як високочутливі індикатори ІЧ-випромінювання, використовують як фоторезистори в фотолітографії. Охолодження фоторезисторів на їх основі зміщує фотопровідність в область довгих хвиль і збільшує чутливість вимірювальних приладів. При цьому значно зменшується фон від теплових переходів електронів. Халькогеніди широко використовуються в вигляді халькогенідного скла, наприклад, в виробництві компакт- і dvd-

дисків. Також халькогеніди використовують як резистивні елементи в PCRAM (пам'ять зі зміною фазового стану).

Халькогеніди є вихідними матеріалами для створення методом резистивного або електронно-променевого випаровування прозорих тонкоплівкових інтерференційних покриттів, які змінюють і регулюють оптичні властивості деталей з скла, кварцу, монокристалів [4, 5]. Основне їх застосування – виготовлення одношарових і багатшарових (в якості компонента високого заломлення) оптичних покриттів, охоплюють видимий і інфрачервоний діапазони спектра. Для виконання просвітлюючої (антивідбиваючої) і відбиваючої функцій, в ролі інтерференційних фільтрів, світлорозподілювачів, діелектричних і захисних покриттів в системах оптичного приладобудування різного призначення (наприклад, в якості діелектричних відбиваючих покриттів на різні області спектру і в ряді інших застосувань). Напівпровідникові властивості халькогенідних матеріалів обумовлюють їх використання в інтерференційній оптиці в спектральному діапазоні, який відповідає енергіям, менших значень ширини забороненої зони. Характерними ознаками є:

- високе значення показника заломлення;
- висока відносна щільність плівок;
- гарне суміщення стандартного матеріалу оптичних покриттів для видимої та інфрачервоної областей, яким є цинк сульфід, з іншими напівпровідниками (отримання товстих плівок, володіють міцністю при роботі в інфрачервоному діапазоні) і фторидними плівками (підвищення ефективності просвічування і поліпшення експлуатаційних властивостей) [6].

Ще одне з застосувань халькогенідів – це створення нового типу енергонезалежної пам'яті – пам'яті на основі фазового переходу (також відома як PCM, PRAM, PCRAM, OvonicUnifiedMemory, Chalcogenide RAM і C-RAM). PRAM – одна з нових технологій пам'яті.

Властивості халькогенідів з точки зору потенційної технології пам'яті вперше були досліджені Стенфордом Овшінським з компанії EnergyConversionDevices [7].

Халькогеніди свинцю є базовими матеріалами для створення термоелектричних перетворювачів, а також фотоприймальних і випромінюючих структур інфрачервоного діапазону оптичного спектру. Основним фактором, що визначає фізико-хімічні властивості і робочі характеристики приладових структур є дефектна підсистема базового матеріалу. Халькогеніди свинцю – сульфід PbS, селенід PbSe і телурид PbTe – сріблясто-сірі кристали кубічної сингонії (типу NaCl); при тиску вище 2,4...4,2 МПа стійка ромбічна модифікація (типу SnS). Халькогеніди свинцю та їх тверді розчини – напівпровідникові матеріали, які застосовують у електроніці та радіотехніці. Наприклад: PbSe – матеріал для фоторезисторів, фотоприймачів і випромінювачів в ІЧ діапазоні, активне середовище в інжекції, лазерах, може перебудовувати довжину хвилі від 8,5 до 12 мкм; PbTe – фотопровідник при низьких температурах, матеріал для ІЧ оптики, цінний матеріал для інфрачервоних лазерів, які можуть змінювати довжину хвилі. Це якраз припадає на довжину хвиль, які добре пропускає земна атмосфера. При цьому, деформуючи кристал звуковими хвилями, можна здійснити частотну модуляцію випромінювання.

Сульфіди кадмію та цинку використовуються як фоторезистори, чутливі до видимої області. Максимум чутливості – 0,52 мкм. Халькогеніди цинку і кадмію, леговані деякими металами, мають високі люмінесцентні властивості, тобто їх використовують як люмінофори. При цьому кількість і природа легованих домішок зміщує смуги випромінювання люмінесценції в кінескопах, відеотехніці і т.д.

Бісмут телурид ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) – кращий термоелектричний матеріал, який використовується в основному для термоелектричних генераторів і холодильників. Він має ромбоїдричну кристалічну структуру, що складається з атомів, розташованих перпендикулярно до самої діагоналі ромбоїдрів [8]. При цьому між шарами зв'язок слабкий, тобто характерна анізотропія. Ширина забороненої зони  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  дорівнює 0,13 еВ. При охолодженні ширина забороненої зони зростає і становить від 0,13 до  $9,5 \cdot 10^{-5}$  еВ. В основному  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  – кристали р- типу, а якщо як домішку додати йод, то отримуємо кристали n- типу. На практиці застосовується не чистий  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , а сплави типу  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  -  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  або  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  -  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ .

Халькогеніди олова – сполуки олова з Сульфуром – SnS, SnS<sub>2</sub>, Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, Sn<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, з селеном – SnSe, SnSe<sub>2</sub> та з телуром – SnTe. Це кристали, напівпровідники, не розчинні у воді. Взаємодіють з концентрованими HNO<sub>3</sub> та H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, царською горілкою. SnS розчиняється також в концентрованій хлоридній кислоті і розчинах полісульфідів лужних металів і амонію, SnS<sub>2</sub> – в розчинах сульфідів лужних металів і амонію. Халькогеніди олова – матеріали для термоелектричних генераторів (SnTe), фоторезисторів (SnS, SnS<sub>2</sub>, SnSe), фотодіодів (SnS, SnSe), перемикачів у запам'ятовуючих

пристроях ЕОМ ( $\text{SnS}_2$ ,  $\text{SnSe}_2$ ); в техніці застосовують  $\text{SnSe}$  і  $\text{SnTe}$ . Сульфід  $\text{SnS}$  – каталізатор полімеризації, використовується для отримання  $\text{SnO}_2$ ;  $\text{SnS}_2$  – пігмент (імітатор золота) для "позолочення" (дерева, гіпсу); тверді розчини на основі  $\text{SnSe}$ ,  $\text{PbSe}$  – матеріали для ІЧ оптоелектроніки, лазерної техніки. Сульфід  $\text{GeS}_2$  та  $\text{GeSe}_2$  є склоутворювачами. Сульфід  $\text{GeS}_2$  використовується для оптичних елементів технологічних  $\text{CO}_2$ -лазерів.

Нанорозмірні халькогеніди металів (сполуки металів з сіркою, селеном або телуrom) відносяться до перспективних матеріалів для сучасної електроніки та інших областей техніки і технології, використовуються в якості матеріалів для фотокатодів, гетеропереходів і фоторезисторів, лазерних матеріалів, компонентів люмінофорів, термоелектричних перетворювачів, матеріалів для оптичних, магнітних і напівпровідникових пристроїв, в антифрикційних композиціях, як каталізatori в органічному синтезі і нафтопереробці. Дослідження халькогенідів металів, виконані в останні 10...15 років, показали, що перехід від макро- і мікророзмірів до розмірів в інтервалі 1...100 нм призводить до якісних змін фізико-хімічних властивостей (електропровідності, магнетизму, поглинання і випромінювання світла, оптичного заломлення, термостійкості, міцності), до прояву каталітичної або реакційної здатності сполук і унікальних властивостей одержуваних на їх основі матеріалів, що не спостерігаються у макро- і мікроскопічних тіл тієї ж хімічної природи. Ці особливості наноматеріалів виступають як визначальний фактор для розвитку нанотехнологій в сучасній науці і техніці. Різноманітність областей і форм застосування наночасток халькогенідів металів стимулюють розробку простих і доступних способів їх отримання.

Міжнародною групою дослідників створено фотогальванічний пристрій на основі дихалькогеніду перехідного металу (Цирконій або Ніобій), товщина якого становить лише кілька атомів, а квантова ефективність, що являє собою частку фотонів, які конвертуються в електрони, досягає 30 %, що дозволяє виключити обмеження на застосування сонячних батарей. У результаті отримана нова гетероструктура на двовимірних атомних кристалах, завдяки якій стане можливо виготовляти, наприклад, сонячні батареї для зарядки ноутбука або мобільного телефону, що володіють гнучкістю [9]. Структура цього пристрою складається з шару графену і дихалькогеніду перехідного металу, що є напівпровідним матеріалом, і являє собою шаруватий матеріал, що володіє двовимірною кристалічною решіткою, у вигляді рівносторонніх трикутників. Вони в свою чергу розташовуються між кристалічною решіткою, утвореною атомами халькогенів – Сульфуру, Селену і Телуру, яка має вигляд тригональної площини, через що в ній виявляються сингулярності Ван-Гофа, завдяки яким електрони цих елементів стають сприйнятливими до фотонного опромінення. Отриманий дослідниками матеріал складається з декількох шарів – зовнішнього, що є захисним ізолятором (нітрид бору), під яким розташовується шар міцного, прозорого і гнучкого провідника (графен), а під ним вже розміщений дихалькогенід перехідного металу. У результаті опромінення дихалькогенідного шару відбувається відрив електронів, які збираються в графеновому шарі, з якого і знімається різниця потенціалів. Товщина отриманого матеріалу близько 20 Å, таким чином сонячна зарядка для ноутбука, побудована на його основі буде мати невеликі габарити і масу, що дозволить купити сонячну батарею за набагато меншою ціною [10].

Самарій та європей сульфідів, селенідів і телуриди належать до напівпровідникових сполук з складною енергетичною структурою, зумовленою наявністю у забороненій зоні вузької енергетичної смуги утвореної f-електронами атомів металу. Це надає кристалам цілого ряду унікальних властивостей, завдяки яким вони можуть бути використані у найрізноманітніших галузях приладобудування. Самарій та європей халькогеніди кристалізуються зі значним відхиленням від стехіометрії (до кількох атомних відсотків), і в межах області гомогенності фізико-хімічні властивості можна змінювати шляхом контролю дефектної підсистеми. При цьому, для встановлення типу та концентрації точкових дефектів, необхідно визначити енергії їх утворення. Сульфідів  $\text{La}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Ce}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Tb}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Tm}_2\text{S}_3$  та  $\text{Yb}_2\text{S}_3$  володіють високою твердістю, термостійкістю та широкою областю прозорості. Тому ці сполуки використовують для оптичної кераміки. Телурид  $\text{GeTe}$  є напівпровідниковим матеріалом та володіє р-типом провідності.

**Висновки.** Досліджено використання халькогенідів у сучасному матеріалознавстві. Охарактеризовано найбільш вживані сполуки на основі халькогенідів, описано їх застосування в сучасних технологіях. За результатами досліджень можна зробити висновок, що халькогеніди за рахунок високого показника заломлення, високої відносної щільності плівок на їх основі, можливості використання в видимій і інфрачервоній областях роблять їх незамінними матеріалами для вирішення цілого ряду матеріалознавчих питань. В силу того, що аморфний і кристалічний стан халькогенідів різко відрізняється значенням електричного опору, використання їх для нового

типу енергонезалежної пам'яті відкриває широкі перспективи використання халькогенідів в науці і техніці.

1. Уманский Я.С. Рентгенография металлов и полупроводников / Я.С. Уманский – М.: Металлургия, 1969. – 496 с.
2. Абрикосов Н.Х. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе / Н.Х. Абрикосов, Л.В. Порецкая и др. – М.: Наука, 1975. – С. 49-74.
3. Бергер Л.И. Диаграммы состояния систем  $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{SnSe}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{SnSe}_3 - \text{SnSe}$  и  $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{SnSe}$  / Л.И. Бергер, Е.Г. Котина // Неорган. материалы. – 1973. – Т. IX, №3. – С. 368-370.
4. Олексеюк І.Д. Квазіпотрійні халькогенідні системи / І.Д. Олексеюк – Луцьк: Вежа – ВДУ ім. Лесі Українки, 1999. – Т.1. – 168 с.
5. Олексеюк І.Д. Бінарні і тернарні напівпровідникові фази в системах  $\text{Me}-\text{B}^{\text{V}}-\text{C}^{\text{VI}}-(\text{D}^{\text{VII}})$ : монографія / І.Д. Олексеюк – Луцьк: Вежа, 1993. – 347 с.
6. Grizik A.A. Lanthanum sesquisulfides ( $\text{Ln}_2\text{S}_3$ ) related to delta holmium sulfide / A.A. Grizik, A.A. Eliseev, G.P. Borodulenko, G.M. Kuz'micheva, V.A. Tolstova // Z. Neorg. Chem. – 1976. – V. 21. – P. 3208-3211.
7. Бестаев М.В. Управление зародышеобразованием при выращивании монокристаллов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  из газовой фазы / А.И. Горелик, М.В. Бестаев // Изв. ТЭТУ С. Петербург, 1996. – Вып.495. – С. 50-53.
8. MacLachlan M.J. Synthesis and crystal structure of delta-( $\text{GeS}_2$ ), the first germanium sulfide with an expanded framework structure / M.J. MacLachlan, S. Petrov, R.L. Bedard, I. Manners, G.A. Ozin // Angew. Chem. Int. ed. – 1998. – V. 37(15). – P. 2076-2079.
9. Хайрутдинов Р.Ф. Химия полупроводниковых наночастиц / Хайрутдинов Р.Ф. // Успехи химии, 1998. – Т. 67. – №2. – С. 125-140.
10. Губин С.П. Перспективные направления наноауки: химия наночастиц полупроводниковых материалов / С.П. Губин, Н.А. Катаева, Г.Б. Хомутов // Известия Академии наук. Серия химическая, 2005. – № 4. – С. 811.

Стаття надійшла до редакції: 20.02.2014

УДК 539.3

**Н.В. Шинкарчук***Рівненський державний гуманітарний університет***ОДНОСТОРОННИЙ КОНТАКТ ІЗОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ З КОЛОВИМ ОТВОРОМ І ПРУЖНОГО ДИСКА**

*Досліджується напружений стан кусково-однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом по лінії умовного поділу матеріалів пластинки і пружного диска за умови контактування їхніх берегів. Пластинчаста конструкція перебуває в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності.*

*Наближений розв'язок системи сингулярних інтегральних рівнянь задачі реалізовано методом механічних квадратур і колокації, яким визначаються положення і розміри зони контакту та напружений стан на контурі отвору пластинки.*

*Ключові слова:* напружений стан, пружний диск, ізотропна пластинка, контактні зусилля, гладкий контакт, береги розрізу.

*Рис. 4. Табл. 1. Форм. 13. Літ. 9.*

**Н. В. Шинкарчук****ОДНОСТОРОННИЙ КОНТАКТ ИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНКИ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ И УПРУГОГО ДИСКА**

*Исследуется напряженное состояние кусочно-однородной изотропной пластинки с круговым разрезом по линии условного разделения материалов пластинки и упругого диска при контакте их берегов. Пластинчатая конструкция находится в условиях однородного обобщенного плоского напряженного состояния на бесконечности.*

*Приближенное решение системы сингулярных интегральных уравнений задачи реализовано методом механических квадратур и коллокации, которым определяются положение и размеры зоны контакта, и напряженное состояние на контуре отверстия пластинки.*

*Ключевые слова:* напряженное состояние, упругий диск, изотропная пластинка, контактные усилия, гладкий контакт, берега разреза.

**N.V. Shynkarchuk****UNILATERAL CONTACT ISOTROPIC PLATE WITH CIRCULAR HOLE AND ELASTIC DISK**

*We investigate the stress state piecewise homogeneous isotropic plate with circular cut along the line of plate and an elastic disk provided contact their shores. Construction of plate is located in conditions a homogeneous generalized flat state of stress at infinity.*

*Approximate solution a system of singular integral equations of the problem is built by the method of mechanical quadrature and collocation, which defines the position and size of the contact area and stress state on the contour of the hole plate.*

*Key words:* a stress state, elastic disk, isotropic plate, a contact force, smooth contact, edges of cut.

Міцність та роботоздатність кусково-однорідних пластинок, як тонкостінних елементів конструкцій, значною мірою залежить від наявності на межі поділу матеріалів дефектів типу тріщин (розрізів нульової ширини), що можуть виникнути в процесі виготовлення або експлуатації деталі. Дослідження питання, чи береги розрізу за дії зовнішнього навантаження розходяться, чи контактують, має важливе значення з точки зору забезпечення непроникності або герметичності конструкції.

Контактні задачі для однорідних пластинок з розрізами по дузі кола, які перебувають в умовах узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності, зведенням до задачі лінійного спряження [1] досліджено в роботах [2, 3].

Числово-аналітичний розв'язок задачі про напружений стан нескінченної ізотропної пластинки з еліптичним отвором, яка перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності, і абсолютно жорсткого диска, за наявності на межі поділу матеріалів зони спаю та контакту без тертя представлено у [4].

В даній статті запропоновано розв'язок контактної задачі для кусково-однорідної пластинки, яка перебуває в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану (УПНС) на нескінченності, за наявності на межі поділу матеріалів зон спаю, гладкого без тертя контакту і відставання.

**Постановка задачі.** Допустимо, що в круговий отвір радіусом  $\rho_0 = 1$  нескінченної ізотропної пластинки товщиною  $2h$  вставлено без зазору і натягу круглий пружний ізотропний

диск такої ж товщини. Середню площину пластинки віднесемо до системи прямокутних  $(x, y)$  і полярних  $(r, \delta)$  координат з полюсом в центрі отвору (рис. 1).

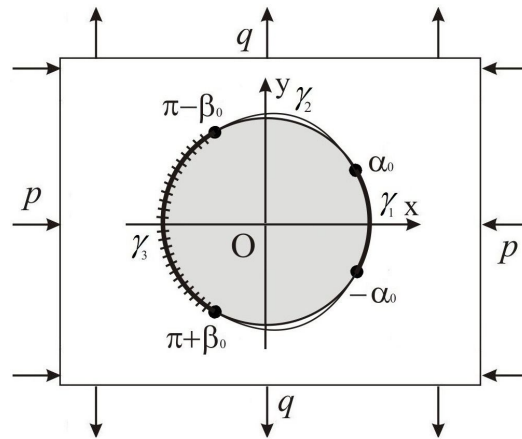


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Нехай на симетричній ділянці  $\gamma_3 = [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$  контуру  $\gamma$  пластинку спаяно з диском. Пластинчаста конструкція перебуває в умовах однорідного напруженого стану на нескінченності, викликаного рівномірно розподіленими зусиллями  $p$  та  $q$ , які діють в напрямках координатних осей. Внаслідок дії такого навантаження на ділянці  $\gamma_1 = [-\alpha_0, \alpha_0]$  пластинка вступає в контактну взаємодію з диском. Контакт між пластинкою і диском на ділянках  $\gamma_2$  відсутній.

Розв'язок поставленої задачі передбачає визначення такої величини розрізу, для якої:

- 1) зона контакту збігається з розрізом, причому нормальні контактні зусилля на кінцях цієї зони відмінні від нуля (повний контакт берегів розрізу);
- 2) зона контакту збігається з розрізом, але існує дві точки, в яких нормальні контактні зусилля дорівнюють нулю (зародження зон відставання);
- 3) існує ізольована зона контакту і дві зони відставання, які прилягають до кінців зони спаю.

Для кожного з цих випадків потрібно визначити напружений стан на контурі  $\gamma$ .

**Інтегральні рівняння задачі.** Компоненти вектора зміщення контурних точок ізотропної пластинки при заданому навантаженні визначаються за формулами [4]

$$2EhU = (1-\nu) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1'(t)dt + \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + R_0(\lambda) + c_1;$$

$$2EhV = (1-\nu) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2'(t)dt - \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + Q_0(\lambda) + c_2, \quad (1)$$

аналогічні співвідношення для диска на підставі [5] можна записати у вигляді

$$2E^{(1)}hU^{(1)} = (1-\nu^{(1)}) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1^{(1)'}(t)dt - \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{(1)'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt -$$

$$- \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_2^{(1)'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - T^0 \cos \lambda + c_1^{(1)};$$

$$2E^{(1)}hV^{(1)} = (1-\nu^{(1)}) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2^{(1)'}(t)dt + \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{(1)'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_1^{(1)'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - T^0 \sin \lambda + c_2^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma. \quad (2)$$

Тут  $R_0(\lambda) = -(3p + q) \cos \lambda$ ,  $Q_0(\lambda) = (3q + p) \sin \lambda$ ;  $T^0 = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} (f_2^{(1)'}(t) \cos t - f_1^{(1)'}(t) \sin t) dt$ ;

$$f_1 + if_2 = i \int_{-\alpha_0}^{\lambda} (T_{\rho}^* + iS_{\rho\lambda}^*) e^{it} dt, \quad T_{\rho}^* + iS_{\rho\lambda}^* = (T_{\rho} + iS_{\rho\lambda}) \omega'(\sigma); \quad \tilde{a}(\lambda) + i\tilde{b}(\lambda) = \omega'(\sigma) e^{i\lambda}; \quad \sigma = e^{i\lambda};$$

$$f_1^{(1)} + if_2^{(1)} = i \int_{-\alpha_0}^{\lambda} (T_{\rho}^{(1)*} + iS_{\rho\lambda}^{(1)*}) e^{it} dt, \quad T_{\rho}^{(1)*} + iS_{\rho\lambda}^{(1)*} = (T_{\rho}^{(1)} + iS_{\rho\lambda}^{(1)}) \omega'(\sigma); \quad \tilde{a}(\lambda) + i\tilde{b}(\lambda) = \omega'(\sigma) e^{i\lambda};$$

$\omega'(\sigma) = \alpha + i\beta$ ;  $\alpha = 1$ ;  $\beta = 0$ ;  $E, E^{(1)}, \nu, \nu^{(1)}$  – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки і диска;  $c_1, c_1^{(1)}, c_2, c_2^{(1)}$  – сталі;  $T_{\rho}, S_{\rho\lambda}$  – нормальні та дотичні зусилля на контурі  $\gamma$ .

В зоні гладкого контакту граничні умови задачі обираємо у вигляді рівності нормальних зміщень пластинки і диска [4, 6]

$$\tilde{a}(\lambda)(U - U^{(1)}) + \tilde{b}(\lambda)(V - V^{(1)}) = 0, \quad S_{\rho\lambda} = 0; \quad \lambda \in \gamma_1, \tag{3}$$

а в зоні спаю у вигляді рівності зміщень їх контурних точок [1, 4]

$$U - U^{(1)} = 0; \quad V - V^{(1)} = 0, \quad \lambda \in \gamma_3. \tag{4}$$

Умови (3), (4) записані у припущенні, що на контурі  $\gamma$

$$T_{\rho}^{(1)} = T_{\rho}, \quad S_{\rho\lambda}^{(1)} = S_{\rho\lambda}; \quad f_1^{(1)'}(t) = f_1'(t), \quad f_2^{(1)'}(t) = f_2'(t). \tag{5}$$

Введенням позначення

$$f_1'(\lambda) + if_2'(\lambda) = f_1^{\circ'}(\lambda) + if_2^{\circ'}(\lambda), \quad \lambda \in [-\alpha_0, \alpha_0];$$

$$f_1'(\pi + \tilde{\lambda}) + if_2'(\pi + \tilde{\lambda}) = \tilde{f}_1'(\tilde{\lambda}) + i\tilde{f}_2'(\tilde{\lambda}), \quad \tilde{\lambda} \in [-\beta_0, \beta_0], \tag{6}$$

інтеграли, що входять до співвідношень (1), набудуть вигляду

$$\frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_j'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt = \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_j^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt;$$

$$\frac{2}{\pi} \int_{\pi - \beta_0}^{\pi + \beta_0} f_j'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt = \frac{2}{\pi} \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_j'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t}, \quad j = 1, 2. \tag{7}$$

Підставляючи (1), (2) у граничні умови (3), (4) та використавши (5) – (7), одержимо систему з чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь із логарифмічними ядрами для визначення функцій  $f_1^{\circ'}, f_2^{\circ'}, \tilde{f}_1', \tilde{f}_2'$

$$\tilde{a}(\lambda) \left[ \left[ (1 - \nu) - k(1 - \nu^{(1)}) \right] \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1^{\circ'}(t) dt + R_0(\lambda) + kT^0 \cos \lambda + \frac{2(1+k)}{\pi} \left[ \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] \right] + \tilde{b}(\lambda) \left[ \left[ (1 - \nu) - k(1 - \nu^{(1)}) \right] \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2^{\circ'}(t) dt + Q_0(\lambda) + kT^0 \sin \lambda - \frac{2(1+k)}{\pi} \left[ \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] \right] = \tilde{a}(\lambda) \tilde{c}_1 + \tilde{b}(\lambda) \tilde{c}_2,$$

$$f_1^{\circ'}(\lambda) \tilde{a}(\lambda) + f_2^{\circ'}(\lambda) \tilde{b}(\lambda) = 0, \quad \lambda \in [-\alpha_0, \alpha_0]. \tag{8}$$

$$\left[ (1 - \nu) - k(1 - \nu^{(1)}) \right] \left[ \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ'}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) d\tilde{t} \right] + \frac{2(1+k)}{\pi} \left[ \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \sin \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + R_0(\lambda) + kT^0 \cos \lambda = \tilde{c}_1;$$

$$\left[ (1-\nu) - k(1-\nu^{(1)}) \right] \left[ \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ\prime}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\tilde{\lambda}} \tilde{f}_2^{\prime}(\tilde{t}) d\tilde{t} \right] - \frac{2(1+k)}{\pi} \left[ \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ\prime}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \right. \\ \left. + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1^{\prime}(\tilde{t}) \ln \left| \sin \frac{\tilde{\lambda}-\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + Q_0(\lambda) + kT^0 \sin \lambda = \tilde{c}_2, \quad \lambda \in [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]; \quad \tilde{\lambda} \in [-\beta_0, \beta_0], \quad (9)$$

де  $k = \frac{E}{E^{(1)}}$ ;  $\tilde{c}_1 = kc_1^{(1)} - c_1$ ,  $\tilde{c}_2 = kc_2^{(1)} - c_2$ .

Умови силової рівноваги диска [1, 4]

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ\prime}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2^{\prime}(\tilde{t}) d\tilde{t} = 0; \quad \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ\prime}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1^{\prime}(\tilde{t}) d\tilde{t} = 0, \quad (10)$$

служать для визначення сталих  $\tilde{c}_1$  і  $\tilde{c}_2$ .

Контактні зусилля  $T_\rho$ ,  $S_{\rho\lambda}$  на контурі отвору пластинки з функціями  $f_1'(\lambda)$ ,  $f_2'(\lambda)$  зв'язані співвідношенням [7]

$$T_\rho + iS_{\rho\lambda} = \frac{(f_2'(\lambda) - if_1'(\lambda))(a(\lambda) - ib(\lambda))}{\alpha^2 + \beta^2}, \quad \lambda \in \gamma. \quad (11)$$

Кільцеві зусилля  $T_\lambda$  на контурі  $\gamma$  можна визначити за формулою [7, 8]

$$T_\lambda = \nu T_\rho + \frac{1}{(\alpha^2 + \beta^2)} \left\{ (1-\nu)(\alpha^2 + \beta^2) T_\rho(\lambda) - \frac{1}{\pi} \int_\gamma \left[ R(\lambda, t) - Q(\lambda, t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} \right] T_\rho(t) dt + \right. \\ \left. + \frac{1}{\pi} \int_\gamma \left[ Q(\lambda, t) + R(\lambda, t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} \right] S_{\rho\lambda}(t) dt + \alpha \tilde{\varepsilon}_\lambda^0 + \beta \tilde{V}^0 \right\}, \quad \lambda \in \gamma. \quad (12)$$

Тут введено позначення

$$R(\lambda, t) = \alpha(\lambda)\alpha(t) + \beta(\lambda)\beta(t); \quad Q(\lambda, t) = \alpha(\lambda)\beta(t) - \beta(\lambda)\alpha(t); \\ \tilde{\varepsilon}_\lambda^0 + i\tilde{V}^0 = (q-p) + 2(p+q)e^{-2i\lambda}.$$

Кільцеві зусилля на контурі пружного диска визначаються за формулою [5]

$$T_\lambda^{(1)} = T_\rho + \frac{1}{\pi} \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{S}_{\rho\lambda}(\tilde{t}) \operatorname{tg} \frac{\lambda-\tilde{t}}{2} d\tilde{t}. \quad (13)$$

Співвідношення (8) – (13) визначають математичну модель поставленої задачі. Розглянемо її часткові випадки:

- якщо  $E^{(1)} = E$ ,  $\nu^{(1)} = \nu$ , то з (8) – (13) одержимо систему співвідношень для однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом [2];
- при  $k \rightarrow 0$  система (8) – (13) визначає розв'язок задачі для ізотропної пластинки з впаєм абсолютно жорстким круглим диском.

**Наближений розв'язок задачі.** Знаходження точного розв'язку системи сингулярних інтегральних рівнянь (8) – (10) пов'язано із значними математичними труднощами. Для її наближеного розв'язання слід використовувати числові методи.

На підставі [9] наближений розв'язок одержаної системи рівнянь можна знайти методом механічних квадратур і колокації, оскільки на кінцях зони контакту функції  $f_1'$ ,  $f_2'$  дорівнюють нулю [8], а на кінцях зон спаю вони мають кореневу особливість з локальною осциляцією [1], причому в задачах визначення концентрації зусиль впливом осциляції можна знехтувати.

**Результати числового розрахунку.** Для кусково-однорідної пластинки, яка стискається на нескінченності зусиллями  $p$  в напрямку осі симетрії розрізу, досліджується вплив на компоненти напруженого стану відношення модулів Юнга  $k = E/E^{(1)}$  матеріалів пластинки і диска за умов повного та неповного контакту берегів розрізу.

В таблиці 1 для значень  $k = 1$  та  $k = 0.2$  наведено розміри зони контакту, що відповідає заданій зоні спаю, а також значення нормальних зусиль  $T_\rho$  в центрі цих зон. Результати числових



розрахунків компонентів напруженого стану пластинки і диска на контурі  $\gamma$  ілюструються на рис. 2 – 5. Штрихові лінії побудовано для випадку повного контакту берегів розрізу, суцільні – для випадку розмикання контакту в кінцевих точках розрізу, штрихпунктирні для випадку неповного контакту.

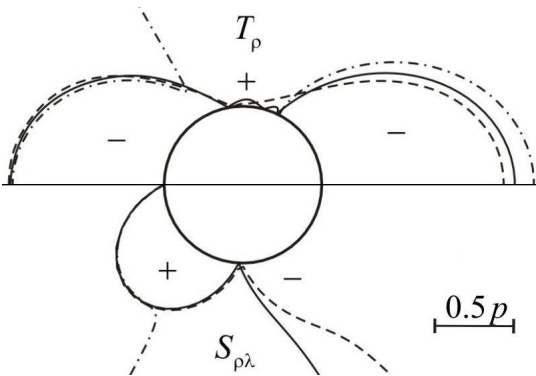


Рис. 2. Епюри розподілу зусиль  $T_\rho, S_{\rho\lambda}$  на контурі отвору при  $k = 1$

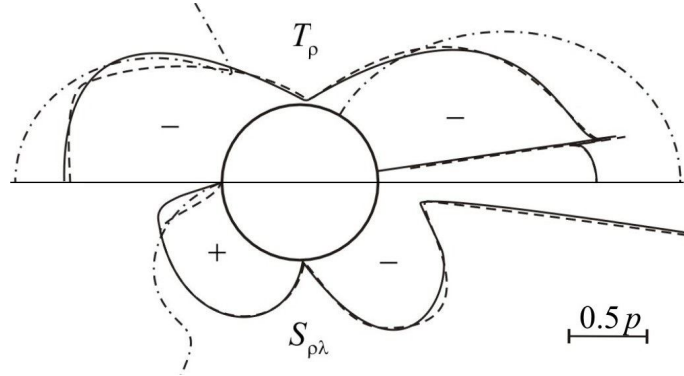


Рис. 3. Епюри розподілу зусиль  $T_\rho, S_{\rho\lambda}$  на контурі отвору при  $k = 0.2$

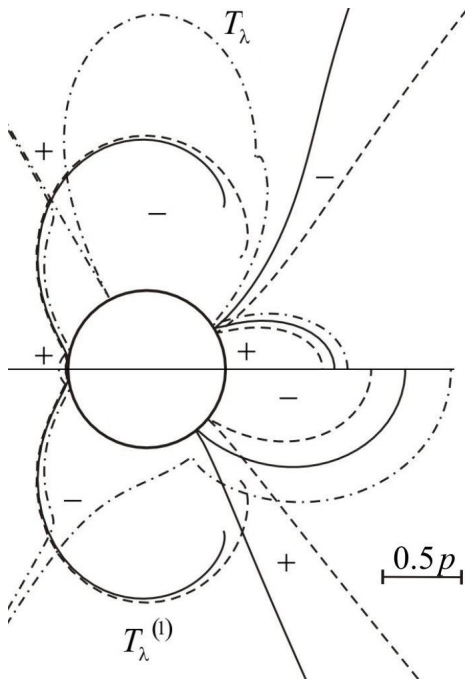


Рис. 4. Епюри розподілу зусиль  $T_\lambda$  для пластинки та  $T_\lambda^{(0)}$  для диска при  $k = 1$

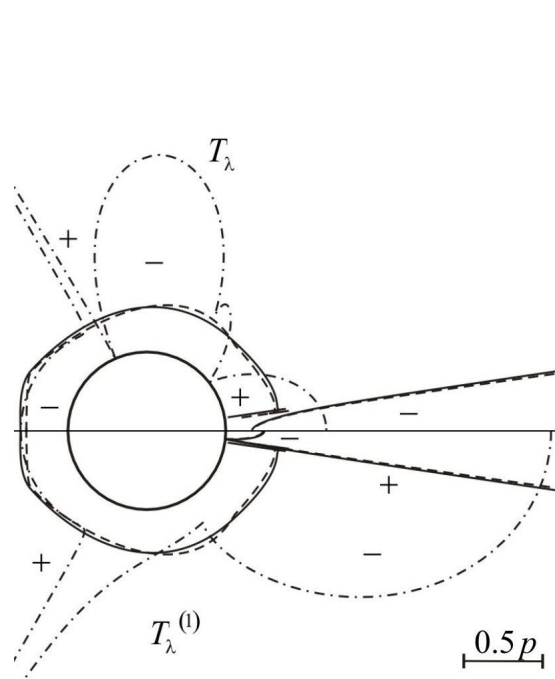


Рис. 5. Епюри розподілу зусиль  $T_\lambda$  для пластинки та  $T_\lambda^{(0)}$  для диска при  $k = 0.2$

Таблиця 1. Значення величин  $\alpha_0, T_\rho$

$\beta_0$ (град)		$\alpha_0$ (град)		$T_\rho (\lambda = 0)$		$T_\rho (\lambda = \pi)$	
$k = 1$	$k = 0.2$	$k = 1$	$k = 0.2$	$k = 1$	$k = 0.2$	$k = 1$	$k = 0.2$
130	172	50.0	8.0	-1.1543	-1.3981	-0.9882	-1.1221
115.37	171.68	64.63	8.32	-1.2238	-1.3995	-0.9805	-1.1793
60	60	62.71	59.62	-1.3450	-1.9361	-0.9604	-1.3235

**Висновки.** Для кусково-однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом, береги якого контактують частково або по всій довжині, знайдено граничні розміри зон контакту, при яких забезпечується герметичність та непроникність конструкції.

Максимальні нормальні зусилля в зоні гладкого без тертя контакту виникають при  $\lambda = 0$ . Збільшення розмірів зони спаю пластинки і диска призводить до зменшення зон контакту. При неповному контакті берегів розрізу на торцях зони спаю контактні і кільцеві зусилля набувають необмежених значень.

Запропонований метод може бути використаний при розв'язуванні аналогічної задачі для кусково-однорідної ізотропної пластинки із несиметричним коловим розрізом.

1. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
2. Гриліцький Д.В. Напруження в пластинках з коловою лінією розмежування граничних умов / Д.В. Гриліцький, Р.М. Луцишин. – Львів: Вид-во «Вища школа» при ЛДУ, 1975. – 116 с.
3. Гриліцький Д.В. Основні граничні задачі теорії пружності для безмежної ізотропної пластинки з впаяною круглою ізотропною шайбою з розрізами на лінії спаю / Д.В. Гриліцький // Питання механіки і математики. ЛДУ. – 1962. – Вип. 9. – С. 79 – 86.
4. Сяський А. Мішана контактна задача для ізотропної пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска / А. Сяський, Н. Шинкарчук // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль, 2011. – Т.16, № 1. – С. 16 – 21.
5. Сяський В.А. Вплив тертя на розподіл напружень при контакті гладких циліндричних тіл і штампів з кутовими точками / В.А. Сяський // Волинський математичний вісник. – Рівне, 1999. – Вип. 6. – С. 127 – 134.
6. Сяський А.О. Граничні умови контактних задач для нескінченної пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска / А.О. Сяський, С.М. Комбель // Волинський математичний вісник. – 2002. – Вип. 9. – С. 93 – 97.
7. Батишкіна Ю.В. Часткове підкріплення криволінійного отвору в нескінченній пластинці тонким пружним стержнем / Ю.В. Батишкіна, А.О. Сяський // Волинський математичний вісник. – 2002. – Вип. 9. – С. 4 – 11.
8. Сяський В.А. Мішана контактна задача для нескінченної пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска / В.А. Сяський, А.О. Сяський // Волинський математичний вісник. – Рівне, 1998. – Вип. 5. – С. 139 – 146.
9. Сяський А.О. Кусково-однорідна ортотропна пластинка з еліптичним розрізом за умови контактування його берегів / А.О. Сяський, Н.В. Шинкарчук // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). – Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2011. – Вип. 30. – С. 168 – 174.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2014.