

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

НАУКОВІ НОТАТКИ

Випуск 64



ЛУЦЬК - 2018

НАУКОВІ НОТАТКИ

**Міжвузівський збірник
(за галузями знань «Технічні науки»)**

**Випуск 64
2018**

Луцьк 2018

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Пустюльга С.І., декан МБФ, Луцький НТУ, д.т.н, професор; Рудь В.Д., Луцький НТУ, д.т.н., професор; Савчук П.П., ректор, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Шваб'юк В.І., Луцький НТУ, д.т.н., професор; Заболотний О.В., декан ТФ, Луцький НТУ, к.т.н., доцент.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Рудь В.Д., д.т.н., професор, Луцький НТУ (відповідальний редактор); Пустюльга С.І., д.т.н., професор, Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Заболотний О.В., к.т.н., доц., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Савчук П.П., асистент, Луцький НТУ (відповідальний секретар); Бобир М.І., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Гевко Б.М., д.т.н., професор, Тернопільський НТУ; Дядюра К.О., д.т.н., професор, Сумський державний університет; Жигуц Ю.Ю., д.т.н., професор, ДВНЗ Ужгородський національний університет; Кіндрачук М.В., д.т.н., професор, Національний Авіаційний університет; Лотиш В.В., к.т.н., доц., Луцький НТУ; Майстренко А.Л., д.т.н., член-кореспондент НАН України, Інститут надтвердих матеріалів; Максимович В.М., д.ф.-м.н., професор, Луцький НТУ; Пальчевський Б.О., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Петраков Ю.В., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Петровський В.Я., д.т.н., професор, інститут проблем матеріалознавства НАН України; Повстяной О.Ю., к.т.н., доц., Луцький НТУ; Савчук П.П., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Струтинський В.Б., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Студеняк І.П., д.т.н., професор, ДВНЗ Ужгородський національний університет; Шваб'юк В.І., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Штерн М.Б., д.т.н., професор, Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Ярошевич М.П., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Allison Macmillan, професор, доктор PhD, Глїндворський університет (Уельс, Великобританія); Драган О.В., к.т.н., доцент, Брестський державний технічний університет (Білорусь); Патер Збігнев, д.т.н., професор, Люблінська політехніка (Польща); Геворк Петросян, д.т.н., професор, Вірменський державний університет (Вірменія); Дімітер Ставнев, д.т.н., професор, Технічний університет м. Варні (Болгарія); Дешка Маркова, д.т.н., професор, Технічний університет м. Габрово (Болгарія)

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 5 від 26.12.2018 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:

Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказ МОН України № 528 від 12.02.2015 року та в наукометричну базу РИНЦ.

ISSN: 24-15-39-66

© Луцький національний технічний університет, 2018 р.

ШАНОВНІ ДОПISУВАЧІ, КОЛЕГИ!

Згідно наказу МОН України № 528 від 12.02.2015 р. затверджено Міжвузівський збірник наукових праць «НАУКОВІ НОТАТКИ», що видається Луцьким національним технічним університетом як наукове фахове видання України.

В збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень, які раніше не висвітлювались в друці. Враховуючи, що збірник є фаховим виданням, в ньому корисно друкувати результати дисертаційних досліджень на здобуття наукового ступеня кандидата та доктора технічних наук за галузями знань "Технічні науки"

Статті друкуються українською, англійською або російською мовами.

Довідки за тел. (0332) 26-25-19 e-mail: notatki@ukr.net

Наша адреса:

43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

Луцький національний технічний університет,
редакція міжвузівського збірника "Наукові нотатки"

Веб-сайт збірника: <http://notatki.com.ua>

З повагою,

*Відповідальний редактор,
професор Луцького НТУ*

В.Д. Рудь

ЗМІСТ

Зміст	4
Андрущак І.Є., Кошелюк В.А. Аналіз поширення тріщин в композитних матеріалах із використанням розширеного методу скінченних елементів.....	8
Бадір К.К. Електромагнітна складова утримання феромагнітних забруднень на поверхнях деталей машин.....	16
Галян В.В., Кевшин А.Г., Іващенко І.А., Федосов С.А., Лебедь О.О., Алексеюк І.Д., Тищенко П.В., Тимошук А.Б. Люмінесценція неопроміненого та γ -опроміненого монокристалу $(\text{Ga}_{69,5}\text{La}_{29,5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$	23
Головенко Т.М., Ткачук О.Л., Ковтун О.М., Горач О.О., Шовкомуд О.В. Збагачення виробництв України сертифікованою лубоволокнистою сировиною з льону олійного.....	28
Дегтяр М.В. Основні технологічні прийоми при очищенні дренажних вод полігонів твердих побутових відходів.....	33
Джузурян Т.Г., Марчук В.І., Марчук І.В., Олексин М.В. До визначення температури безцентрового шліфування переривчастими кругами поверхонь обертання.....	39
Дудніков А.А., Горбенко О.В., Келемеш А.О., Дудник В.В. Технологічні методи підвищення експлуатаційної надійності машин.....	44
Защепкіна Н.М., Таранов В.В., Наконечний О.А. Контроль інформативних показників моторних олиव засобами і методами люмінесцентної спектрометрії.....	48
Зуєв Д.О., Дос Є.В., Кропачов А.В., Бабкін О.В., Варламов О.О. Моделювання та управління стратегіями мінімізації енергоспоживання центру обробки даних.....	57
Іванов В.О., Залого В.О., Басова Є.В., Капанайко В.С. Алгоритм вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв.....	65
Калюжний В.Л., Касян Д.В. Аналіз методом скінченних елементів впливу осевого зазору на неповністю закриті відрізанні заготовок із круглого прокату зсувом у штампі на пресі.....	73
Клец Д.М., Назаров О.І., Шпінда Є.М. Потенційна можливість реалізації прирощення вповільнення легковими автомобілями під час екстрених гальмувань в різних експлуатаційних умовах.....	81
Кропачов Р.В., Ахтямова Е.Р., Мухаметзянова З.Р., Дібіров А.К. Застосування нових матеріалів у будівництві при 3D-друці.....	87
Литвин О.В., Ящук І.Р., Паньков С.Б. Аналіз передумов застосування нейронних мереж при синтезі конструкцій в машинобудуванні.....	92
Литвин О.В., Ящук І.Р., Раус С.С. Приведення жорсткості системи патрон – деталь токарного верстата.....	99
Луцко Й.Й., Кичма А.О. Проблеми експлуатації потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів.....	105
Мащенко В.А. Відбивання акустичних хвиль від межі рідини та ауксетик-середовища.....	113
Молошний О.М., Сотник М.І. Вплив негладких стінок обертового осевого підвідного пристрою на робочий процес відцентрового насоса.....	119
Мухи Алдин Хассан Мохамед Методологія побудови кореляційних алгоритмів класифікація мережевого трафіку.....	128
Найдьонов І.М. Формалізація голосової інформації в системах диспетчерського контролю за рухом автотранспорту.....	135
Налобіна О.О., Герасимчук О.П., Пуць В.С., Мартинюк В.Л., Шовкомуд О.В. Дослідження котка дорожнього зі змінним контактним впливом на робочу поверхню.....	141
Поліщук О.С. Руйнування взуттєвих та швейних матеріалів ударом.....	149
Поляченко А.І. Можливості методів пошуку та локалізації аномалій у томографічних та рентгенівських знімках для підвищення точності встановлення діагнозу.....	159
Потопальська К.Є., Ларін О.О. Статистична оцінка надійності та ресурсу трубопроводу з урахуванням процесів накопичення втоми та розвитку корозії.....	166
Ратушний О.В. Методика визначення оптимальних параметрів капілярного насоса.....	174

Редько О.І., Редько Р.Г. Дослідження складу і технології формування захисних покриттів з підвищеними антикорозійними характеристиками і зносостійкістю.....	179
Редько Р.Г., Редько О.І. Технологія виготовлення нерозвідних затискних цанг.....	184
Росул Р.В., Садовнікова Т.М., Рейс Т.Т. Історичний аспект розвитку шкіргалантерейних виробів.....	189
Савчук П.П., Кашицький В.П., Боярська І.В., Матрунчик Д.М. Вплив фізичних полів на структурування епоксиполімерів.....	196
Садова О.Л., Кашицький В.П., Заболотний О.В., Щеглов С.М., Янчук С.Л. Інтенсивне структурування епоксиполімерів під циклічним впливом теплового поля.....	201
Скідан В.В., Романюк Є.О., Єфімчук Г.В. До питання впровадження принципів академічної доброчесності в освітній процес.....	206
Сур'янінов М.Г., Лазарева Д.В., Чабан В.В. Вибір конструктивного рішення високочастотного стабілізатора динамічного натягу ниток основи шляхом модального аналізу в пакеті ANSYS.....	211
Топчій В.С., Жемчужкіна Т.В., Носова Т.В. Статистичний аналіз показників фазового портрета ЕМГ-сигналу з метою диференціювання захворювань опорно-рухового апарату.....	217
Федорчук-Мороз В.І., Вісин О.О. Шляхи подолання шкідливої дії вібрації у виробничих процесах.....	223
Фоменко Д.С. Контроль динамічної невірноваженості металевих тіл обертання.....	230
Чигвінцева О.П., Рула І.В., Токар А.В., Кравченко С.В., Петрушина Г.О. Вивчення властивостей вуглепластика на основі фенілона С-2.....	236
Чумало Г.В., Студент М.М., Харченко Є.В., Палюх В.М. Вплив захисних покриттів на корозійно-механічне руйнування трубних сталей.....	243

CONTENT

Contents	4
Andrushchak I.Ye., Koshelyuk V.A. The analysis of the distribution of cracks in composite structures using the expanded finite element method.....	8
Badir K.K. Electromagnetic composition of the retention of ferromagnetic pollutions on the surfaces of machine parts.....	16
Halyan V.V., Kevshyn A.H., Ivashchenko I.A., Fedosov S.A., Lebed O.O., Olekseyuk I.D., Tishchenko P.V., Tymoshuk A.B. Luminescence of non-irradiated and γ -irradiated the single crystal $(\text{Ga}_{69,5}\text{La}_{29,5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$	23
Holovenko T.M., Tkachuk O.L., Kovtun O.M., Horach O.O., Shovkomud O.V. Enrichment enterprises of Ukraine certified of bast raw material with oilseed flax.....	28
Degtyar M. Basic technological techniques in the cleaning of leachate.....	33
Dzhuguryan T., Marchuk V., Marchuk I., Oleksin M. To determination of the temperature off centerless grinding by intermittent circles of the surfaces rotation.....	39
Dudnikov A., Gorbenko O., Kelemesh A., Dudnyk V. Technological methods of increase of operating machine reliability.....	44
Zashchepkina N.M., Taranov V.V., Nakonechnyi O.A. Control of informational parameters of motor oils by means and methods of spectrometry.....	48
Zuev D.O., Dos E.V., Kropachev A.V., Babkin O.V., Varlamov O.O. Modeling and control of data center power consumption minimization strategies.....	57
Ivanov V., Zaloga V., Basova Y., Kapanaiko V. Algorithm for the selection of locating elements of fixtures.....	65
Kaliuzhnyi V., Kasian D. Analysis of the influence of the axial gap on the incompletely close cutting process of a round metal rods with shear in press die by the finite element method.....	73
Klets D.M., Nazarov A.I., Spinda E.M. Potential possibility for implementation of infringements by two transport vehicles after extremely stopping in different operating conditions.....	81
Kropachev R.V., Akhtiamova E.R., Mukhametzianova Z.R., Dibirov A.K. Application of new materials in construction in 3D-printing.....	87
Litvin O., Yashchuk I., Pankov S. Analysis of the background of the application of neural networks in the design synthesis in mechanical engineering.....	92
Litvin O., Yashchuk I., Raus S. Construction of the hardness of the patron system-the detail of the turning machine.....	99
Luchko J.J., Kychma A.O. Problems of operation potentially unsafe of segments of pipelines.....	105
Mashchenko V. Reflection of acoustic waves from the border of liquid and auxetic medium.....	113
Moloshnyi O., Sotnyk M. Influence of non flat walls of the axial inlet device on the operating process of the centrifugal pump.....	119
Hassan Mohamed Muhi-Aldeen Methodology of building correlation algorithms of the network traffic classification.....	128
Naydonov I. Formalization of voice information in the systems of dispatching control over the movement of vehicles.....	135
Nalobina A., Gerasimchuk A., Puts' V., Martyniuk V., Shovkomud A. Investigation of the road with a changing contact effect on the working surface.....	141
Polishchuk O. Destruction of footwear and sewing materials by impact.....	149
Poliachenko A.I. Possibilities of methods for searching and localizing anomalies in tomography and x-ray images to improve the accuracy of diagnosis.....	159
Potopalska K.E., Larin O.O. Statistical estimation of pipeline reliability and lifetime taking into account the processes of fatigue accumulation and corrosion grow.....	166
Ratushnyi A. Method of determining the optimal parameters of a capillary pump.....	174
Redko O.I., Redko R.G. Research composition and forming technology of sheeting with enhanced exploitation characteristics.....	179

Redko R.G., Redko O.I. Technology of manufacturing of individual clamp collets.....	184
Rosul R., Sadovnikova T., Rejs T. Historical aspect of the development of leather goods.....	189
Savchuk P., Kashytskyi V., Boiarska I., Matrunchyk D. Influence of physical fields on the structuring of epoxy polymers.....	196
Sadova O., Kashytskyi V., Zabolotnyi O., Shcheglov S., Yanchuk S. The intense structuring of epoxy polymers under the cyclic influence of the thermal field.....	201
Skidan V., Romaniuk Y., Yefimchuk G. To the questionnaire of principles of academic integrity in the educational process.....	206
Surianinov M.G., Lazareva D.V., Chaban V.V. Choice of a constructive solution of a high-frequency stabilizer of dynamic tension of a warp threads by means of a modal analysis in ansys package.....	211
Topchii V., Zhemchuzhkina T., Nosova T. Statistical analysis of parameters of EMG-signal phase portrait for differentiation of musculoskeletal system diseases.....	217
Fedorchuk-Moroz V., Visyn O. Ways of overcoming the harmful exposure of vibration in the production process.....	223
Fomenko D.S. Control of dynamic unbalance of metal bodies of revolution.....	230
Chigvintseva O.P., Rula I.V., Tokar A.V., Kravchenko S.V., Petrushina G.A. Study of the properties of carbon plastic based on phenylone C-2.....	236
Chumalo H.V., Student M.M., Kharchenko Ye.V., Palyukh V.M. Influence of protecting coatings on corrosion-mechanical damage of pipe steels.....	243

УДК 539.3, 621.762

І.Є. Андрущак, В.А. Кошелюк

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ПОШИРЕННЯ ТРІЩИН В КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РОЗШИРЕНОГО МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У роботі наведено сучасні обчислювальні методи для моделювання пошкоджень в композитних матеріалах. Запропоновано новий підхід до моделювання тріщини в ортотропних композитних середовищах за допомогою розширеного методу скінченних елементів (XFEM). Концепція XFEM передбачає поділ розв'язку на частини із використанням розрідженої сітки для опису незбуреного поля за його вузловими значеннями та спеціальних сингулярних доданків, що описують тріщину з кореневою особливістю напружень у її вершинах. Спосіб має здатність досліджувати розкриття тріщини без додавання подвійних вузлів, а генерування сітки для елементів здійснюється незалежно від геометрії тріщини. Крім того, було використано однаковий тип елементів в околі вершини тріщини та для інших частин моделі скінченних елементів, і число вузлів i , відповідно, ступені вільності значно зменшуються порівняно з класичним методом скінченних елементів.

Розширений метод скінченних елементів (XFEM) застосовано для моделювання процесу розриву та масштабного ефекту у композитних матеріалах, ослаблених отворами або розрізами. Аналіз показує, що результати XFEM добре узгоджуються з експериментальними результатами, що визначають номінальну міцність і добре узгоджуються з аналітичними результатами на основі моделі спільної зони, що дають розкриття тріщини та довжину зони процесу руйнування.

Ключові слова: тріщина, композитні матеріали, розширений метод скінченних елементів, коефіцієнт інтенсивності напружень, сітка

И.Э. Андрущак, В.А. Кошелюк

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе приведены современные вычислительные методы для моделирования повреждений в композитных материалах. Предложен новый подход к моделированию трещины в ортотропных композитных средах с помощью расширенного метода конечных элементов (XFEM). Концепция XFEM предусматривает разделение решения на части с использованием разреженной сетки для описания невозмущенного поля по его узловым значениям и специальных сингулярных слагаемых, описывающих трещину с корневой особенностью напряжений в ее вершинах. Способ имеет возможность исследовать раскрытия трещины без добавления двойных узлов, а генерирования сетки для элементов осуществляется независимо от геометрии трещины. Кроме того, были использованы однотипные элементы в окрестности вершины трещины и для других частей модели конечных элементов, и число узлов u , соответственно, степени свободы значительно уменьшаются по сравнению с классическим методом конечных элементов.

Расширенный метод конечных элементов (XFEM) был использован для моделирования процесса разрыва и масштабного эффекта в композитных материалах, ослабленных отверстиями или разрезами. Анализ показывает, что результаты XFEM хорошо согласуются с экспериментальными результатами, определяющие номинальную прочность и хорошо согласуются с аналитическими результатами на основе модели обшей зоны, дающие раскрытия трещины и длину зоны процесса разрушения.

Ключевые слова: трещина, композитный материал, расширенный метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений, сетка

I.Ye. Andrushchak, V.A. Koshelyuk

THE ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF CRACKS IN COMPOSITE STRUCTURES USING THE EXPANDED FINITE ELEMENT METHOD

This paper presents some of the most recent and relevant computational techniques for modelling and simulation of damage and/or failure on composite materials. A new approach is proposed to model a crack in orthotropic composite media using the extended finite element method (XFEM). The XFEM uses the concept of partition of unity in addition to meshless basic idea of approximating a field variable by its values at a set of surrounding nodes. The mesh generating is performed without any consideration of crack conformations for elements and the method has the ability of extending the crack without any remeshing. Furthermore, the type of elements around the crack tip is the same as other parts of the finite element model and the number of nodes and consequently degrees of freedom are reduced considerably in comparison to the classical finite element method.

The extended finite element method (XFEM) is implemented to simulate the fracture process and size effect (scale effect) in the composite materials weakened by holes or notches. The analysis shows that XFEM results are in good agreement with the experimental results specifying nominal strength and in good agreement with the analytical results based on the cohesive zone model specifying crack opening displacement and the fracture process zone length.

Keywords: crack, composite materials, extended finite element method, stress intensity factor, mesh

Постановка проблеми. Композитні матеріали набули широкого використання в промисловості та інженерних спорудах. До основних переваг використання таких матеріалів

відносять ефективно співвідношення міцності до ваги. У той же час композитні матеріали часто піддаються екстремальним механічним і термічним навантаженням, що робить їх чутливими до ушкоджень шляхом утворення тріщин.

Мета усіх досліджень надійності композитних матеріалів полягає в тому, щоб описати процес ініціювання та поширення тріщини, який обумовлює закінчення термін експлуатації композитної конструкції. Значні зусилля були спрямовані на оптимізацію для посилення частини ослабленої конструкції для відновлення її цілісності та, таким чином, забезпечення її надійності. Елементи конструкцій складаються з різноманітних взаємодій шарів композиту та можуть бути проаналізовані у різних масштабах.

Більшість досліджень зосереджено на вивченні композитів у великих масштабах, де композит вважається гомогенним матеріалом із усередненими механічними властивостями. Інші дослідження зосереджені на випадковому характері окремих шарів у мікроскопічному масштабі. На цьому рівні складові матеріалу представлені окремо, тобто структура, що складається з різних шарів, є неоднорідною. Основним недоліком такого підходу є те, що дефекти (пошкодження, тріщини) можуть виникати між шарами та всередині шару. Розповсюдження дефектів в мікромасштабному діапазоні часто може відбуватись на поверхні шару або під кутом. Утворена на поверхнях шарів тріщина може поширюватись вздовж шару або проникати в сусідній. Критерій відхилення такої тріщини до сусіднього матеріалу відрізняється від критерію, що регулює поширення тріщини в однорідному матеріалі. Це перешкоджає надійному прогнозуванню довговічності в обслуговуванні композитних конструкцій. Тому розробка та застосування достовірного числового методу та ефективного підходу до прогнозування траєкторії розповсюдження тріщини, в тому числі проникнення тріщини, можуть бути дуже важливими при вивченні механіки руйнування композитів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методики, що широко використовуються для прогнозування утворення та підростання тріщин, включають механіку пошкоджених середовищ [1], [2] або аналіз нагромадження пошкодженої [3]. У цих підходах тріщини не моделюються явним чином, а їх ефект пояснюється локальною модифікацією модулів пружності матеріалу у місцях, які вважаються пошкодженими. Хоча ці підходи є ефективними відносно обчислювальної точності, вони містять ряд недоліків, серед яких чутливість сітки та відсутність можливості аналізу руйнування шару, що є основним фактором, що впливає на розмірний ефект, який спостерігається в тестуванні композитів з відкритими отворами [4].

Метод скінчених елементів (FEM) здатний моделювати загальні граничні умови та складні геометрії. Елементи, що пов'язані з тріщинами, повинні лежати в площині (на берегах тріщини) та задовольняти необхідні умови градації сітки для імітації підростання тріщини. Класичний FEM має фундаментальні труднощі з відтворенням сингулярного поля напружень навколо вершини тріщини. На відміну від цього, розширений метод скінчених елементів (XFEM) спеціально розроблений для підсилення традиційного FEM для вирішення задач, у яких наявні розриви полів переміщень та напружень на окремих розімкнутих контурах, а також які мають відповідні геометричні особливості, зі збереженням усіх переваг скінченно-елементного аналізу.

Розширений метод скінчених елементів успішно використовується для моделювання поверхонь розриву. Основна концепція XFEM полягає у розширенні локального розв'язку шляхом застосування стандарту Partition of Unity (PU) методу кінцевих елементів. У рамках PU довільні функції додаються до стандартного простору поліноміальних скінчених елементів (FE) для покращення апроксимації отриманого числового методу. Розрив навколо тріщини можна моделювати без урахування поверхні тріщини, як геометричної межі для відповідності елементів границі. Також може бути відтворене сингулярне напружене поле поблизу кінця тріщини застосовуючи асимптотичні функції зсуву.

Зокрема, розширений метод скінчених елементів [5], який належить до класу методів дискретизації області, дозволяє моделювати поширення тріщини без зміни сітки шляхом введення двох класів функцій: розривних функцій для врахування розкриття тріщини та асимптотичної апроксимації поблизу вершини для врахування сингулярності напружень в околі вершини тріщини в механіці лінійного пружного руйнування (LEFM). До основних переваг XFEM відносять можливість не оновлювати сітку скінчених елементів для відстеження траєкторії підростання тріщини, а також можливість не дотримуватись заздалегідь визначеної траєкторії. Також тріщини можуть вільно збільшуватись в межах об'ємної ділянки матеріалу без перерахунку сітки, що відповідає геометрії стрибків переміщень поблизу тріщини [5, 6].

Метою даної роботи є проведення дослідження та числово-експериментальної перевірки інструменту імітації зростання випадкових тріщин в композитних матеріалах на основі розширеного методу скінчених елементів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Використання розширеного методу скінчених елементів передбачає відповідний поділ розв'язку на складові, що відповідають локальній концентрації напружень та особливостям у вершинах тріщин. Функції доповнення стандартних функцій форми скінчених елементів формуються з врахуванням особливостей задачі. Зокрема, для задач механіки руйнування тіл із тріщинами у методі XFEM поля переміщень доповнюються розривними функціями, що дають можливість описати стрибок переміщень уздовж поверхні тріщини без оновлення розрахункової сітки, а також за допомогою асимптотичних функцій концентрації напружень, що дають можливість врахувати кореневу особливість поля напружень в околі вершини тріщини з відносно грубими сітками.

Функція доповнення визначається залежністю [7]:

$$u_{xfem} = (X) = \sum_{i \in L} N_i(X) u_i + \sum_{i \in J} N_i(X) H(X) a_i + \sum_{i \in K} \left[N_i(X) \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(X) b_{i\alpha} \right] \quad (1)$$

Функція доповнення формується таким чином, щоб враховувати будь-які розриви або відомі значення шуканого розв'язку. Було продемонстровано [8], що числово визначені функції концентрації можуть бути використані для імітації довільних тріщин або пошкоджень у композитних або анізотропних матеріалах. Функція Хевісайда визначається як:

$$H(X) = \begin{cases} -1 & x \leq 0 \\ +1 & x > 0 \end{cases} \quad (2)$$

При моделюванні необхідно враховувати функцію доповнення в околі вершини тріщини або функцію лінії поширення тріщини. Ці функції визначаються елементами першого порядку розкладу Вільямса асимптотичного поля переміщень в околі вершини тріщини в лінійно пружному матеріалі. Асимптотичні поля для ортотропних матеріалів функції доповнення для тріщини визначено як [9]:

$$\{F_{\alpha}\}_{1 \leq \alpha \leq 4}(r, \theta) = \sqrt{r} \left\{ \cos \frac{\theta_1}{2} \sqrt{g_1(\theta)}, \cos \frac{\theta_2}{2} \sqrt{g_2(\theta)}, \sin \frac{\theta_1}{2} \sqrt{g_1(\theta)}, \sin \frac{\theta_2}{2} \sqrt{g_2(\theta)} \right\} \quad (3)$$

де $\theta_1, \theta_2, g_1(\theta), g_2(\theta)$ функції полярного кута θ у вершині тріщини, що характеризуються залежностями:

$$g_k(\theta) = \sqrt{(\cos \theta + \mu_{kx} \sin \theta)^2 + (\mu_{ky} \sin \theta)^2} \quad (4)$$

$$\theta_k = \arctan \left(\frac{\mu_{ky} \sin \theta}{\cos \theta + \mu_{kx} \sin \theta} \right)$$

де $\mu_k = \mu_{kx} + i\mu_{ky}$ корені характеристичного рівняння [10].

Для моделювання поверхні матеріалу, абсолютна величина функції доповнення для тріщини (перша похідна від розриву), що необхідна для характеристики довільної поверхні незалежно від сітки розбиття, визначається як:

$$A(x) = \left| \sum_I \phi_I(x) N_I(x) \right| \quad (5)$$

Величина $A(x)$ залишається неперервною у просторі переміщень, але забезпечує стрибок у деформаційному полі (слабкий розрив) через поверхню матеріалу.

Матричне представлення

У заданій області $V \in R$ за відомої функції f необхідно знайти функцію $u(x, y)$, яка мінімізує функціонал

$$F(u) = \iint_V f(x, y, u, u'_x, u'_y) dA \quad (6)$$

Використаємо позначення

$$\nabla u = \begin{pmatrix} u'_x \\ u'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{du}{dx} \\ \frac{du}{dy} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Припускаємо, що границя області $\partial V = S_1 \cup S_2$ складається з двох частин, що не перетинаються. В частині S_1 значення функції $u(x, y)$ відоме як функція $g(x, y)$, а в іншій частині – обираємо довільно. Вектор зовнішньої нормалі позначаємо через \bar{n} .

Припускаємо, що функція $u = u(x, y)$ є оптимальним розв'язком і розглянемо зміни $w = u(x, y) = \delta \cdot \eta(x, y)$ для довільної функції η та нескінченно малого параметру $\delta \in R$. Оскільки величина u є мінімумом функціоналу F то обов'язкове виконання умови

$$\frac{\partial}{\partial \delta} F(u + \delta \eta) \Big|_{\delta=0} = 0 \quad (8)$$

Використовуючи лінійну апроксимацію знаходимо

$$\begin{aligned} f(x, y, u + \delta \eta, u'_x + \delta \eta'_x, u'_y + \delta \eta'_y) &\approx \\ \approx f(x, y, u, u'_x, u'_y) + \delta \frac{\partial f}{\partial u} \eta + \delta \frac{\partial f}{\partial u_x} \eta_x + \delta \frac{\partial f}{\partial u_y} \eta_y \end{aligned} \quad (9)$$

Таким чином

$$F(u + \delta \eta) \approx F(u) + \delta \iint_V \left(\frac{\partial f}{\partial u} \eta + \frac{\partial f}{\partial u_x} \eta_x + \frac{\partial f}{\partial u_y} \eta_y \right) dA \quad (10)$$

При мінімізації F при $\delta = 0$ знаходимо

$$0 = \iint_V \frac{\partial f}{\partial u} \eta + \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial u_x} \\ \frac{\partial f}{\partial u_y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{pmatrix} dA \quad (11)$$

Теорему розбіжності можна записати як

$$\begin{aligned} \iint_S \nabla f \cdot \nabla g dA &= \iint_{\partial S} f \nabla g \cdot \bar{n} ds - \iint_S f \Delta g dA \\ \iint_S f (\operatorname{div} \bar{v}) dA &= \iint_{\partial S} f \cdot \bar{v} \cdot \bar{n} ds - \iint_S \operatorname{grad} f \cdot \bar{v} dA \end{aligned} \quad (12)$$

Отримаємо

$$\begin{aligned}
0 &= \iint_V \frac{\partial f}{\partial u} \eta + \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial u_x} \\ \frac{\partial f}{\partial u_y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{pmatrix} dA = \\
&= \iint_V \eta \frac{\partial f}{\partial u} + \eta \left(\frac{d}{dx} \frac{\partial f}{\partial u_x} + \frac{d}{dy} \frac{\partial f}{\partial u_y} \right) dA + \oint_V \eta \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial u_x} \\ \frac{\partial f}{\partial u_y} \end{pmatrix} \cdot \bar{n} ds = \\
&= \iint_V \eta \left(\frac{\partial f}{\partial u} + \frac{d}{dx} \frac{\partial f}{\partial u_x} + \frac{d}{dy} \frac{\partial f}{\partial u_y} \right) dA + \oint_V \eta \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial u_x} \\ \frac{\partial f}{\partial u_y} \end{pmatrix} \cdot \bar{n} ds
\end{aligned} \tag{13}$$

Таким чином фундаментальний розв'язок обчислення варіацій для двох змінних можна представити як

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial u} + \frac{d}{dx} \frac{\partial f}{\partial u_x} + \frac{d}{dy} \frac{\partial f}{\partial u_y} &= 0 \quad (x, y) \in V \\
u(x, y) &= g(x, y) \quad (x, y) \in S_1 \\
\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial u_x} \\ \frac{\partial f}{\partial u_y} \end{pmatrix} \cdot \bar{n} &= 0 \quad (x, y) \in S_2
\end{aligned} \tag{14}$$

Підставивши у рівність (14) потенціал Ху-Вашидзу та здійснивши скінчено-елементну апроксимацію отримаємо розрахункові рівняння МСЕ, що можна подати у матричному вигляді. Систему лінійних рівнянь у глобальній формі для XFEM можна записати як:

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \tag{15}$$

де \mathbf{K} , \mathbf{U} , \mathbf{F} характеризує матрицю жорсткості, вектор ступенів свободи вузла та вектор зовнішніх сили, відповідно. Глобальна матриця жорсткості \mathbf{K} визначається як:

$$\mathbf{K}_{ij}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{ij}^{uu} & \mathbf{k}_{ij}^{uh} & \mathbf{k}_{ij}^{ut} \\ \mathbf{k}_{ij}^{hu} & \mathbf{k}_{ij}^{hh} & \mathbf{k}_{ij}^{ht} \\ \mathbf{k}_{ij}^{tu} & \mathbf{k}_{ij}^{th} & \mathbf{k}_{ij}^{tt} \end{bmatrix} \tag{16}$$

де $\mathbf{k}_{ij}^{rs} = \int_{V^e} (\mathbf{B}_i^r)^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j^s dV$ при $(r, s = u, h, t)$

Матриця функції форми та вектор зовнішніх зусиль [11]:

$$\begin{aligned}
\mathbf{B}_i^u &= \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 \\ 0 & N_{i,y} \\ N_{i,y} & N_{i,x} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_i^h = \begin{bmatrix} (N_i H)_x & 0 \\ 0 & (N_i H)_y \\ (N_i H)_y & (N_i H)_x \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_i^{t\alpha} = \begin{bmatrix} (N_i F_\alpha)_x & 0 \\ 0 & (N_i F)_y \\ (N_i F)_y & (N_i F)_x \end{bmatrix} \\
\mathbf{B}_i^t &= [\mathbf{B}_i^{t1} \quad \mathbf{B}_i^{t2} \quad \mathbf{B}_i^{t3} \quad \mathbf{B}_i^{t4}] \\
\mathbf{F}_i^e &= \{ \mathbf{f}_i^u \quad \mathbf{f}_i^h \quad \mathbf{f}_i^{t1} \quad \mathbf{f}_i^{t2} \quad \mathbf{f}_i^{t3} \quad \mathbf{f}_i^{t4} \}^T
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\text{де } \mathbf{f}_i^h = \int_{\partial V} N_i H \bar{\mathbf{t}} dS + \int_{V^e} N_i H \mathbf{b} dV \quad \mathbf{f}_i^{\alpha} = \int_{\partial V} N_i F_\alpha \bar{\mathbf{t}} dS + \int_{V^e} N_i F_\alpha \mathbf{b} dV \quad (\alpha = 1, 2, 3, 4)$$

Особливості композитної структури

Загальний вираз напружено-деформованого стану анізотропної структури можна представити через компоненти напружень та деформацій:

$$\sigma_{ij} = \mathbf{D}_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \varepsilon_{ij} = \mathbf{C}_{ijkl} \sigma_{kl} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (18)$$

Для більш зручного представлення можна використовувати вираз у формі компонентів

$$\sigma_i = d_{ij} \varepsilon_j \quad \varepsilon_i = c_{ij} \sigma_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (19)$$

Для ортотропних матеріалів, що мають взаємно ортогональні площини пружної симетрії вираз (19) набуде форми:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

Розрахунок коефіцієнту інтенсивності напружень

Коефіцієнт інтенсивності напружень (SIF) є одним з основних показників механіки руйнування для вимірювання інтенсивності поля напружень в околі вершини тріщини та оцінки наявних пошкоджень. Оцінку коефіцієнта інтенсивності напружень при накладанні різних мод руйнування для міжфазної тріщини між двома ортотропними матеріалами можна здійснити за допомогою J – інтегралу. Для визначення J – інтегралу використовують залежність:

$$J = \int_G \left(W \delta_{1,j} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \right) n_j dG \quad (21)$$

де G – довільний контур в околі вершини тріщини, W – густина енергії деформації, що визначається як $W = (1/2) \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}$ для лінійно-пружних матеріалів, n_j, j – компоненти зовнішньої нормалі G . Цей контурний інтеграл можна перетворити у відповідний інтеграл по поверхні.

У методі інтеграла взаємодії використовуються допоміжні поля, що накладаються на існуючі поля для виконання граничних умови (рівняння рівноваги та граничні умови на поверхні тріщини) при визначенні коефіцієнту інтенсивності напруженості змішаного режиму. Сумарний інтеграл стану двох полів можна визначити як:

$$J^s = J + J^{aux} + M \quad (22)$$

де J та J^{aux} визначають існуюче та допоміжне поле напружень, а M характеризує інтеграл взаємодії:

$$M = \int_A \left[\sigma_{ij} u_{i,1}^{aux} + \sigma_{ij}^{aux} u_{i,1} - W^{(1,2)} \delta_{1,j} \right] q_j dA \quad (23)$$

Для лінійно-пружного стану $W^{(1,2)}$ знаходимо як:

$$W^{(1,2)} = \frac{1}{2} (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^{aux} + \sigma_{ij}^{aux} \varepsilon_{ij}) \quad (24)$$

де верхній індекс aux характеризує допоміжний стан.

Чисельний приклад

Центральна тріщина в композитній пластині. Розглянемо центральну тріщину між двома ортотропними матеріалами. Нескінченна пластинка піддається розтягу з напруженням σ_{22}^0 . Властивості матеріалу описують $E_T = E_z = 10.8 GPa$, $E_L = 137 GPa$, $G_{zL} = G_{TL} = 5.65 GPa$, $G_{zT} = 3.36 GPa$, $\nu_{zL} = \nu_{TL} = 0.238$, $\nu_{zT} = 3.36$ де L, T, Z характеризують повздовжній, поперечний та у напрямку поширення тріщини відповідно. При розбитті методом XFEM використано модель з 250 елементами та 268 вузлами.

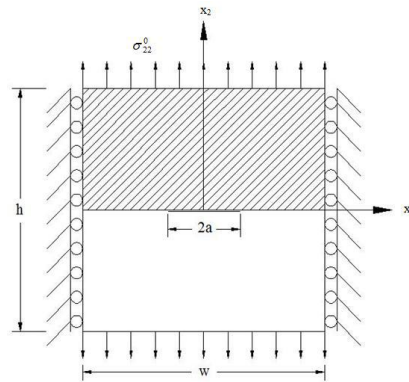


Рис. 1. Міжфазна тріщина двох ортотропних матеріалів

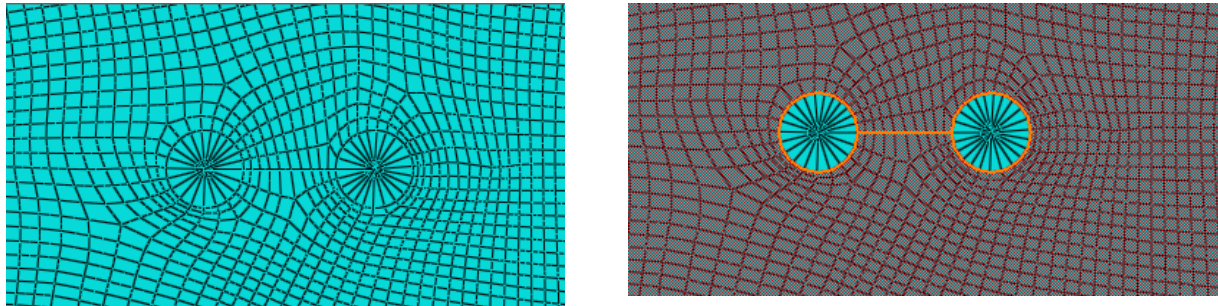
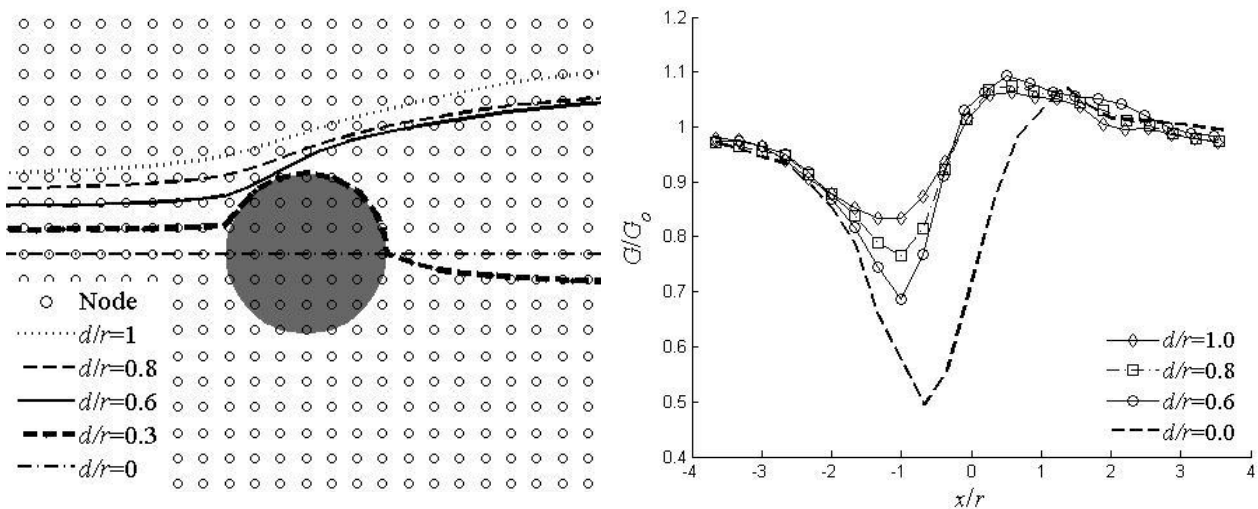


Рис. 2. Модель XFEM

Рис. 3. Поширення тріщини та варіація нормалізованого вивільнення енергії для різних співвідношень d/r

Висновок Задача моделювання тріщин в композитних структурах досліджувалась з використанням розширеного підходу скінченно-елементного аналізу. Модель було дискретизовано методом розширеного кінцевого елемента, що дозволяє вивчення траєкторії поширюваних тріщин незалежно від фонові сітки. Методологія XFEM передбачає дискретизацію без будь-яких розривів. Ортотропний асимптотичний зсув тріщини поля, а також розривні функції Heaviside було застосовано для концентрації скінченного елемента в околі вершини тріщини. Аналітичні рішення для поля зсуву було використано для отримання асимптотичних функцій тріщини. Фактори інтенсивності напруженості змішаного режиму (SIF) визначається на основі J – інтегралу взаємодії.

Досліджено вплив геометрії тріщини, орієнтації матеріалу та кількох шарів. Поряд з тим була розглянута композиційна структура, що містить отвори. Встановлено, що у тонкому одно напрямленому композитному матеріалі траєкторія тріщини не впливає на близькість до дефектів (отворів) на відміну від ізотропних матеріалів. Було виявлено зростання тріщини вздовж напрямку

волокна в будь-який час незалежно від існуючих дефектів (отворів). Отримані результати добре узгоджуються з іншими наявними чисельними або (напів) аналітичними методами.

Література

1. Roberto C. Pavan, Guillermo J. Creus, and Samir Maghous. A simplified approach to continuous damage of composite materials and micromechanical analysis. *Composite Structures*, 91(1):84 – 94, 2009.
2. C.T. McCarthy, R.M. O'Higgins, and R.M. Frizzell. A cubic spline implementation of non-linear shear behaviour in three-dimensional progressive damage models for composite laminates. *Composite Structures*, 92(1):173 – 181, 2010.
3. P. Kerfriden, J. C. Passieux, and S. P. A. Bordas. Local/global model order reduction strategy for the simulation of quasi-brittle fracture. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 89(2):154–179, 2012.
4. R.M. O'Higgins, M.A. McCarthy, and C.T. McCarthy. Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials. *Composites Science and Technology*, 68:2770–2778, 2008.
5. T. Belytschko and T. Black. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 45:601–620, 1999.
6. Qian, Zhen-dong, Jing Hu.: Fracture properties of epoxy asphalt mixture based on extended finite element method, *Journal of Central South University* 19.11 (2012): 3335.
7. Mo' es N., Dolbow J., Belytschko T.: A finite element method for crack growth without remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, No. 1, 1999, pp. 132-150.
8. Alexander Menk and Stphane P. A. Bordas. A robust preconditioning technique for the extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 85(13):1609–1632, 2011.
9. A Asadpoure and S Mohammadi. Developing new enrichment functions for crack simulation in orthotropic media by the extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 69:2150–2172, 2007.
10. Cahill, L.M.A., Natarajan, S., Bordas, S.P.A., O'Higgins, R.M., McCarthy, C.T., An Experimental /Numerical investigation into the main driving force for crack propagation in uni-directional fibre reinforced composite laminae, *Composite Structures* (2013)
11. S.H. Ebrahimi, S. Mohammadi, A. Asadpoure. An Extended Finite Element (XFEM) Approach for Crack Analysis in Composite Media. *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 6, No. 3, September 2008 pp 198 – 207

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК 62.229.315 (0 45)

К.К. Бадір*Національний авіаційний університет***ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СКЛАДОВА УТРИМАННЯ ФЕРОМАГНІТНИХ
ЗАБРУДНЕНЬ НА ПОВЕРХНЯХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

В статті проведено аналіз існуючих теорій та гіпотез, а також експериментальні дослідження, які показали, що крім гравітаційної та адгезійної складових сил, що утримують забруднення на поверхнях деталей машин, велику роль відіграє електромагнітна складова, яка притаманна феромагнітним конструкційним матеріалам, зокрема для підшипникових сталей.

Ключові слова: феромагнітні забруднення, трибосистема, фізико-хімічні процеси, потік рідини, очищення деталей, гідросистема.

К.К. Бадір**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ УДЕРЖАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

В статье проведен анализ существующих теорий и гипотез, а также экспериментальные исследования, которые показали, что кроме гравитационной и адгезионной составляющих сил, удерживающих загрязнения на поверхностях деталей машин, большую роль играет электромагнитная составляющая, которая присуща ферромагнитным конструкционным материалам, в частности для подшипниковых сталей.

Ключевые слова: ферромагнитные загрязнения, трибосистемы, физико-химические процессы, поток жидкости, очистка деталей, гидросистема.

К.К. Badir**ELECTROMAGNETIC COMPOSITION OF THE RETENTION OF FERROMAGNETIC
POLLUTIONS ON THE SURFACES OF MACHINE PARTS**

In the article is conducted of analysis of existing theories and hypotheses, as well as experimental researches, that showed that except gravitational and adhesive components of the forces, that keep dirt on the surfaces of machine parts, the electromagnetic component, which is inherent in ferromagnetic structural materials in particular bearing steel, plays an important role.

Key words: ferromagnetic pollution, tribosystem, physical and chemical processes, fluid flow, purification of parts, hydrosystem.

Вступ. Ресурс і експлуатаційна надійність повітряних, наземних і водних транспортних засобів, верстатів, сільськогосподарських та інших машин значною мірою залежать від чистоти робочих поверхонь їхніх деталей, вузлів і агрегатів, гідравлічних, паливних, масляних та інших систем.

Очищення робочих порожнин деталей машин від виробничих і експлуатаційних забруднень сприяє зменшенню інтенсивності зношування відповідальних деталей, вузлів і агрегатів, різко збільшує термін їх безвідмовної роботи, поліпшує технічні характеристики й експлуатаційні властивості машин, заощаджує дорогі конструкційні матеріали й робочі рідини, скорочує витрати на обслуговування й ремонт машин, підвищує ресурс і надійність машин, що дає великий техніко-економічний ефект. Тому в технології очищення й контролю чистоти машин відбувається сьогодні період інтенсивного розвитку.

Актуальність проблеми. У результаті підвищення чистоти робочих рухомих поверхонь деталей і рідин багатьох машин, їхній ресурс може бути збільшений в 2-3 рази, а в деяких випадках – до 10 разів [1; 2; 3; 4; 5].

Однак проблема вискоєфективного очищення робочих порожнин агрегатів і систем машин внаслідок своєї складності поки не одержала остаточного вирішення й залишається досить актуальною.

Вплив забруднень на експлуатаційні властивості й працездатність машин відзначали давно, однак предметом спеціального вивчення він став лише відносно недавно. Вперше проблема запобігання забрудненням виникла й виявилася найбільш гостро в авіаційній і ракетній техніці, де широко застосовують прецизійні гідравлічні системи керування, що мають високу точність позиціонування й велику швидкодію. Подібні пристрої, що працюють до того ж за підвищених тисків робочої рідини досить чутливі до різного роду забруднень.

Взагалі, забруднення робочих порожнин машин приводять до таких небажаних наслідків: підвищеного зношування найбільш відповідальних деталей; повного або часткового закупорювання (зарощення) робочих отворів (щілин) у дроселях та інших каналах малої

пропускної здатності; заклинювання рухомих деталей трибосистем; перегрівання й руйнування гідравлічних механізмів; збільшення сил тертя в плунжерних парах і зростання зусиль, необхідних для зрушення й переміщення плунжера; виникнення кавітаційних явищ у робочих рідинах; окиснення рідин і погіршення їхніх робочих властивостей; зниження продуктивності насосів та інших небажаних явищ.

Виклад основного матеріалу. Проблему промислової чистоти машин тепер вирішують застосуванням у процесі їх виробництва й експлуатації спеціальних методів і засобів очищення деталей, вузлів, агрегатів і систем і відповідним чином організованої системи контролю чистоти.

Очищення поверхні металевих деталей, внутрішніх порожнин вузлів, агрегатів і систем являє собою сукупність складних фізико-хімічних і механічних процесів, ефективність яких залежить від властивостей мийного середовища, розміру й властивостей частинок забруднень, технологічних режимів очищення, конструктивних особливостей очищувальних деталей, агрегатів і систем. Вид і ступінь забруднень, що залишились після очищення поверхні, залежать здебільшого від способу очищення й типу мийного середовища.

Тривалість процесу очищення деталей, агрегатів і систем сучасних машин досягає 10-15% від загальних витрат часу на їх виготовлення і складання [6, 7]. Тому вибір мийного середовища, способу й параметрів очищення є важливим етапом технологічного процесу виготовлення машини. Забруднення металевих поверхонь у вигляді плівок, твердих частинок, що прилипли, олів та мастил можуть бути вилучені в результаті механічного впливу, розчинення, хімічної реакції або змивання. У деяких випадках використовують комбіновані види очищення.

Створено технологію й обладнання для високоефективного очищення агрегатів і систем пульсуючим потоком рідини, методи й засоби газорідинної, ультразвукового й струминного очищення, розроблені нові високоефективні мийні засоби. Дедалі більшого застосування в промисловості, у ремонтних і експлуатаційних організаціях набуває тонке відцентрове очищення робочих і технологічних рідин. Розробляються й досліджуються електричні очисники палив і мастил, удосконалюються методи магнітного очищення, створюються ще досконаліші фільтрувальні матеріали й конструкції фільтрів. Розроблено автоматизовані конструкції промивного й мийно-очисного обладнання [8].

Сьогодні для очистки деталей, агрегатів і систем машин широко застосовують мийні рідини, що мають високу фізико-хімічну активність. При цьому поряд зі здатністю мийної рідини розпушувати, руйнувати або розчиняти шар забруднень використовують також здатність рідини справляти за певних умов на тверді частинки забруднень механічний вплив.

Режим очищення металевих поверхні деталі потоком мийної рідини (оптимальна технологія) визначають виходячи з аналізу гідродинамічної взаємодії мийної рідини з частинками забруднень, а також на підставі результатів експериментальних досліджень.

Тверді частинки забруднень можна відокремити від рідини механічно або за допомогою силових полів. Механічний спосіб передбачає застосування щільних або пористих фільтрувальних матеріалів, за допомогою яких фільтрують рідини. Частинки забруднень видаляють з рідини також впливом сил відцентрового, магнітного, електричного або іншого полів. Як пристрої, що очищають рідину, використовують різні фільтри або відцентрові, магнітні й електростатичні очисники.

Рідина може очищатися від дрібних твердих частинок під дією сил їхньої ваги, тобто через осадження. Однак осадження дрібних частинок, розмір яких менший за 10 мкм, у гравітаційному полі навіть за невеликої висоти стовпа рідини (висоти осадження) – малоефективний процес, оскільки може тривати кілька діб. Швидкість осадження частинок, а отже, і ефективність очищення можуть бути збільшені в десятки й сотні тисяч разів, якщо скористатися відцентровим полем. Силове відцентрове поле створюється за допомогою спеціальних апаратів – центрифуг [9; 10].

Спосіб газорідинного промивання з подачею газу в імпульсному режимі використовують на деяких агрегатних заводах під час очищення корпусних деталей агрегатів, трубопроводів і інших виробів з невеликими габаритами. Спосіб дозволяє в 2-3 й більше разів зменшити тривалість очищення виробів порівняно із прокачуванням однорідним сталім потоком мийної рідини. Цей спосіб найбільш ефективний для очищення коротких каналів і порожнин. Його недоліки – труднощі керування в необхідних межах змінними гідродинамічними параметрами потоку, велика витрата азоту (близько 10 кг/год.) та потреба в його відокремленні для забезпечення безкавітаційного режиму роботи насосів, а також негативний вплив газу на фізико-хімічні властивості й стабільність мийної рідини.

Для відповідальних деталей плунжерних пар розподільників, клапанів, дроселів і інших регулювальних пристроїв широко застосовують ультразвукове очищення.

До недоліків ультразвукового очищення можна віднести обмеження розмірів очищувальних деталей, труднощі забезпечення ефективного відведення забруднень із зони очищення, а також можливість за певних умов кавітаційного пошкодження деталей. Разом з тим, ефективно очистити деякі деталі можна лише за допомогою ультразвуку. Це дрібнокапілярні фільтроелементи, які використовують у сучасних гідравлічних і паливних системах; очистити їх іншими способами, крім очищення в ультразвукових ваннах, неможливо.

Процес очищення поверхні металу потоком рідини можна поділити на такі зв'язані між собою елементарні процеси: відрив частинок забруднень від поверхні, що очищується; зважування забруднень потоком рідини; транспортування забруднень до фільтрувальних пристроїв.

Процес відриву частинок забруднень є основною складовою всього процесу очищення. Разом з тим частинки, що відірвались від поверхні, мають бути швидко вилучені, для чого потік рідини повинен мати необхідну зважувальну й транспортувальну здатності.

Під зважувальною здатністю рідкого середовища розуміють її здатність утримувати у зваженому стані тверді частинки певних розмірів. Зважувальна здатність визначається природою й концентрацією зваженої речовини. Зважувальна здатність дисперсного середовища зазвичай характеризується найбільшим (критичним) розміром частинок і їх кількістю, які можуть стійко утримуватись цим середовищем у зваженому стані. На сьогодні визнано, що стійке перенесення рідиною важких частинок у зваженому стані можливе тільки в турбулентних потоках рідини.

Розглянемо процеси відривання і зважування частинок забруднень потоком рідини, які стали класичними. На частинку, що лежить на поверхні деталі, відповідно до загальноприйнятих норм, діють такі сили (рис.1): сила ваги частинки в рідині G ; сила адгезії частинки до поверхні $F_{ад}$; підймальна сила W_y , що являє собою вертикальну складову головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частинку; сила лобового опору W_x – складова головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частинку, що збігається з напрямком вектора швидкості потоку. Оскільки реальні розміри частинок забруднень, що підлягають видаленню – 0,5-100 мкм, то значна їх кількість опиняється під час очищення у товщині межового шару рідини, що являє собою шар рідини, загальмований біля поверхні під дією сил в'язкості. Примежовий шар перешкоджає контакту частинок забруднень із сусідніми шарами рідини, що інтенсивно рухаються й утрудняє видалення прилиплих частинок з поверхні.

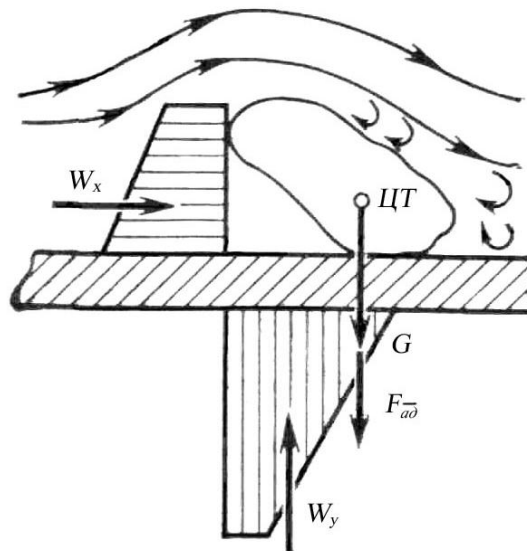


Рис. 1. Схема впливу сил на частинку забруднення, що перебуває на очищуваній поверхні у потоці рідини: ЦТ – центр тяжіння; G – сила ваги частинки в рідині; $F_{ад}$ – сила адгезії частинки до поверхні; W_x – складова головного вектора гідродинамічного впливу рідини на частинку; W_y – підймальна сила

Одиночка частинка, що лежить на поверхні, яку очищають, або виступає над навколишніми частинками, зазнає з боку потоку мийної рідини силовий вплив, причиною якого є сила лобового опору частинки W_x . Під дією сили W_x частинка зміщується (зрушується) відносно поверхні контакту, при цьому сила W_x залежно від форми частинки змушує її котитися або сквзати по

поверхні. Чим більше форма частинки наближається до форми кулі, тим ймовірніше її переміщення коченням. Плоскі й довгі частинки по поверхні або в поверхні переміщуються ковзанням.

Очевидно, відривання частинки від поверхні можливе, якщо сума сил гідродинамічного впливу рідини на частинку в напрямі потоку перевищують силу тертя частинки об поверхню. Величина сили тертя частинки об поверхню залежить від сили її зчеплення з поверхнею, зумовленої здебільшого силою ваги частинки G і силою адгезії $F_{ад}$. Сила адгезії частинок зростає зі зменшенням їх розміру, а також унаслідок замазлювання й зволоження контактувальної поверхні. На цей час ще немає теоретичних й експериментальних досліджень, у яких визначалася б сила адгезії частинок забруднень у паливах, маслах і рідинах гідросистем. Для дрібних частинок забруднень сила адгезії може на кілька порядків перевищувати силу ваги і є, таким чином, основною силою, що утримує частинку на очищуваній поверхні.

За деякої швидкості потоку рідини спостерігається страгування й початок руху перших частинок, стійкість якого може порушуватися, при цьому частинки коливаються і, відриваючись від очищеної поверхні, переміщуються стрибкоподібно поблизу поверхні. За певних умов частинки, що відірвалися, можуть знову осісти на поверхню або перейти в потік у зважений стан.

Величині місцевої швидкості потоку рідини у зоні розміщення частинки, за якої відбувається її відрив від поверхні, відповідає деяка середня швидкість руху рідини, яку називають швидкістю відривання. Розрахунок процесу відривання частинок зводиться до визначення цієї швидкості залежно від розміру частинок.

У працях М.А. Великанова, В.Н. Гончарова, І. І. Леви, Б. А. Шуляка, В.С. Кнороза й інших учених досліджено умови руху частинок наносів у руслових потоках. При цьому розглянуто частинку ґрунту у воді розміром 0,005-2,5 мм і більше. Дослідження показали, що значення швидкості екстрагування для цих частинок при глибині потоку 0,5 м становлять 0,1-3,2 м/хв.

Деякі дослідники стверджують, що через розходження в обтіканні частинок, що істотно відрізняються за розмірами, не представляється можливим знайти загальну формулу для визначення швидкості відриву часток. Середня швидкість потоку, яка потрібна для відривання частинок, зростає зі зменшенням їх розміру. Це пояснюється тим, що силовий вплив на малі частинки, що перебувають у товщі примежового шару, де швидкості руху рідини малі, також досить незначний. Необхідне для відриву частинок збільшення місцевих швидкостей рідини зумовлює збільшення і середньої швидкості.

Розрахунки показують [11], що для видалення полідисперсного порошку забруднювальних частинок розміром від 2-5 до 100-200 мкм і більше з трубопроводів, внутрішній діаметр яких 4-25 мм потрібна об'ємна подача насосної установки 90 м³/год (1500 л/хв), що практично нездійсненно, оскільки об'ємна подача сучасних насосів для гідросистем високого тиску не перевищує 0,6-1,8 м³/год (100-300 л/хв).

Неможливість забезпечити потрібні для очищення швидкості потоку мийної рідини (25-30 м/с) призводить до значного збільшення тривалості очищення, а також не гарантує повного видалення частинок забруднень розміром менше 5-10 мкм.

Спеціальні дослідження показують, що ефективно видалення полідисперсного порошку забруднювальних частинок розміром 2-100 мкм можливе й за помірних середніх швидкостей мийної рідини, якщо в потоці штучно створити збурювання коливаннями тиску або швидкості потоку рідини [12].

Недостатня швидкість потоку мийної рідини при цьому компенсується певною мірою за рахунок створення таких умов для очищення, що сприяють інтенсивнішому руйнуванню зв'язків, які утримують частинки забруднень на очищуваній поверхні.

Для турбулентного потоку рідини характерна наявність поперечних (відносно основного напрямку руху) пульсаційних швидкостей рідини, що є наслідком турбулентного перенесення кінцевих мас рідини.

Наявність у турбулентному потоці поперечних пульсаційних швидкостей рідини робить можливим перенесення разом з масою рідини (у поперечному напрямі) твердих частинок і підтримання їх у зваженому стані.

Шорсткість поверхні очищувальних деталей за певних умов також може стати джерелом виникнення турбулентності потоку, у результаті чого в пристінній ділянці потоку виникають вихори і створюються умови, потрібні для стійкого зважування твердих частинок рідиною.

Оскільки тверді частинки мають більшу, ніж рідина, щільність, вони прагнуть осісти на поверхню каналу, чому перешкоджають наявні у пристінному шарі рідини імпульси турбулентності.

З теоретичних схем, що описують стрибкоподібний рух частинок у пристінній ділянці, найбільш прийнятна теорія А. Ейнштейна, яка потім була розвинена М.А. Великановим, у якій розглядається механізм зважування частинок на основі ймовірності їх відривання від стінки й невипадення частинок, що перебувають у зваженому стані. Основні параметри, що визначають процес за цією теорією – це пульсаційні характеристики потоку і гідравлічна крупність твердих частинок.

Розглянемо тепер відповідно до цієї схеми механізм зважування частинок забруднень турбулентним потоком миючої рідини, для чого виділимо в потоці об'єм рідини, обмежений поверхнями ab і cd (рис. 2) з площею стінки трубопроводу S_{CT} .

Прийmemo, що повздовжніх швидкостей v у потоці немає, а діють лише поперечні пульсаційні швидкості v_{oz} , які характерні для турбулентного потоку. Із площі стінки S_{CT} за час Δt у перший (пристінний) шар рідини за швидкості v_{oz} надходить n частинок забруднення. На поверхні $I-I$, що розділяє перший і другий шари потоку, виділимо площу потоку в перетині ab , яка дорівнює площі S_{CT} . Під гідравлічною крупністю частинки v_{oz} розуміють швидкість рівномірного падіння важкої частинки в деякому об'ємі рідини. Очевидно, що після закінчення часу Δt одна частина частинок із числа n зі швидкістю $v_{oz} = v_{oz}' + v_{oz}$ випаде (осяде) назад на стінку, друга зі швидкістю $v_{oz} = v_{oz}' + v_{oz}$, пройшовши через перетин ab , потрапить у другий шар потоку. Природно, що переміщатися вгору можуть тільки частинки, у яких $v_{oz} = v_{oz}' + v_{oz}$. Розглянувши аналогічно площу потоку в перетині cd , знаходимо, що деяка (ще менша) кількість частинок потрапить із другого шару в третій і т. д. Таким чином, завдяки дії швидкостей турбулентний потік до певної межі буде насичуватися частинками забруднень. Концентрація забруднень C_0 у напрямі від стінки до осі трубопроводу буде зменшуватися (див. епюру 1–2–3), а найбільший розмір частинок d_{max} зі зменшенням інтенсивності швидкостей v_{oz}' повинен також зменшуватися зі збільшенням відстані від стінки (див. епюру 3–4–5–6–7). За малих значень v_{oz}' найбільші частинки не відриваються від стінки, а ковзають або перекочуються по ній під дією сили W_x . У цьому випадку частинки можуть потрапити в такі ділянки трубопроводної магістралі, з яких наступне видалення буде затрудненим (через мікросорсткості, канавки та ін.).

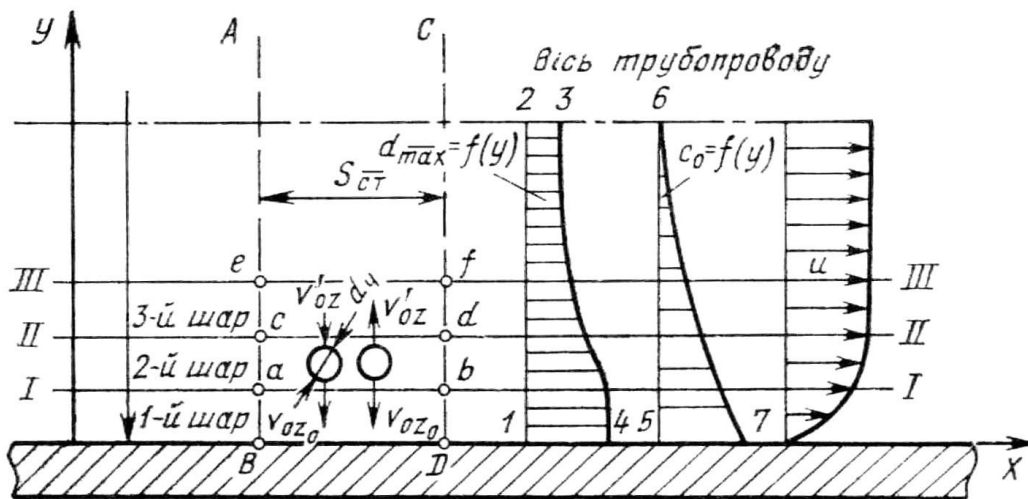


Рис. 2. Схема зважування частинок забруднень турбулентним потоком рідини: C_0 – концентрація забруднень; S_C – площа стінки трубопроводу; d_{max} – найбільший розмір частинок; v_{oz} , v_{oz}' – поперечні пульсаційні швидкості; d_c – діаметр частинки.

Вважають, що ефективність очищення деталей не залежить від тиску мийної рідини. Величину цього тиску зазвичай вибирають за умов забезпечення необхідної об'ємної подачі рідини Q за заданої форми деталей, причому потрібний для очищення (промивання) тиск рідини має не перевищувати робочий тиск у гідросистемі.

Особливо актуальна проблема очищення деталей машин для нерозбірних трибосистем, таких, наприклад, як кулькові підшипники, у яких є приховані поверхні від прямої дії турбулентних потоків через їх конструктивне виконання. Це порожнини, утворені поверхнею тертя-ковзання сепаратора та тіл кочення.

Дослідження впливу змінних електромагнітних полів на забруднення підшипникової сталі ШХ15 підтвердили, що мікро- та субмікро- струмопровідні частинки під дією відомих методів очищення (ультразвуковий, гідродинамічний та змішаний) не видаляються з поверхонь повністю. Тобто відомі технологічні способи очищення деталей машин дозволяють лише зсунути металічні забруднення по межі зерен, на якій в конструкційних сталях виникає і завжди діє електромагнітна складова утримання мікро-, субмікро- та нано- струмопровідних частинок (рис.3).

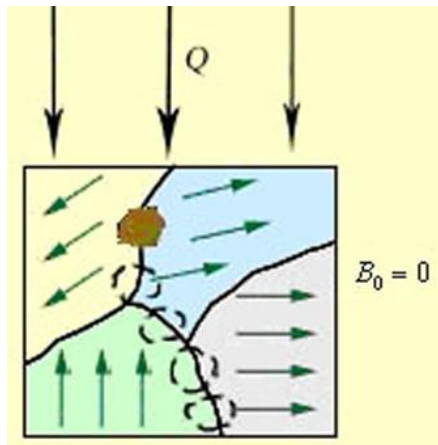


Рис. 3. Переміщення металічної частки забруднення по межі зерен під дією потоку мийної рідини Q . Деталь розмагнічена ($B_0 = 0$)

Виходячи з гіпотези домінуючого внеску електромагнітної складової сили утримання струмопровідних часток забруднень на поверхні деталей машин, нами було розроблено новий метод їх видалення за допомогою джерела змінних імпульсних магнітних полів. Таким джерелом може служити декілька варіантів виконання. Апробація показала надзвичайно високу ефективність цього методу та переваги над існуючими, а саме: безконтактність, відносно невелике енергоспоживання, малогабаритність та продуктивність. Зокрема, при очищенні таким методом кулькових підшипників, в яких є приховані порожнини для прямої дії гідравлічних, кавітаційних та ультразвукових потоків миючої рідини спостерігалось зменшення рівня вібрації на 5-15%, плавність обертання та підвищення їх довговічності і надійності. Про це свідчать численні акти спільних випробувань з такими підприємствами, як ЗМКБ „Прогрес” (м. Запоріжжя), „20-й підшипниковий завод” (м. Курськ), ВАТ „Відео фон” (м. Воронеж), а також науковий центр ARCI (Індія).

Таким чином, розроблений метод, який побудовано на засадах гіпотези електромагнітної природи утримання мікро забруднень на поверхнях деталей машин має велику перспективу в машинобудівному комплексі, зокрема в підшипниковій галузі.

Висновки. Незважаючи на високий рівень сучасної очисної техніки, що дозволяє робити очистку на досить високому рівні, при аналізі процесів, що відбуваються під впливом гідродинамічного потоку миючої рідини на частку забруднення, ми прийшли до висновку і експериментально довели, що досі ніхто не надавав істотного значення магнітній та електромагнітній складовій. Так як повністю розмагнітити кожне зерно феромагнетиків неможливо і завжди має місце залишкова намагніченість, то ця складова грає далеко не останню роль, особливо у випадку з мікро- і наночастинками металу, коли останні утримуються градієнтними міжзеренними магнітними полями, що виникають на межі доменів. Враховуючи розмір доменів (у середньому порядку 10-100 мкм) можна припустити, що гравітаційна складова, яка має місце між часткою забруднення і поверхнею є значно меншою ніж магнітна, особливо у випадку зі струмопровідними наночастинками. Розроблений метод дозволяє вийти на новий рівень промислової чистоти, і відкриває шлях не тільки до істотного збільшення терміну служби вузлів і агрегатів машин, але й при підвищенні їх експлуатаційних характеристик. Це особливо актуально для прецизійних вузлів і агрегатів, які широко застосовуються в авіації й космонавтиці.

Література

1. Коваленко В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел. – М.: Химия, 1978. – 302 с.
2. Никитин Г.А., Чирков С. В. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1969 – 183 с.
3. Итикава М. Контроль загрязнений и промывка гидравлического оборудования// Юацу гидзюцу (Hydraulics and Pneumatics). – 1975. – Vol. 4, N. 4. P. 25—32.
4. Beers R., Dougali J., Zuccarello R. Preventive Maintenance in Hydraulic Systems by Sustematic Routine Fluid Mnitoring. – Ironand teel Engineer, USA – 1975 – Vol. 52, N. 2 – P. 53–56.
5. Kirnbauer E. A. Contamination Control For Fluid Power Symposium, 2-d, Guilford, 1971.
6. Абрамзон Л. А. Поверхностно-активные вещества. – Л.: Химия, 1975. – 248 с.
7. Тельнов Н. Ф. Технология очистки и мойки сельскохозяйственных машин. – М.: Колос, 1973. – 295 с.
8. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
9. Белянин П. Н. Центробежная очистка рабочих жидкостей авиационных гидросистем. М.: Машиностроение, 1976. – 328 с.
10. Белянин П. Н., Черненко Ж. С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. – М.: Машиностроение, 1964. – 294 с.
11. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 431 с.
12. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2018

УДК 621.315.592

В.В. Галян¹, А.Г. Кевшин¹, І.А. Іващенко¹, С.А. Федосов¹, О.О. Лебедь², І.Д. Олексеюк¹,
П.В. Тищенко¹, А.Б. Тимошук¹¹Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки²Національний університет водного господарства та природокористування**ЛЮМИНЕСЦЕНЦІЯ НЕОПРОМІНЕНОГО ТА γ -ОПРОМІНЕНОГО МОНОКРИСТАЛУ
(Ga_{69,5}La_{29,5}Er)₂S₃₀₀**

Методом розчину-розплаву вирошено монокристал (Ga_{69,5}La_{29,5}Er)₂S₃₀₀. В діапазоні 600 – 1020 нм досліджено спектр оптичного поглинання неопроміненого монокристалу. Зафіксовано три інтенсивні максимуми ФЛ при 810, 850, 980 нм, а також максимум низької інтенсивності – 655 нм при збудженні лазером із довжиною хвилі 532 нм. Встановлено, що максимуми ФЛ відповідають переходам в f-оболонці іонів Ербію. Зменшення інтенсивності ФЛ при γ -опроміненні дозами 1000 та 5000 Гр обумовлено генерацією радіаційних дефектів, які зменшують ефективність кросрелаксаційних процесів між іонами Ербію.

Ключові слова: фотолюмінесценція, кросрелаксація, поглинання, монокристал.

В.В. Галян, А.Г. Кевшин, І.А. Іващенко, С.А. Федосов, О.О. Лебедь, І.Д. Олексеюк,
П.В. Тищенко, А.Б. Тимошук**ЛЮМИНЕСЦЕНЦІЯ НЕОБЛУЧЕНОГО І γ -ОБЛУЧЕНОГО МОНОКРИСТАЛА
(Ga_{69,5}La_{29,5}Er)₂S₃₀₀**

Методом вирощування із розчину-розплава отримано монокристал (Ga_{69,5}La_{29,5}Er)₂S₃₀₀. В діапазоні 600 – 1020 нм досліджено спектр оптичного поглинання необлученого монокристалу. Зафіксовано три інтенсивні максимуми ФЛ при 810, 850, 980 нм, а також максимум низької інтенсивності – 655 нм при збудженні лазером з довжиною хвилі 532 нм. Встановлено, що максимуми ФЛ відповідають переходам в f-оболонці іонів Ербію. Зменшення інтенсивності ФЛ при γ -облученні дозами 1000 і 5000 Гр обумовлено генерацією радіаційних дефектів, які зменшують ефективність кросрелаксаційних процесів між іонами Ербію.

Ключевые слова: фотолюмінесценція, кросрелаксація, поглинання, монокристал.

V.V. Halyan, A.H. Kevshyn, I.A. Ivashchenko, S.A. Fedosov, O.O. Lebed, I.D. Olekseyuk,
P.V. Tishchenko, A.B. Tymoshuk**LUMINESCENCE OF NON-IRRADIATED AND γ -IRRADIATED THE SINGLE CRYSTAL
(Ga_{69,5}La_{29,5}Er)₂S₃₀₀**

Significant interest of scientists is the radiation resistance of chalcogenide monocrystals to the effect of γ -irradiation on photoluminescent properties. The single crystal (Ga_{69,5}La_{29,5}Er)₂S₃₀₀ was grown by the melt-solution method. The optical absorption spectrum of a non-irradiated single crystal was investigated in the range of 600 nm to 1020 nm. The photoluminescence properties of non-irradiated and after γ -irradiation by dose 1000, 5000 Gy of monocrystal samples at excitation with a laser of wavelength 532 nm were investigated. Three intensive PL peaks at 810, 850, 980 nm, and a maximum of low intensity of 655 nm were detected. It is established that the PL maxima correspond to transitions in the f-shell of Erbium ions. Reducing the intensity of PL with γ -irradiation at doses of 1000 and 5000 Gy is due to the generation of radiation defects that reduce the effectiveness of cross-relaxation processes between the Erbium ions.

Keywords: photoluminescence, cross-relaxation, absorption, single crystal.

1. Вступ

В останні роки зростає інтерес науковців до монокристалічних та склоподібних халькогенідів, які леговані рідкісноземельними металами (РЗМ) [1]. Використанням цих матеріалів в оптоелектронних приладах, таких як інфрачервоні джерела світла [2], ап-конвертори [3], оптичні підсилювачі [4], сенсори температури [5, 6] та радіації [7, 8] стимулювало інтенсивне їх оптичних та фотоелектричних властивостей. Серед них найбільшого застосування набули матеріали, які мають широке «вікно прозорості» у видимому та близькому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектру [9]. Висока розчинність РЗМ [10, 11] в аморфній та кристалічній матриці сплаву, низька енергія фононів [12, 13], висока інтенсивність фотолюмінесцентного випромінювання та стійкість до дії агресивних середовищ дозволили сульфідним кристалом і стеклом стати вагомим чинником при створенні оптоелектронних, які працюють у видимому та близькому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні.

У халькогенідному склі порівняно із Ер-легованими монокристалічними напівпровідниками ФЛ проявляє велику кількість смуг у видимому та близькому ІЧ діапазоні [11, 14], що пов'язано із можливістю РЗМ займати декілька позицій в аморфній матриці. Монокристали характеризуються високою інтенсивністю ФЛ, але малочисельною кількістю смуг випромінювання [3, 7]. Тому,

особливо цікаві дослідження монокристалічних халькогенідів, леговані РЗМ, які проявляють високу інтенсивність вузьких смуг ФЛ у видимому та близькому ІЧ діапазоні.

Особливий інтерес викликає радіаційна стійкість халькогенідних монокристалів щодо впливу γ -опромінення на оптичні властивості. Із літературних джерел відомі дослідження спектрів оптичного поглинання γ -опромінених деяких типів стекло [15-17]. Проте мало робіт присвячено вивченню впливу γ -опромінення на утворення дефектів, які призводять до зміни люмінесцентних властивостей напівпровідникових матеріалів легованих ербієм. Такі дослідження важливі для розробки сучасних космічних технологій по конструюванню оптоелектронних приладів, які працюють під впливом радіації.

Метою цієї роботи є дослідження спектрів фотолюмінесценції неопроміненого та γ -опроміненого монокристалу $(\text{Ga}_{69,5}\text{La}_{29,5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ у видимому та близькому ІЧ діапазоні.

2. Вирощування монокристалу та методика дослідження

Спосіб вирощування монокристалу був обраний на основі діаграми стану системи $\text{Ga}_2\text{S}_3 - \text{La}_2\text{S}_3$ [15]. Крім того знімалися термограми зразка такого ж складу, по кривих охолодження яких визначали температуру переохолодження, яка становила 70 К. Синтез зразка стехіометричного складу $(\text{Ga}_{69,5}\text{La}_{29,5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ проводили при 1200 К у контейнері з графітованими стінками. Перед графітизацією стінок його ретельно мили мильно-содовим розчином, полоскали дистильованою водою, в кінці травили плавиковою кислотою. У цьому ж контейнері проводили пізніше і вирощування монокристалу. Дно контейнера було у вигляді конуса, контейнер вакуумовувався до тиску $1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. і запаювався. Процес росту проходив у вертикальній двозонній печі. Максимальна температура росту 1200 К, з градієнтом температури на фронті кристалізації 20 К/см. Після розплавлення шихти, ампулу опускали з максимальною швидкістю до досягнення її дном температури переохолодження. Після кристалізації 10 мм розплаву, ампулу зупиняли і, рухаючи її в зворотному напрямі, розплавляли 6,0-8,0 мм закристалізованого зразка. Далі відпалювали його протягом 120 годин і далі здійснювали вирощування при швидкості опускання ампули 7 мм/добу. Після завершення процесу обидві печі охолоджували до 820 К зі швидкістю 60-70 К/добу, після чого відпалювали отриманий монокристал протягом 120 годин. Охолоджували установку в режимі виключеної печі. В результаті був отриманий монокристал жовто-сірого кольору, діаметром 13 мм і довжиною 22 мм (рис. 1). З отриманого монокристалу були виготовлені проби та знята дифрактограма (крок сканування – $0,05^\circ$, час експозиції – 4 сек.), яка показала відсутність інших фаз.

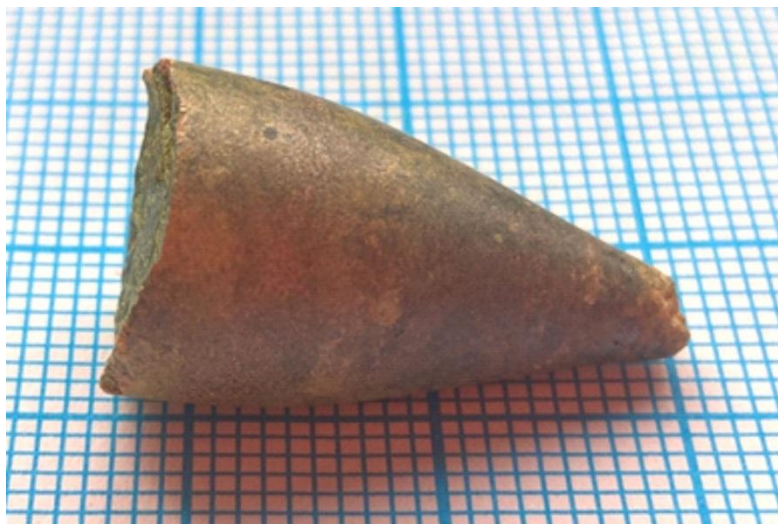


Рис. 1. Фотографія вирощеного монокристалу $(\text{Ga}_{69,5}\text{La}_{29,5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$

Дослідження спектрів оптичного поглинання та ФЛ проводилось за стандартною методикою синхродетектування, АЦ-перетворення, з допомогою монохроматора МДР-206 автоматичною системою регулювання та фіксації температури. Сигнал ФЛ фіксувався з тієї ж поверхні зразка, що і збудження. Для дослідження спектру поглинання зразок готувався у вигляді плоско-паралельної полірованої пластини товщиною 0,8 мм. Реєстрація сигналу проводилась Si та PbS фотоприймачами. Збудження люмінесценції здійснювалось лазером LDM532U із максимумом

випромінювання 532 нм потужністю 150 мВт.

Опромінення кристалу проведено джерелом ^{60}Co на повітрі при температурі навколишнього середовища. Середня енергія падаючих γ -променів була близькою до 1,25 МеВ. Поглинута доза виміряна з використанням пристрою VDEG2-34 SP-1 для виявлення і вимірювання γ -квантів. Діапазон реєстрації γ -променів варіюється в межах значень 0,05 – 3 МеВ. Для дослідження вирізались зразки із центральної частини монокристалу, які опромінювались дозами 1000 та 5000 Гр.

3. Результати експерименту та обговорення

При кімнатній температурі досліджено спектр оптичного поглинання монокристалу $(\text{Ga}_{69,5}\text{La}_{29,5}\text{Er})_2\text{S}_{300}$ в діапазоні 600 – 1020 нм (рис. 2). Зафіксовано вузькі смуги поглинання із максимумами 660, 805, 980 нм, що відповідають переходам із основного $^4\text{I}_{15/2}$ в збуджені стани $^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{11/2}$, в іонах Ербію, відповідно.

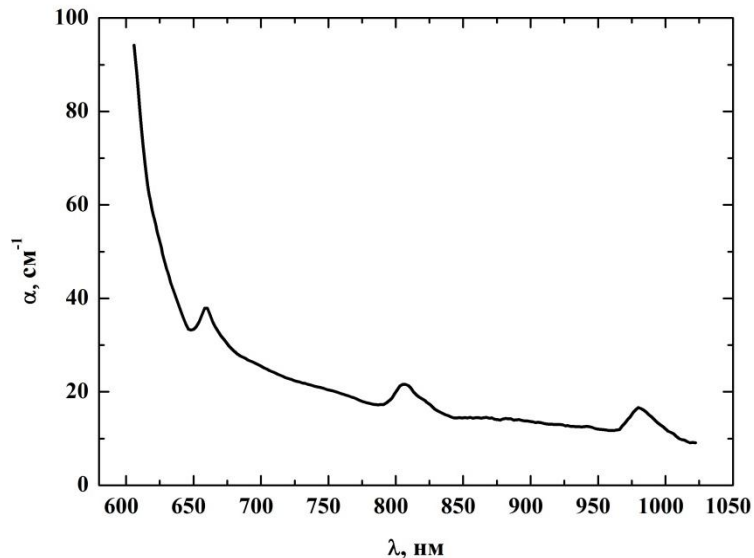


Рис. 2. Спектр оптичного поглинання монокристалу $(\text{Ga}_{69,75}\text{La}_{29,75}\text{Er}_{0,5})_2\text{S}_{300}$

Порівнюючи спектр поглинання дослідженого монокристалу із спектром монокристалу $(\text{Ga}_{69,75}\text{La}_{29,75}\text{Er}_{0,5})_2\text{S}_{300}$ [3] із меншим вмістом Ербію, бачимо, що край оптичного поглинання не зміщується. Крім того, максимуми поглинання, які пов'язані з внутрішніми переходами в іонах Er^{3+} не зазнають суттєвих змін. Це пов'язано із тим, що деяке збільшення концентрації легуючої домішки (з 0,2 до 0,4 ат.% Ер) не трансформує зонну структуру напівпровідника і не обумовлює значних змін в спектрі поглинання монокристалу.

При кімнатній температурі в діапазоні 400 – 1020 нм досліджено спектр ФЛ неопроміненого та γ -опроміненого дозами 1000, 5000 Гр монокристалу $(\text{Ga}_{69,75}\text{La}_{29,75}\text{Er}_{0,5})_2\text{S}_{300}$ (Рис. 3-5). Зафіксовано три інтенсивні максимуми при 810, 850, 980 нм, а також максимум низької інтенсивності – 655 нм, що відповідають переходам $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ в іонах Er^{3+} , відповідно.

Випромінювання при 850 нм виникає внаслідок безвипромінювальної релаксації іонів Ербію зі збудженого стану $^2\text{H}_{11/2}$ в стан $^4\text{S}_{3/2}$. Найінтенсивніша смуга ФЛ при 810 нм утворюється завдяки кросрелаксації



Внаслідок якої, виникає значна кількість іонів ербію в стані $^4\text{I}_{9/2}$. Максимуми

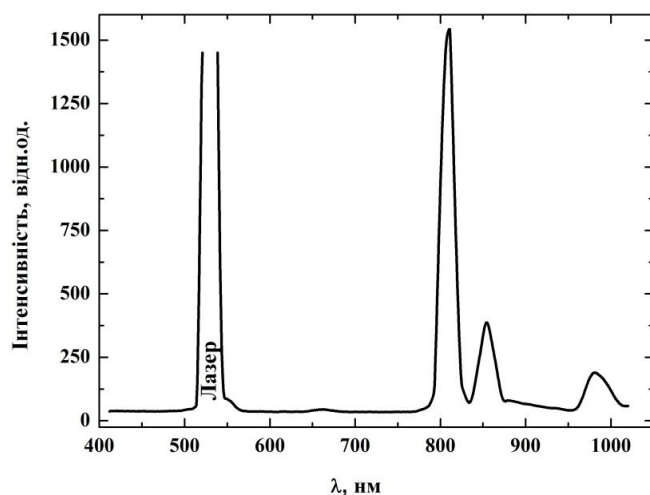


Рис. 3. Спектр фотолюмінесценції неопроміненого монокристалу $(\text{Ga}_{69.75}\text{La}_{29.75}\text{Er}_{0.5})_2\text{S}_{300}$

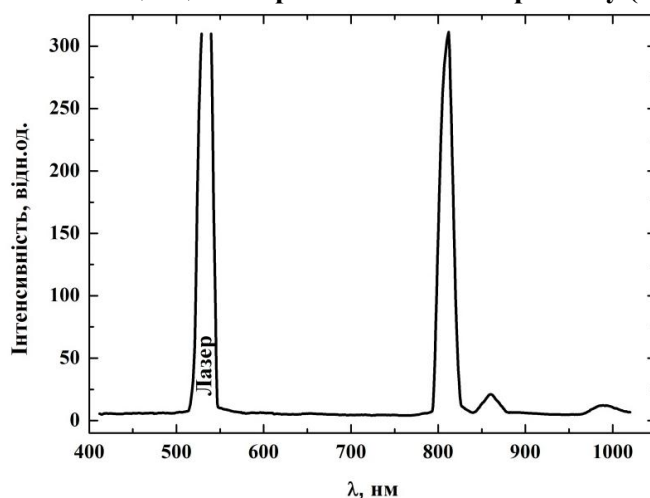


Рис. 4. Спектр фотолюмінесценції опроміненого монокристалу $(\text{Ga}_{69.75}\text{La}_{29.75}\text{Er}_{0.5})_2\text{S}_{300}$ (поглинута доза 1000 Гр)

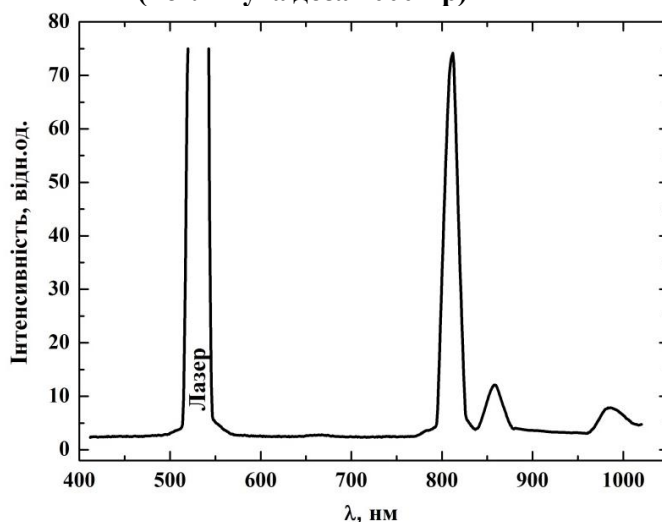


Рис. 5. Спектр фотолюмінесценції опроміненого монокристалу $(\text{Ga}_{69.75}\text{La}_{29.75}\text{Er}_{0.5})_2\text{S}_{300}$ (поглинута доза 5000 Гр)

при 980 та 655 нм утворюються теж завдяки кросрелаксаційним процесам, що представлено формулою (2).



Сусідні іони Ербію, які знаходяться в стані ${}^2\text{H}_{11/2}$ і ${}^4\text{I}_{13/2}$ внаслідок обміну енергією переходять в стан ${}^4\text{F}_{9/2}$ і ${}^4\text{I}_{11/2}$, відповідно. У збудженому стані ${}^4\text{F}_{9/2}$ іони обумовлюють ФЛ випромінювання із максимумом 655 нм, а в стані ${}^4\text{I}_{11/2}$ – смугу ФЛ із максимумом 980 нм.

Зменшення інтенсивності ФЛ при γ -опроміненні відбувається внаслідок утворення радіаційно-індукованих дефектів, які можуть перешкоджати ефективному обміну енергією між іонами через кросрелаксацію.

4. Висновки

За кімнатної температури досліджено спектр оптичного поглинання монокристалу $(\text{Ga}_{69.75}\text{La}_{29.75}\text{Er}_{0.5})_2\text{S}_{300}$. При збудженні лазером із довжиною хвилі 532 нм зафіксовано максимуми ФЛ при 810, 850, 980, 655 нм, що відповідають внутріцентричним переходам $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ в іонах Er^{3+} , відповідно. Проаналізовано механізм випромінювання на основі переходів в f-оболонці іонів Ербію. Встановлено зменшення інтенсивності максимумів ФЛ при γ -опроміненні монокристалу.

Література

1. Luminescence in sulfides: a rich history and a bright future / P.F. Smet, I. Moreels, Z. Hens, D. Poelman // *Materials*. – 2010. – Vol. 3. – P. 2834-2883.
2. Eggleton B.J. Chalcogenide photonics / B.J. Eggleton, B. Luther-Davies, K. Richardson // *Nat. Photonics*. – 2011. Vol. 5. – P. 141-148.
3. Halyan V.V. Electronic structure and optical properties of $(\text{Ga}_{70}\text{La}_{30})_2\text{S}_{300}$ and $(\text{Ga}_{69.75}\text{La}_{29.75}\text{Er}_{0.5})_2\text{S}_{300}$ single crystals, novel light-converting materials / V.V. Halyan, O.Y. Khyzhun, I.A. Ivashchenko, A.H. Kevshyn, I.D. Oleksyuk, P. Tyshchenko, O.P. Vovk, Y.V. Bulik // *Physica B: Condensed Matter*. – 2018. – Vol. 544, №1. – P. 10–16.
4. Direct ultrafast laser written C-band waveguide amplifier in Er-doped chalcogenide glass / Sabapathy, A. Ayiriveetil, A.K. Kar, S. Asokan, S.J. Beecher // *Opt. Mater. Express*. – 2012. – Vol. 2. – P. 1556-1561.
5. Halyan V.V. Effect of temperature on the structure and luminescence properties of $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_{2-\text{Er}_2\text{S}_3}$ glasses / V.V. Halyan, I.V. Kityk, A.H. Kevshyn, I.A. Ivashchenko, G. Lakshminarayana, M.V. Shevchuk, A. Fedorchuk, M. Piasecki // *Journal of Luminescence*. – 2017. – V. 181. – P. 315-320.
6. Галян В. В. Безконтактні оптичні термосенсори на основі монокристалу $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ / І. А. Іващенко, А. Г. Кевшин, І. Д. Олексюк, А. П. Третяк, П. В. Тищенко // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. – 2018. Т. 15, №1. – С. 44–7. Kityk I. V. $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystal: novel material for detection of γ -radiation by photoinduced nonlinear optical method / I.V. Kityk, V.V. Halyan, A.H. Kevshyn, I.A. Ivashchenko, I.D. Oleksyuk, O.O. Lebed, G. Lakshminarayana, M. Piasecki // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2017. – V. 28. – P. 14097–14102.
8. $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$ nanocrystallites as Novel Materials for nonlinear optical detection of gamma radiation / I.V. Kityk, K. Ozga, V. Halyan, I.A. Ivashchenko, M. Piasecki // *MRS Advances*. – 2018. – Vol. 3. – P. 1783-1788.
9. Applications of Chalcogenides: S, Se, and Te (Ed. G.K. Ahluwalia) (Switzerland: Springer International Publishing AG: 2017).
10. Aitken B.G. Rare-erth doped multicomponent Ge-based sulphide glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. – 1997. – Vol. 213/214. – P. 281–287.
11. Kityk I.V. NIR and visible luminescence features of erbium doped $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{--La}_2\text{S}_3$ glasses / I.V. Kityk, V.V. Halyan, V.O. Yuhymchuk, V.V. Strelchuk, I.A. Ivashchenko, Ya. Zhydachevskyy, A. Suchocki, I.D. Oleksyuk, A.H. Kevshyn, M. Piasecki // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2018. – V. 498. – P. 380–385.
12. Laser stimulated piezo-optics of γ -irradiated $(\text{Ga}_{55}\text{In}_{45})_2\text{S}_{300}$ and $(\text{Ga}_{54.59}\text{In}_{44.66}\text{Er}_{0.75})_2\text{S}_{300}$ single crystals / I.V. Kityk, V.O. Yuhymchuk, A. Fedorchuk, V.V. Halyan, I.A. Ivashchenko, I.D. Oleksyuk, M.A. Skoryk, G. Lakshminarayana, A.M. El-Naggar, A.A. Albassam, O.O. Lebed, M. Piasecki // *J. Alloy. Compd.* – 2017. – V. 722. – P. 265–271.
13. Role of structural ordering on optical properties of the glasses $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_{2-\text{Er}_2\text{S}_3}$ / V. V. Halyan, V. V. Strelchuk, V. O. Yuhymchuk, A. H. Kevshyn, G. Ye. Davydyuk, M. V. Shevchuk, S. V. Voronyuk // *Physica B: Condensed Matter*. – 2013. – Vol. 411, №15. – P. 35–39.
14. Halyan V.V. EPR of γ -induced defects and their effects on the photoluminescence in the glasses of the $\text{Ag}_{0.05}\text{Ga}_{0.05}\text{Ge}_{0.95}\text{S}_{2-\text{Er}_2\text{S}_3}$ system / V.V. Halyan, A.A. Konchits, B.D. Shanina, S.V. Krasnovyd, O.O. Lebed, A.H. Kevshyn, M.V. Shevchuk, A.V. Bodnaruk, V.O. Yuhymchuk // *Radiation Physics and Chemistry*, 2015. – V. 115 – P. 189–195.
15. Optical and structural properties of $\text{Li}_2\text{O--Al}_2\text{O}_3\text{--B}_2\text{O}_3$ glasses before and after γ -irradiation effects / D. Singh, K. Singh, B. S. Bajwa, G. S. Mudahar, D. P. Singh et al. // *J. Appl. Phys.* – 2008 – V. 104. – P. 103515–093514-5.
16. Gamma ray irradiation induced optical band gap variations in chalcogenide glasses / Fang Xia, S. Baccaro, Donghui Zhao, M. Falconieri, Guorong Chen // *Nucl. Instr. and Meth. B*. – 2005 – V. 234. – P. 525–532.
17. Threshold restoration effects in γ -irradiated chalcogenide glasses / O.I. Shpotyuk, A.P. Kovalskiy, T.S. Kavetskiy, R.Ya. Golovchak // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2005. – V. 351. – P. 993–997.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2018

УДК 677.11.021

Т.М. Головенко¹, О.Л. Ткачук¹, О.М. Ковтун², О.О. Горач³, О.В. Шовкомуд¹Луцький національний технічний університет¹Херсонський політехнічний коледж Одеського національного політехнічного університету²Херсонський національний технічний університет³

ЗБАГАЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВ УКРАЇНИ СЕРТИФІКОВАНОЮ ЛУБОВОЛОКНИСТОЮ СИРОВИНОЮ З ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

В статті представлено наукові досягнення вчених ХНТУ з раціонального використання і оцінки якості стебел льону олійного. Адже, на сьогодні, льон олійний – це технічна сільськогосподарська культура, яка може відігравати стратегічно важливу роль у формуванні українського ринку луб'яної сировини та готової екопродукції. З метою сертифікації нової лубоволокнистої сировини було розроблено інноваційну методологію оцінювання соломи та трести льону олійного, на основі чого задекларовано технічні умови. Визначено номенклатуру характеристик якості соломи та трести, як промислової сировини і їх граничні значення.

Ключові слова: льон олійний, солома, треста, контроль якості, технічні умови.

Т.Н. Головенко, О.Л. Ткачук, О.Н. Ковтун, О.А. Горач, А.В. Шовкомуд ОБОГАЩЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВ УКРАИНЫ СЕРТИФИЦИРОВАННЫМ ЛУБОВОЛОКНИСТЫМ СЫРЬЕМ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО

В статье представлены научные достижения ученых ХНТУ по рациональному использованию и оценки качества стеблей льна масличного. Ведь сегодня, лен масличный - это техническая сельскохозяйственная культура, которая может играть стратегически важную роль в формировании украинского рынка лубяного сырья и готовой экопродукции. С целью сертификации нового лубоволокнистого сырья была разработана инновационная методология оценки соломы и тресты льна масличного, на основе чего задекларировано технические условия. Определено номенклатуру характеристик качества соломы и тресты, как промышленного сырья и их предельные значения.

Ключевые слова: лен масличный, солома, треста, контроль качества, технические условия.

T.M. Holovenko, O.L. Tkachuk, O.M. Kovtun, O.O. Horach, O.V. Shovkomud ENRICHMENT ENTERPRISES OF UKRAINE CERTIFIED OF BAST RAW MATERIAL WITH OILSEED FLAX

The article presents the scientific achievements of the scientists of the KNTU on the rational use and evaluation of the quality of oilseed flax stems. The scientific novelty of this work is to create an innovative approach to the assessment of oilseed flax straw and retted straw, on the basis of which technical specifications are declared; nomenclatures of quality characteristics of straw and retted straw as industrial raw materials and their limit values are defined. This stems from the fact that nowadays oilseed flax is a technical agricultural crop that can play a strategically important role in the formation of the domestic market of bast raw material as well as of ready-made competitive ecological products. This is a very important issue for Ukraine, as most state enterprises operate on imported raw materials, a high price of which reduces the competitiveness of finished goods in the domestic and world markets.

Standardization of oilseed flax straw and retted straw will allow their positioning as industrial bast raw material in the domestic and world markets, since today they are by-products after harvesting the seeds and are burned in the fields; it will give agricultural producers the opportunity to correctly determine their cost when sold to industrial facilities, increasing profits from the cultivation of this crop as a whole; considering the level of quality of the raw materials it is economically expedient to plan its processing.

The standardization of oilseed flax fiber provides the opportunity to consume the raw materials based on the quality level in a particular industry for the manufacture of products of various functional purposes; to carry out marketing of domestic products in Ukrainian market of raw materials, which will have a quality certificate; to provide textile, pulp and paper and other enterprises of Ukraine with cheap raw materials, which is a strategically important stage for their development in conditions of full import dependence; On the basis of certified raw materials, competitive products of a wide range will be manufactured, which will meet the requirements of consumers and will be successfully implemented in both Ukrainian and world markets.

Key words: flax oil, straw, trusts, quality control, technical conditions

Постановка проблеми. Необхідною умовою ефективного функціонування механізму саморегулювання ринкової економіки є конкуренція. Вона є важливою рушійною силою розвитку та успішності будь-якого підприємства. Підвищення конкурентоспроможності продукції можливе лише за умови збільшення її якості в порівнянні з аналогом. На сьогоднішній день, льон олійний – це єдиний дешевий (в порівнянні з імпортованою) лубоволокнистий сировинний ресурс в Україні (рис.1), обсяги якого можуть задовольнити потреби вітчизняних підприємств з виготовлення целюлозо-паперових, технічних, текстильних, виробів та композиційних товарів [1, 2].

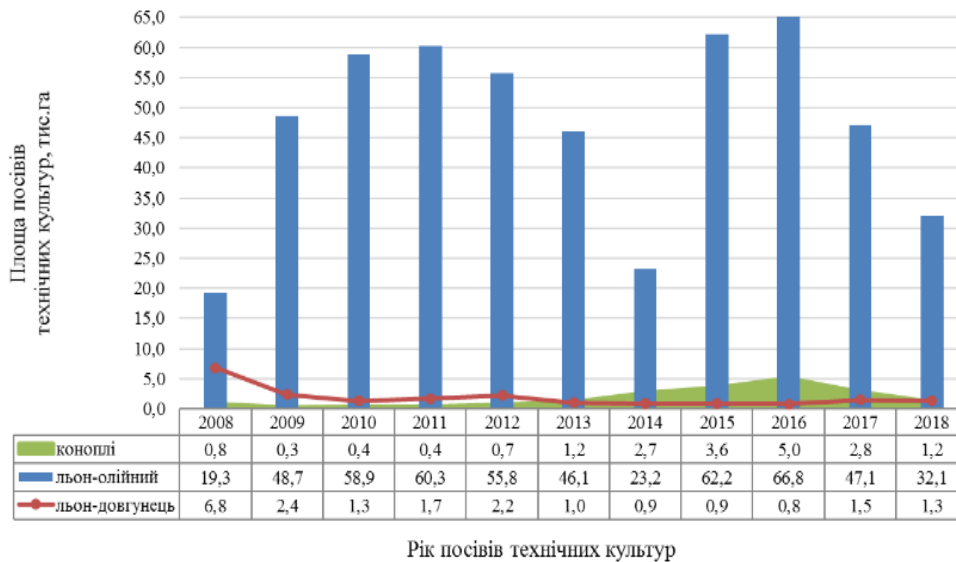


Рис. 1. Динаміка зміни посівних площ України відведених під технічні культури за період 2008-2018 рр.

Аналіз даних, представлених на рис. 1., свідчить про те, що традиційні технічні культури: льон-довгунець та коноплі мають незначні позиції у аграрному секторі в порівнянні з льоном олійним. Дана культура вже 12 років займає 3 місце в переліку рентабельних посівних культур після соняшнику та ріпаку. Збільшення посівних площ льону олійного в Україні пов'язаний зі стабільним попитом на світовому ринку та високими прибутками від продажу насіння. Так, у 2018 маркетинговому році вартість 1 т товарного насіння льону олійного становила 17 тис. грн., а елітного – від 24 тис. грн. [3].

Економічно розвинені країни світу такі, як Канада, США, Німеччина, Швеція, Італія, Франція вже понад 11 років використовують дану групу льону не тільки для отримання насіння. Волокна, одержані зі стебел льону олійного, зараз займають нішу луб'яної сировини «нового покоління» для виробництва широкого асортименту продукції різного галузевого використання [4].

Викладення основного матеріалу. Враховуючи світовий досвід, науковцями Херсонського національного технічного університету розроблено ресурсозберігаючі технології комплексної переробки стебел льону олійного [5, 6], згідно з якими в лабораторних і виробничих умовах було виготовлено інноваційну продукцію [6-8] різного функціонального призначення: целюлозовмісні напівфабрикати, фільтрувальний папір, композиційні та неткані матеріали типу льоноватин, меблеве полотно, неткане полотно і змішана пряжа (рис.2).

Дана продукція має велике народногосподарське значення, екологічно безпечна, відповідає сучасним потребам українського споживача, може конкурувати з імпортованою продукцією, а перш за все для її виготовлення є власна сировина. Але, для її промислового виробництва та виходу за рамки лабораторних досліджень, як на вітчизняний, так і на світовий ринки, необхідно на державному рівні розробити та затвердити нормативні документи, які будуть регламентувати систему контролювання якості, що відповідатиме всім вимогам споживача.

Як відомо, промислова переробка сировини та виробництво інноваційної продукції неможливі без системи управління їх якістю. У зв'язку з відсутністю стандартів для оцінки якості стебел льону олійного та продукції на їх основі як в Україні, так і в світі в практичній та науковій сферах використовують органолептичні методи або чині нормативні документи з оцінювання льону-довгунцю, бавовни та ін. текстильних волокон натурального або хімічного походження [9]. Тому, розроблення технічних умов для контролю якості луб'яної сировини «нового покоління» – соломи, трести та волокон зі стебел льону олійного, з урахуванням сучасних вимог споживача є нагальним питанням в Україні що, сприятиме відновленню льонопереробної галузі нашої держави в цілому.



Рис. 2. Зразки інноваційної продукції на основі волокон льону олійного

Таким чином, аналізуючи вищевикладене актуальним питанням сьогодення є створення цільової методології з визначення рівня якості нової луб'яної сировини з льону олійного: соломи, трести та волокон. Результати наукової роботи повинні бути задекларовані в нормативні документи та затверджені на державному рівні.

З метою вирішення поставлених завдань, під час детального аналізу світового і вітчизняного досвіду промислового використання, наукових досліджень, а також принципів оцінювання продукції зі стебел льону олійного, було визначено номенклатуру всіх характеристик якості соломи та трести, а також узагальнено їх діапазон від мінімального до максимального значення [4-10]. Узагальнені результати наведено в табл. 1, 2.

Отримані результати наукових досліджень є важливим теоретичним підґрунтям при створенні нової методології для оцінки якості соломи, трести та волокон льону олійного з урахуванням усіх сучасних вимог споживачів.

В подальшому, необхідно було визначити, які саме показники (табл. 1, 2) впливають на рівень якості сировини та прогнозують доцільність її первинної переробки. Тому, для виконання основної наукової задачі проаналізовано існуючі методи кваліметрії, що широко застосовуються в наш час для визначення загального рівня якості тієї чи іншої продукції [11].

Таблиця 1

Характеристики якості соломи льону олійного та їх граничні значення

№ з/п	Якісні характеристики соломи	Граничні значення
1.	Вологість, %	технологічна – 6,0 – 8,0
		нормована – 19,0;
		фактична: - в рулонах – не більше 20,0; - в тюках – не більше 25,0.
2.	Вихід лубу зі стебел, %	11,0-40,0
3.	Засміченість, %	5,0-20,0
4.	Група кольору соломи	I, II, III
5.	Технічна частина в загальній довжині, %	60,0-90,0
6.	Технічна довжина, см	15,0-78,0
7.	Загальна довжина, см	до 90,0
8.	Діаметр, мм	1,0-4,1

Таблиця 2

Характеристики якості трести льону олійного та їх граничні значення

№ з/п	Якісні характеристики соломи	Граничні значення
1.	Вологість, %	технологічна – 6,0 – 8,0
		нормована – 19,0;
		фактична: - в рулонах – не більше 20,0; - в тюках – не більше 25,0.
2.	Вихід волокна, %	11,0-40,0
3.	Ступінь вилежаності трести (відокремлюваність, од. / інтенсивність відбитого світлового потоку, люкс)	- вилежана (4,1 і більше / менше 23);
		- недолежана (від 3,1 до 4,0 / 23-27);
		- солома (3,0 і менше / більше 27)
4.	Показник кольору волокна (група кольору соломи з трести)	1,0-4,0 (I, II, III, IV)
5.	Засміченість трести, %	5,0-20,0
6.	Технічна частина в загальній довжині, %	60,0-90,0
7.	Технічна довжина, см	15,0-78,0
8.	Загальна довжина, см	до 90,0
9.	Діаметр, мм	1,0-4,1

Отримані результати наукових досліджень є важливим теоретичним підґрунтям при створенні нової методології для оцінки якості соломи, трести та волокон льону олійного з урахуванням усіх сучасних вимог споживачів.

В подальшому, необхідно було визначити, які саме показники (табл. 1, 2) впливають на рівень якості сировини та прогнозують доцільність її первинної переробки. Тому, для виконання основної наукової задачі проаналізовано існуючі методи кваліметрії, що широко застосовуються в наш час для визначення загального рівня якості тієї чи іншої продукції [11].

Таким чином, використовуючи основні засоби кваліметрії, розроблені системи контролю якості соломи та трести льону олійного з метою встановлення доцільності їх промислової переробки та можливості різногалузевого застосування одержаних волокон. Так, за допомогою експертного методу та принципів ранжування визначено значимі характеристики соломи та трести, які впливають на загальний їх рівень якості. Високу достовірність та надійність одержаних експертних оцінок (рангів) підтверджено математично-статистичним методом згідно якого визначали коефіцієнт конкордації (ступінь збігу оцінок експертів), квадрат відхилень за кожним параметром та загальну суму квадратів відхилень. В подальшому, на основі одержаних експертних оцінок, за шкалою відносної значущості, визначали коефіцієнти вагомості кожного показника якості соломи та трести льону олійного. Тобто, найбільш значимими характеристиками якості для соломи – є вихід лубу зі стебел, засміченість, група кольору соломи та вологість, а трести – вміст волокна, відокремлюваність, група кольору волокна та засміченість трести. Дані показники свідчать про рівень якості соломи та трести льону олійного як промислової сировини. За допомогою диференційного методу обчислено відносні значення вагомих характеристик якості соломи та трести льону олійного у балах [11].

Отже, загальний рівень якості соломи та трести льону олійного повинен визначатися за сукупністю значень вищезазначених характеристик. Ці узагальнюючі оцінки якості було запропоновано назвати – «номер соломи льону олійного» та «номер трести льону олійного». В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень було розроблення та затвердження в ДП «Херсонстандартметрологія» технічні умови ТУ У 01.1-2303511525 – 001:2016 «Солома льону олійного. Технічні умови» та ТУ У 01.1-05480298-001:2017 «Треста льону олійного. Технічні умови» (рис. 3).

Дані нормативні документи регламентують якість соломи та трести льону олійного та їх доцільність первинної переробки та промислового застосування. При їх розробці було враховано вітчизняний і світовий досвід провідних вчених та висококваліфікованих спеціалістів, а також наявність в Україні ресурсів і технічного рівня наукових лабораторій та виробництв.



Рис. 3. Технічні умови для визначення якості соломи (А) та трести (Б) льону олійного

Висновки. Льон олійний, при його наявності в нашій державі в достатньому обсязі, виступає єдиною доступною лубоволокнистою сировиною придатною для застосування в різних галузях промисловості. Тому, переробка стебел льону олійного на підприємствах України та виготовлення інноваційної продукції на основі використання натуральної і якісної сировини – це крок у майбутнє. За умови, стандартизації соломи та трести зі стебел льону олійного можна позиціонувати їх як промислову луб'яну сировину на вітчизняному та світовому ринках, оскільки на сьогодні вони є побічними продуктами після збирання насіння, що спалюються на полях; сільгоспвиробникам правильно визначати їх вартість під час реалізації на промислові об'єкти, збільшуючи прибутки від вирощування даної культури в цілому; враховуючи рівень якості сировини, економічно доцільно планувати її переробку.

Література.

1. Державна служба статистики України. [Мережевий ресурс]. - Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
2. Ковтун О.М. Економічні переваги промислового використання стебел льону олійного в Україні / О.М. Ковтун, Т.М. Головенко, Л.Г. Бартків, О.В. Шовкомуд // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2017. – № 5. – С. 18-23. О.М.
3. Управління інноваційною діяльністю. Основи інноваційного менеджменту. Роль стандартизації в розвитку національної економіки України. [Мережевий ресурс]. - Режим доступу: http://pidruchniki.com/73410/investuvannya/rol_standartizatsiyi_rozvitku_natsionalnoyi_ekonomiki_ukrayini#579.
4. Saskatchewan Flax Development Commission / [Мережевий ресурс]. - Режим доступу: <http://www.saskflax.com>.
5. Наукові основи комплексної переробки стебел та насіння льону олійного: монографія / [Л.А. Чурсіна, Г.А. Тіхосова, О.О. Горач, Т.І. Янюк]. – Херсон: Олді-плюс, 2011. – 356 с.
6. Головенко Т.М. Інноваційні технології одержання нетканих та целюлозовмісних матеріалів з льону олійного / Л.А. Чурсіна, Тіхосова Г.А., Меньяйло-Басиста І.О. // Монографія. – Херсон: Грінь Д.С., 2014. – 304 с. (особистий внесок 76 сторінок).
7. Путінцева С.В. Властивості фільтрувального паперу на основі целюлози з волокон льону олійного: автореф. дис. канд. техн. наук. Луцьк, 2015. 20с.
8. Бойко Г.А. Товарознавча оцінка змішаної пряжі з волокнами льону олійного для трикотажних виробів: автореф. дис. канд. техн. наук. Луцьк, 2014. 20с.
9. Горач О.О. Актуальність розробки нормативних документів на стебла соломи та волокно льону олійного / О.О. Горач, Д.Г. Круглий, Л.Г. Бартків // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 2 (57). – С. 118-122.
10. Федосова Н.М. Исследование свойств льна-межеумка и обоснование метода прогнозирования его технологической ценности: дис. канд. техн. наук. Кострома, 2012. 157 с.
11. Боженко Л.І. Управління якістю, основи стандартизації та сертифікації продукції: [навч. посіб.] / Л.І. Боженко, О.Й. Гутта. – Львів, 2001. – 176 с.

Стаття надійшла до редакції 24.12.2018

УДК 628.316.12

М.В. Дегтяр

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова
**ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИЙОМИ ПРИ ОЧИЩЕННІ ДРЕНАЖНИХ ВОД
ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ**

Проведена оцінка ефективності використання різних підходів до очищення стічних вод полігонів твердих побутових відходів, зокрема комбінованих методів на підставі власних досліджень

Ключові слова: фільтрат, біодиски, мембранні модулі, ацетогенез, метаногенез

М.В. Дегтярь

**ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПРИ ОЧИСТКЕ ДРЕНАЖНЫХ ВОД
ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Выполнена оценка эффективности использования различных подходов к очистке сточных вод полигонов твердых бытовых отходов, в частности комбинированных методов на основании собственных исследований.

Ключевые слова: фильтрат, биодиски, мембранные модули, ацетогенез, метаногенез

M. Degtyar

BASIC TECHNOLOGICAL TECHNIQUES IN THE CLEANING OF LEACHATE

The effectiveness of the use of various approaches to leachate treatment, in particular, combined methods based on our own research, has been evaluated.

Keywords: filtrate, bio-disks, membrane modules, acetogenesis, methanogenesis

Постановка проблеми.

Основним фактором негативного впливу полігона твердих побутових відходів (ТПВ) на навколишнє середовище є вплив фільтраційних вод, що утворюються в результаті розкладання відходів. Забезпечення стабільного сприятливого санітарного стану території та охорони водного, повітряного басейнів вимагає розробки та впровадження високоефективних технологій очищення фільтраційних вод полігонів ТПВ.

Виходячи з морфологічного складу відходів можна спрогнозувати якісний склад дренажних вод.

Усі відходи залежно від процесів, що лежать в основі їх розкладання розділяють на біодеградуємі, до яких можна віднести: харчові, садово-паркові відходи, текстиль, деревину й ін., складові в середньому 60-80% від загальної маси ТПВ; відходи, що зазнають хімічної деструкції – метали (чорні й кольорові), пластмаси, камені, скло та ін.

У результаті протікання в тілі полігона процесів анаеробного розкладання ТПВ, проникнення усередину тіла полігона атмосферних опадів, утворюється фільтрат, який містить продукти вилуджування водорозчинних сполук і продукти розкладання відходів. На більшості полігонів і смітників України фільтрат з тіла полігона, не очищається та стікає в найближчі водотоки, а скидання фільтрату у водойми загального користування категорично неприпустимо. На деяких полігонах фільтрат збирають у спеціально створені ставки-накопичувачі. В багатьох випадках дно таких ставок буває врізаними у водоносні шари.

З екологічної точки зору найнебезпечнішим фактором впливу полігонів ТПВ на навколишнє середовище є сильно мінералізовані стічні води полігонів широкої хімічної природи. Вони можуть бути причиною прямого знищення навколишнього середовища, флори й фауни, забруднення ґрунтових вод, ґрунту та поверхневих джерел. На сьогоднішній день універсальної ефективною технології очищення та утилізації фільтрату не існує. Одна із причин - мінливість його складу, який визначається морфологічним складом ТПВ, часом знаходження в тілі полігона (смітника), а також ступенем розведення атмосферними опадами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Очищення дренажних вод являє собою надзвичайно складну проблему та вимагає багатоступінчастої комбінації різних фізико-хімічних і біологічних методів, значних капітальних і експлуатаційних витрат.

Аналіз закордонної та вітчизняної літератури [1-3] показав, що поширення одержали наступні групи способів очищення фільтрату:

- Біологічне очищення фільтрату;
- Фізико-хімічне багатоступінчасте очищення;

Технологічні схеми очищення фільтрату ґрунтуються на застосуванні переважно методів біохімічної деструкції органічних речовин у комбінації з фізико-хімічними процесами – коагуляції-флотації, рідкофазного окиснення, фільтрації, ультрафільтрації, адсорбції, зворотного осмосу, концентрованого випарювання в різних комбінаціях [4,5].

Фільтрат з органічними домішками, як правило, очищають за допомогою біохімічних методів, а також залежно від концентрацій присутніх компонентів застосовують аеробне або анаеробне очищення. Для доочищення використовують адсорбційні методи (у якості завантаження виступає активне вугілля та ін. сорбенти) [6]. Знезаражування води здійснюється хлоруванням, озонуванням або ультрафіолетовим опроміненням.

Анаеробні методи більше застосовують на стадії ацетогенеза полігону, що утворюється на експлуатаційному циклі полігону. Основними перевагами анаеробного очищення в порівнянні з аеробним можуть бути виділені наступні [7]:

- не потрібна подача кисню в оброблюване середовище;
 - значно зменшуються витрати електроенергії;
 - збільшується мінералізація анаеробного осаду при видаленні важких металів, що підвищує цінність його як добрива;
 - знижується кількість добавок для живлення мікрофлори;
- До недоліків анаеробного очищення можна віднести наступні:
- необхідність високих (більш 30°C) температур для досягнення ефективної кінетики процесу;
 - менша ефективність видалення важких металів.

Застосування аеробних методів для очищення фільтрату в стадії метаногенеза можливе при проведенні попереднього фізико-хімічного та хімічного очищення, тому що стоки мають високий солевміст, наявність хлорорганічних сполук [6, 8].

Систематизація результатів наведених досліджень [9- 11] дозволяє зробити висновок, що:

- при використанні біохімічного очищення на стадії метаногенеза рекомендується попередня хімічна або фізико-хімічна обробка;
- використання сорбційного очищення на стадії метаногенеза рекомендується для низькоконцентрованих фільтраційних вод;
- при використанні реагентної коагуляції на стадії ацетогенеза досягається зниження БПК до 60%, кольоровості до 85%;
- при використанні мембранних технологій очищення на стадіях ацето-і метаногенеза без предочищення відбувається швидке засмічення мембран і утворення концентрату, складного в подальшій утилізації, метод може бути використаний у якості доочищення на будь-якому етапі життєдіяльності полігону ТПВ.

Специфіка складу стічних вод полігонів ТПВ, обумовила необхідність застосування комплексних технологій очищення, тому що найчастіше використання одного методу або способу не дозволяє досягти необхідних результатів.

Постановка завдань.

Метою роботи є обґрунтування застосування багатоступінчастої схеми очищення з реагентною коагуляцією та використанням баромембранних модулів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

Аналіз сучасного стану існуючих методів очищення дренажних вод полігонів ТПВ, оцінка їх ефективності, можливість застосування на різних полігонах ТПВ.

Розробка експериментальної установки для дослідження процесу очищення стічних вод полігонів ТПВ.

Визначення основних факторів, які впливають на ефективність очищення дренажних вод.

Викладення основного матеріалу.

Для очищення висококонцентрованих дренажних вод полігонів ТПВ використовуються фізичні, хімічні, біологічні методи, а також їх комбінація.

Перераховані способи та методи очищення потребують значних капітальних коштів на обладнання та його експлуатацію, великих площ і іноді не досить ефективні. Саме тому на даний момент існує проблема розробки та втілення ресурсозберігаючих, локальних (компактних), надійних та високоефективних методів та споруд для забезпечення стабільно-високого ступеня очищення висококонцентрованих стічних вод.

Україна входить до переліку країн, які мають серйозні проблеми з переробки відходів, у першу чергу, за рахунок недолугої політики що до збору та захоронення, яка виключає сортування

відходів та їх вторинне використання. У 2012 році у статтю 32 Закону України "Про відходи" був доданий пункт про обов'язкове сортування сміття, який вступив в силу з 1 січня 2018 року. Згідно якого захоронення на полігонах неперероблених (необроблених) побутових відходів забороняється. Тобто, Україна зобов'язалася сортувати все сміття за видами матеріалів, а також розділяти його на придатне для повторного використання, для захоронення та небезпечне. Цей пункт відповідає двом Директивам ЄС – 1999/31/ЄС та 2008/98/ЄС, які врегульовують поводження зі сміттям у країнах Європи, пропонують план дій, щодо скорочення кількості сміття, що потрапляє на полігони [12, 13]. Щорічно обсяги відходів в Україні збільшуються майже на 500 млн тонн, а загальні обсяги накопичених сягають 14 млрд тонн, при цьому, лише 10% відходів використовуються в якості вторинних ресурсів.

В 2012 р. набув чинності наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України « Про затвердження Методичних рекомендацій зі збору, утилізації та знешкодженню фільтрату полігонів побутових відходів». Зазначений документ рекомендує для очищення фільтратів використовувати фізичні, фізико-хімічні, хімічні та біохімічні методи

Аналіз результатів досліджень, виконаних Вайсманом Л. І., Гончаруком В. В, Балакіною М. Н. [14, 15] та ін. показав, що ефективність очищення дренажних вод полігонів ТПВ підвищується при використанні коагуляції. Проте інтенсифікація процесу очищення з використанням коагулянтів не завжди може бути досягнута з технічних і економічних причин. У зв'язку з цим з'явилася необхідність розробки і впровадження ефективніших методів, що дозволяють інтенсифікувати процес очищення стічних вод полігонів ТПВ, підвищити продуктивність очисних споруд, знизити витрату коагулянту, поліпшити якість очищення стічних вод полігонів.

Стічні води полігонів ТПВ характеризуються переважно за інтегральними показниками - БПК і ХПК, які в десятки раз можуть перевищувати ці показники для звичайних стічних вод, а також по вмісту важких металів, амонійного азоту та інших речовин.

Високий солевміст фільтрату передбачає використання мембранних технологій для доочищення фільтраційних вод, бо застосування іонообмінних методів при таких високих концентраціях нерентабельно. У цьому випадку мембранна технологія може бути використана в якості альтернативи сорбційним методам [16]. Мембранні технології, засновані на використанні полімерних тонкошарових зворотньоосмотичних мембран – як у вигляді плоских аркушів, так і у вигляді рулонних елементів – що представляють собою альтернативу біологічному очищенню.

Мембранні елементи можуть бути наступних типів:

- плоскокамерні;
- трубчасті;
- рулонні;
- на основі порожніх волокон;
- дискові.

На даний момент в Україні (м. Київ, полігон №5) експлуатується система зворотного осмосу PALL-ROCHEM продуктивністю 220 м³/доб, яка була запущена на полігоні ще в 1998 році, в 2008 році – модернізована та в 2013 реконструйована. В 2015-2017 роках фахівцями була проведена діагностика роботи установки, за результатами якої були розроблені рекомендації з її модернізації, була модернізована морально застаріла система автоматичного керування, замінені контрольно-вимірювальні прилади, електросилове встаткування, виконаний капітальний ремонт насосів. У цей час, після більш ніж 15 років експлуатації й дворічного простою, установка працює із проектною продуктивністю, очищений стік повністю відповідає існуючим вимогам і абсолютно безпечний з екологічної точки зору. В перспективі планується збільшити продуктивність установки до 600 м³/доб., та доукомплектація додатковим устаткуванням для знешкодження сконцентрованого фільтрату [17].

Використання даної системи дозволяє значно знизити показники БПК і ХПК, зміст хлоридів, аміаку. При фільтрації через мембрану потік розділяється на очищену воду (пермеат), і концентрат. Тиск на установках становить від 65 до 150 бар (залежно від ступеня очищення). Отриманий пермеат відновлюється на біотопах і зливається в поверхневі водойми.

Конструктивною особливістю установки є модульна диск-трубчаста система (рис. 1), процес очищення відбувається в умовах відсутності фазових переходів при виділенні домішок.

Застосування звичайних рулонних зворотньоосмотичних мембранних елементів, що традиційно використовуються у водопідготовці, обмежене специфічним складом фільтрату – високим вмістом колоїдних речовин, органічних забруднень, інших домішок, що утворюють

нерозчинні відкладання на поверхні мембран. У світовій практиці для очищення фільтрату використовуються спеціальні мембранні модулі – з більш широкими каналами й особливою структурою спейсерів для більш інтенсивної турбулізації потоку оброблюваного фільтрату, що робить їх більш стійкими до забруднень. Установки з використанням таких мембран експлуатуються на десятках полігонів по усьому світу [18].

Апаратним оформленням такого процесу можуть виступати елементи мембранної технології у вигляді дискової трубки RO (DTRO), яка знайшла широке застосування для очищення фільтраційних вод полігонів ТПВ (рис. 1)

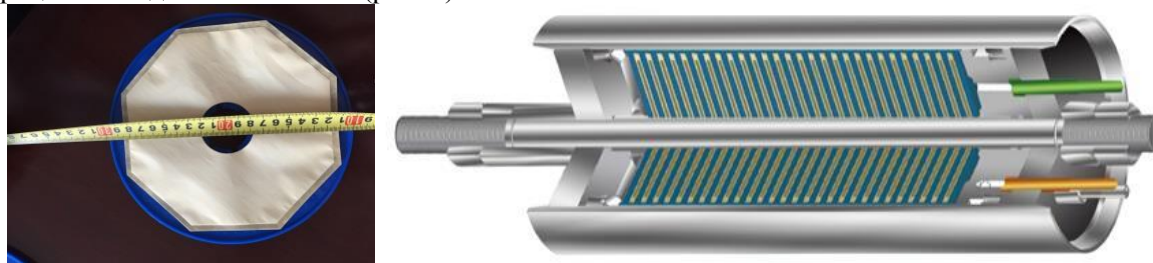


Рис. 1 – Дискова трубка RO (DTRO) мембранний модуль

Суттєвою перевагою мембранних технологій є можливість використання різних комбінацій елементів, що дозволяє ефективно вирішувати поставлене завдання: на мембранах відбувається концентрування фільтрату з одержанням очищеного стоку необхідної якості.

Але, як вже зазначалося для ефективної та тривалої роботи мембран фільтраційні води повинні пройти стадію предочищення, зокрема, слід урахувувати, що в стічних водах присутні компоненти, що викликають деструкцію мембран.

Для попередньої обробки найчастіше рекомендують застосовувати окислення, адсорбцію на активному вугіллі, а також реагентне коагулювання.

Ефективність окисних методів при підготовці невелика.

При дослідженні коагуляційних методів на прикладі фільтрату полігона №5 (Київська область) установили, що найбільш ефективним коагулянт є основний сульфат алюмінію, який дозволяє досягти 50%-ного ступеня зниження по ХПК і 80%-ного знебарвлення. Фільтрат після попередньої обробки основним сульфатом алюмінію та наступного очищення баромембранним методом відповідав нормам до скиду.

Крім того для інтенсифікації процесу предочищення пропонується використовувати активований розчин коагулянту сульфату алюмінію. Для активації передбачається використовувати спеціальний пристрій. Яке передбачає одночасну й послідовну активацію розчину магнітним полем і насичення його анодно-розчинним залізом [19].

Згідно із проведеними дослідженнями таке технологічне рішення дозволяє збільшити ефективність предочистки до 30%.

Дослідження виконувались в лабораторних умовах, на дослідно-промисловій пілотній установці. У якості реагенту пропонується активований розчин сульфату алюмінію, який піддають магнітній обробці та електрокоагуляції. Регламентом дослідження передбачено почергове використання активованого та звичайного розчинів коагулянту.

Якісний склад дренажних вод наведений у таблиці 1.

Таблиця 1

Якісна характеристика дренажних вод полігона ТПВ

Період досліджень	Якісні показники								
	Сухий залишок, мг/дм ³	БПК ₅ , мгО/дм ³	ХПК, мг/дм ³	СПАР, мг/дм ³	Зважені речовини, мг/дм ³	рН	Азот, мг/дм ³	Нітрати, мг/дм ³	Сульфати, мг/дм ³
Осіпний	21514,3	184,5	1006,5	0,62	255,4	7,6	57,7	108,4	1520,1

На підставі досліджень була розроблена технологічна схема очистки, у якій активований розчин коагулянту вводиться на першому етапі обробки в якості предочищення.

До складу установки входять: змішувач, первинний відстійник, каркасно-засипні фільтри, мембранний модуль; пристрій для знезараження.

У процесі дослідження визначалися наступні показники очищених стічних вод: вміст завислих речовин, кольоровість, БПК₅, ХПК. Одночасно в очищених стічних водах визначався залишковий вміст алюмінію для забезпечення подальшої безпеки протікання процесів очищення.

Дренажні води надходять у збірник для забезпечення рівномірної та безперебійної подачі фільтрату. Активатор реагентів, встановлений на обвідній лінії та використовується відповідно до регламенту дослідження. У змішувачі відбувається змішування розчину коагулянту (активованого або звичайного – згідно регламенту) зі стічними водами, далі самопливом по трубопроводу стічна вода направляється в первинний відстійник, де осідають утворені домішки, для більш ретельного затримання домішок воду пропускають крізь каркасно-засипний фільтр. Після механічного очищення та реагентної обробки, вода потрапляє на мембранні модулі.

Результати виконаних досліджень [19], представлені в таблиці 2. Аналізуючи данні таблиці можна зробити висновок, що використання активованого розчину коагулянту сульфату алюмінію дозволяє підвищити якість попередньої стадії очищення дренажних вод по вмісту завислих речовин і по кольоровості на 33% і 47% відповідно, за показниками ХПК і БПК₅ поліпшення в середньому на 25% і 30% відповідно.

Таблиця 2

Дані експериментів, проведені на пілотній установці з використанням звичайного та активованого розчину коагулянту сульфату алюмінію

Серія експериментів	Показники вихідної стічної вод				Параметри активації			Показники очищеної стічної води					Поліпшення показників очищених стічних вод, %			
	Завислі речовини, мг/дм ³	Кольоровість, град.	ХПК, мгО ₂ /дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	Напруженість магнітного поля, кА/м	Зміст анодно-розчиненого заліза	Доза коагулянту сульфату алюмінію, мг/дм ³	Завислі речовини, мг/дм ³	Кольоровість, град.	ХПК, мгО ₂ /дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	Зміст залізу за ал алюмінію, мг/дм ³	Зважені речовини, мг/дм ³	Кольоровість, град.	ХПК, мгО ₂ /дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³
I (звичайний розчин коагулянту)	255-267	150-165	994, 7-1006,5	172-184,5	325	12,5	210	58,6	118	524,5	68,3	0,35	-	-	-	-
IV(активована розчин коагулянту)	238-254,1	160-175	1029-1051,6	147-161,5	325	12,5	210	36,5	57	404,9	42,6	0,17	1,4	49,3	24,2	31,3

Залишковий вміст алюмінію, при використанні розчину коагулянту сульфату алюмінію, перебуває в межах 0,15–0,35 мг/дм³, і не має негативного впливу при подальшому очищенні.

Аналізуючи отримані данні можна зробити висновок, що якісні показники стічних вод покращились у середньому на 30–40%, збільшилася швидкість осадження скоагульованих домішок при обробці активованим розчином коагулянту. Після проходження фільтрату крізь мембранний модуль досягли показників, наведених в таблиці 3.

Показники ефективності очищення фільтрату після мембранного модуля

Параметр	Фільтрат	Пермеат
pH	7,8	6,8
XПК, мгО ₂ /л	994, 7-1006,5	<15
Амоній	320	9,8
Завислі речовини	255-267	<15
Важкі метали	0,25	<0,005

Висновки. В статті проаналізована ефективність різних підходів до очищення фільтрату полігонів ТПВ, визначені граничні умови їх застосування. В роботі запропоновано багатостадійну технологію очищення стічних вод з досягненням нормативів до скиду у водні об'єкти певної категорії. Зокрема, за рахунок ефективної стадії предочищення реагентної коагуляції та застосуванням мембранних модулів з різним розміром пор.

Також слід зазначити, що для зменшення обсягу накопичення фільтрату, а також спрощення схеми очистки фільтрату необхідно активно втілювати програми з роздільного збору сміття, щоб одержувати фільтрат у меншому обсязі, з більше стабільним якісним складом.

Список використаних джерел:

1. Mersiowsky L. Long-term Behavior of PVC Products and fate of Phthalate Plasticizers under Landfill Conditions / L. Mersiowsky, Stegmann R. // VII International waste management and landfill symposium. Sardinia.– 1999. – Vol. I. P.193-199.
2. Щербина Г.П. Исследование фильтрационных стоков полигона ТПВ для установления возможности утилизации его с использованием фермента класса оксигеназ / Г.П. Щербина и др // Інформаційно-аналітичний збірник «Санітарна очистка міст та комунальний автотранспорт» – Вип. 4 К. 2002. – С. 51–56.
3. Canziani R. Landfill hydrology and leachate production/ Canziani R., Cossu R // Land filling: Process, Technology and Environmental Impact. London. 1994.
4. Степняк С.В. Методи очистки стоков зі сміттєзвалищ / Степняк С.В, Інформаційно-аналітичний збірник «Санітарна очистка міст та комунальний автотранспорт» – Вип. 4 К. 2002. – С.72-77.
5. Ceçen, F. Effect of PAC addition in combined treatment of landfill leachate and domestic wastewater in semi-continuously fed-batch and continuous-flow reactors / F.Ceçen, O. Aktas // Water SA – 2001.–27 (2).–P.177-188.
6. Safaa M. Raghav, Ahmed M/ AbdEiMeguid, Hala A. Hegazi// 2013 № 9, 187-192 p. Housing and building national Research Center.
7. Welander U. Nitrification of landfill Leachate Using Suspended-Carrier Biofilm Technology / Welander U., Henrysson T. // Water Research – 1997 – № 31(9) – P.2351-2355.
8. Sustaina bletreatmentofland fillleachate Mohamad Anuar Kamaruddin Mohd. Suffian Yusoff Hamidi Abdul Aziz Yung-Tse Hung Appl Water Sci (2015) 5:113–126 DOI 10.1007/s13201-014-0177.
9. Melike YahhKihe. Landfill leachate treatment by the composition of physicochemical methods with absorption process/ Melike Yahh Kihe, Kadur Kestioglu, Taner Yonar// Biol. Environmental Scientific.-2007, 1(1) – P.37-43.
10. Солодовник М.В. Граничные условия применения методов очистки дренажных вод полигонов твердых бытовых отходов / М.В. Солодовник // «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво»: Міжвідомчий наук.-техн. зб.- Рівне: НУВГП, 2009. – Вип. № 34.–С.309-314.
11. M. Lema, R. Mendezand R. Blazquez, “Characteristics of Landfill Leachates and Alternatives for Their Treat-ment: A Review,”Water, Airand Soil Pollution, Vol. 40, No. 3-4, 1988, pp. 223-250.
12. <http://rada.today/prognozi-i-dumki/cikavo-znati/sortuvannya-smittya-zakon-i-realist>
13. http://texty.org.ua/pg/news/textynewseditor/read/79093/Zakon_z_2018_roku_Ukraina_zobovjazalasa_sortuvaty;
14. Вайсман Я. И. Очистка фильтрационных вод на различных этапах жизненного цикла полигона захоронения твердых бытовых отходов / Я. И. Вайсман, И. С. Глушанкова, Л.В.Рудакова // Сб.научных трудов: Образование наука, Перм ГТУ.–2001.С. 3–6.
15. Гончарук В. В. Очистка дренажных вод свалок твердых бытовых отходов баромембранными методами / В. В. Гончарук, М. Н. Балакина и др. // Химия и технология воды, 2006. – Т. 28, № 5. – С. 462–471.
16. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография / С. С. Душкин, А. Н. Коваленко, М. В. Дегтярь, Т. А. Шевченко; Харьк. нац. акад. городского хоз-ва – Х. :ХНАГХ. – 2011. – 168 с.
17. <http://kpravda.com/na-poligone-5-zapustili-rekonstruirovannuyu-sistemu-pererabotki-filtrata/> Київська правда © www.kpravda.com/
18. Павел Стендер// [Очистка реконструкция WaterNet журнал Вода и Водоочистные Технологии водернетмембранные технологии модернизация фильтрат свалок ТБО полигон утилизация твердые бытовые отходы](#);
19. Патент України № 45190 «Спосіб очищення стічних вод полігонів твердих побутових відходів». Бюл.№20 від 26.10.2009.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2018

УДК 621.822.681.2:369.64

Т.Г. Джугурян¹, В.І. Марчук², І.В. Марчук², М.В. Олексин²Щецінська морська академія (Польща)¹Луцький національний технічний університет²**ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ БЕЗЦЕНТРОВОГО ШЛІФУВАННЯ ПЕРЕРИВЧАСТИМИ КРУГАМИ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ**

Було встановлено баланс тепла, яке переходить в стружку та в заготовку, як важливої передумови для технологічного керування температурою в зоні шліфування. Запропоновано використання прогресивного, переривчастого, шліфувального інструмента (кругів) на операціях чорнового та напівчистового шліфування базових поверхонь зовнішніх кілець після термічного оброблення внаслідок чого, покращились умови тепло- та стружковідведення від зони різання, що, в свою чергу, дозволило підвищити точність і якість шліфованих поверхонь, знизити температуру різання, запобігти виникненню температурних дефектів, збільшити технологічну продуктивність шліфувальних операцій. Проведена кількісна оцінка впливу глибини шліфування та швидкості деталі на основні параметри теплового процесу під час безцентрального шліфування зовнішніх поверхонь обертання кілець роликотішинників.

Ключеві слова: температура, тепло, безцентрове шліфування, переривчастий круг.

Т.Г. Джугурян¹, В.И. Марчук², И.В. Марчук², М.В. Олексин²Щецинская морская академия (Польша)¹Луцкий национальный технический университет²**К ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТЫМИ КРУГАМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

Было установлено баланс тепла, которое переходит в стружку и в заготовку, как важной предпосылки для технологического управления температурой в зоне шлифования. Предложено использование прогрессивного, прерывистого, шлифовального инструмента (кругов) на операциях чернового и получистового шлифовки базовых поверхностей наружных колец после термической обработки, в результате чего улучшились условия тепло- и стружко отвода от зоны резания, что, в свою очередь, позволило повысить точность и качество шлифованных поверхностей, снизить температуру резания, предотвратить возникновение температурных дефектов, увеличить технологическую производительность шлифовальных операций. Проведена количественная оценка влияния глубины шлифования и скорости детали на основные параметры теплового процесса при бесцентрового шлифования наружных поверхностей вращения колец роликотішинников.

Ключевые слова: температура, тепло, шлифовка, прерывистый круг.

T. Dzhuguryan¹, V. Marchuk², I. Marchuk², M. Oleksin²Schetsen Maritime Academy (Poland)¹Lutsk National Technical University²**TO DETERMINATION OF THE TEMPERATURE OFF CENTERLESS GRINDING BY INTERMITTENT CIRCLES OF THE SURFACES ROTATION**

A balance of heat was introduced, which goes into shaving and billets, as an important prerequisite for technological control of temperature in the grinding area. The use of a progressive, intermittent, grinding tool (circles) on the roughing and semi-grinding operations of the base surfaces of the outer rings after heat treatment was proposed, resulting in improved heat and shaving conditions from the cutting zone, which in turn allowed to improve the accuracy and quality of the grinding surfaces, reduce the temperature of cutting, prevent the occurrence of temperature defects, increase the technological efficiency of grinding operations. The quantitative estimation of the influence of grinding depth and component speed on the main parameters of the heat process during centrifugal grinding of the outer surfaces of rotation of the roller bearings is carried out.

Keywords: temperature, warmly, polishing, intermittent circle.

Враховуючи складний характер зв'язку приведенного показника температури ω з глибиною шліфування t та швидкістю деталі V_d , виконаємо відповідно до залежності

$$\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t = \frac{\lambda \cdot \omega}{c \cdot \rho \cdot l_2} \sqrt{\frac{2 \cdot R_{kp} \cdot \omega}{l_2 \cdot \bar{l}_1}}$$

кількісну оцінку впливу глибини шліфування t на основні параметри теплового процесу [1, 2].

Під час розрахунку використовуємо вихідні дані: $c=175,9$ Дж/(кг⁰С); $\rho = 15 \cdot 10^3$ кг /м³; $\lambda = 50$ Вт/(м⁰С); $2R_{kp}=0,25$ м; $V_d=600$ мм/хв.

В табл. 1. наведені значення безрозмірної величини \bar{l}_1 , розраховані згідно залежності:

$$\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t = \frac{\lambda \cdot \omega}{c \cdot \rho \cdot l_2} \sqrt{\frac{2 \cdot R_{кр} \cdot \omega}{l_2 \cdot \bar{l}_1}} \quad (1)$$

і значення приведенного показника температури ω , розрахованого згідно до залежності:
 $\bar{l}_1 = -\ln(1 - \omega) - \omega$.

Таблиця 1.

Розрахункові значення параметрів $\bar{l}_1; \omega; l_2; l_1 = t; l_2/l_1; Q_1/Q; Q_2/Q; Q_2/Q_1$

$t \cdot 10^{-3}, \text{м}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
\bar{l}_1	0,0042	0,012	0,022	0,034	0,047
ω	0,09	0,15	0,19	0,24	0,27
$l_2 \cdot 10^{-3}, \text{м}$	0,426	0,5	0,52	0,57	0,57
$l_1 \cdot 10^{-3}, \text{м}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
l_2/l_1	21,3	12,5	8,7	7,1	5,7
Q_1/Q	0,05	0,1	0,13	0,17	0,19
Q_2/Q	0,95	0,9	0,87	0,83	0,81
Q_2/Q_1	19	9	6,7	4,9	4,3

Як видно з табл. 1., зі збільшенням глибини шліфування t безрозмірна величина \bar{l}_1 і приведений показник температури ω збільшуються. Відповідно будуть збільшуватися й абсолютні значення температури шліфування θ , що визначається залежністю:

$$\theta = \left(\frac{\sigma}{c \cdot \rho} \right) \cdot \omega \quad (2)$$

В табл. 1 наведені значення довжини l_2 , розраховані згідно залежності:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \omega}{c \cdot \rho \cdot V_{пиз}} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot V_{пиз}} \cdot \bar{l}_1 \quad (3)$$

З урахуванням встановлених за залежністю значень:

$$V_{пиз} = \frac{Q_{num}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}} = V_D \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}} \text{ швидкості переміщення теплового потоку } V_{пиз}. \text{ Справедливим}$$

буде висновок, що довжина l_1 зі збільшенням глибини шліфування t збільшується і приймає значення, яке суттєво перевищує $l_1=t$, однак слід відмітити, що інтенсивність збільшення довжини l_2 зі збільшенням глибини шліфування t незначна. Отже зі збільшенням глибини шліфування t в 5 раз (з 40 до 200 мкм) довжина l_2 збільшилась тільки в 1,34 рази. Це важливий результат, який вказує на те, що за рахунок зменшення глибини шліфування t складно досягнути зменшення довжини l_2 .

В табл. 2 для порівняння наведені розрахункові значення основних параметрів теплового процесу під час шліфування для різних значень швидкості деталі V_D , тут глибина шліфування прийнята постійною і дорівнює $t=0,002 \cdot 10^{-3}$ м та $l_1=t=0,002 \cdot 10^{-3}$ відповідно.

Таблиця 2

Розрахункові значення параметрів $\bar{l}_1; \omega; l_2; l_1 = t; l_2/l_1; Q_1/Q; Q_2/Q; Q_2/Q_1$

$V_D, \text{м/хв}$	30	60	90	120	150
\bar{l}_1	0,0042	0,0084	0,0126	0,0168	0,021
ω	0,09	0,125	0,15	0,17	0,185
$l_2 \cdot 10^{-3}, \text{м}$	0,426	0,3	0,24	0,2	0,175
l_2/l_1	21,3	15	12	10	8,75
Q_1/Q	0,05	0,09	0,1	0,12	0,13
Q_2/Q_1	0,95	0,91	0,9	0,88	0,87
Q_2/Q_1	19	1,01	9	7,3	6,7

Знаючи приведений показник температури ω , визначений за допомогою $\frac{Q_1}{Q} = 1 - \frac{\omega^2}{2 \cdot l_1}$;

$\frac{Q_2}{Q} = 1 - \frac{\omega^2}{2 \cdot l_1}$, можна визначити значення кількості тепла Q_1/Q і Q_2/Q , яке йде в утворену стружку

та в поверхневий шар заготовки кільця відповідно. В табл. 1. наведені розрахункові значення Q_1/Q ; Q_2/Q ; Q_1/Q і Q_2/Q_1 . Зі збільшенням глибини шліфування t кількість тепла Q_1/Q , що йде в утворену стружку, збільшується, а кількість тепла Q_2/Q , що йде в заготовку кільця, зменшується. Причому, кількість тепла, яке йде в заготовку, суттєво перевищує кількість тепла, що йде в утворену стружку[3, 4].

Відношення Q_2/Q_1 зі збільшенням глибини шліфування t зменшується, однак за такої умови приймає більші значення. Цим, можна пояснити, чому довжина l_2 значно більша довжини $l_1 = t$. На рис. 1 та рис. 2 графічно показано характер зміни параметрів, наведених в табл.1, зі зміною глибини шліфування t .

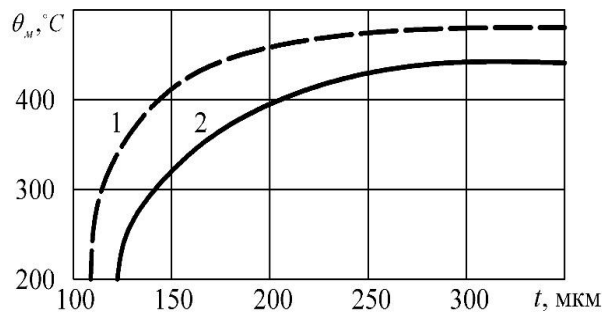


Рис. 1. Температурні залежності під час шліфування кільця із сталі ШХ15 на верстаті SASL5AD (1 – суцільним кругом; 2 – переривчатим кругом)

Як слідує з табл. 2, зі збільшенням швидкості деталі V_d безрозмірна величина \bar{l}_1 і приведений показник температури ω збільшуються, але з меншою інтенсивністю, ніж від збільшення глибини шліфування t (табл. 1).

Довжина адиабатичного сегмента l_2 в якому концентрується тепло, зменшується зі збільшенням швидкості деталі V_d . Як видно з табл. 1, зі збільшенням глибини шліфування t , довжина адиабатичного сегмента l_2 збільшується. Відповідно, за рахунок збільшення швидкості деталі V_d можна зменшити довжину l_2 , тобто товщину поверхневого шару обробленої деталі, в якому концентрується тепло і який є потенційним джерелом утворення температурних дефектів на обробленій поверхні[1, 2].

Як слідує з табл. 2, швидкість деталі V_d в порівнянні з глибиною шліфування t (табл. 1) значно менше впливає на зменшення кількості тепла Q_2/Q , що йде в заготовку. В даному випадку фактично все тепло, яке утворюється під час шліфування йде в заготовку.

На рис. 3. показано характер зміни параметрів, які наведені в табл. 2 зі зміною швидкості деталі V_d . Отже, збільшення V_d дозволяє, разом зі збільшенням температури шліфування (параметрів ω і θ), зменшувати товщину дефектного шару обробленої деталі l_2 .

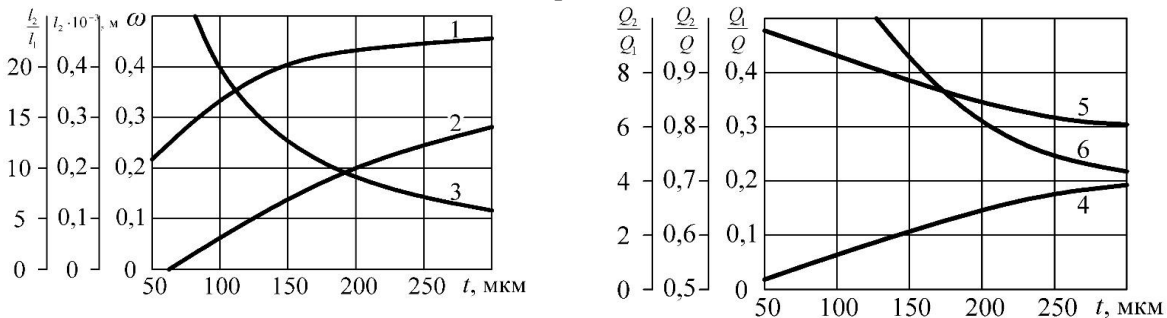


Рис. 2. Залежності параметрів $l_2(1)$; $\omega(2)$; $l_2/l_1(3)$; $Q_1/Q(4)$; $Q_2/Q(5)$; $Q_2/Q_1(6)$ від глибини шліфування t .

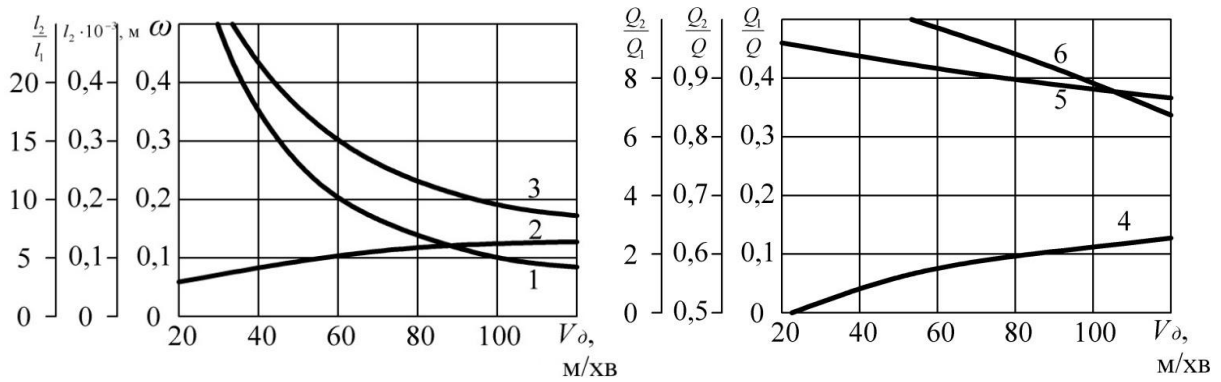
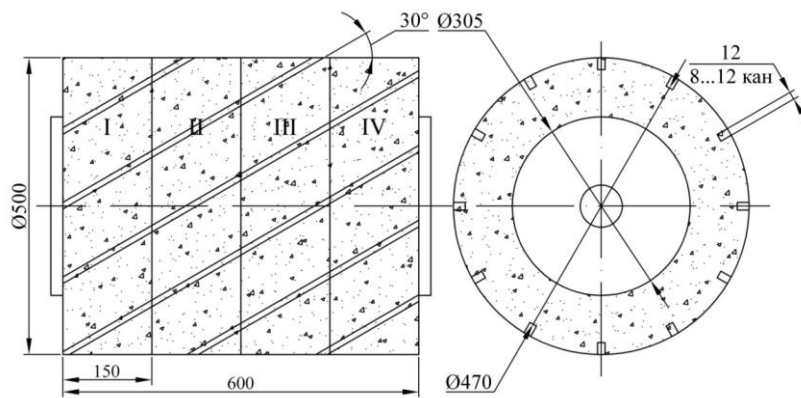


Рис. 3. Залежності параметрів $l_2(1)$; $\omega(2)$; $l_2/l_1(3)$; $Q_1/Q(4)$; $Q_2/Q(5)$; $Q_2/Q_1(6)$ від швидкості деталі V_d

На графіках показано, що збільшення V_d дозволяє, разом зі збільшенням температури шліфування (параметрів ω і Θ), зменшувати товщину дефектного шару деталей l_2 .



№ абразивного диска	Зернистість	
	Чорнове шліфування	Напівчистове шліфування
I	80	63
II	63	40
III	32	25
IV	25	25

Рис. 4. Збірний переривчастий шліфувальний круг з гвинтовими канавками для безцентрового шліфування поверхонь обертання



Рис.5. Робочий простір безцентрово-шліфувального верстата

Висновок. Встановлено, що збільшення кількості канавок шліфувального круга призводить до зменшення температури шліфування, за рахунок зменшення часу контактування ріжучих виступів круга з шліфованою поверхнею. Зростання ширини виступу шліфувального круга L_1 та зменшення ширини канавки зумовлює зростання ріжучої здатності шліфувального круга внаслідок збільшення числа активних зерен, які беруть участь в різанні, однак це призводить до зростання контактної температури шліфування. Зменшення відношення $\frac{L_1}{L_2}$ зумовлює протилежні процеси, однак зниження температури можна досягнути при різних співвідношеннях ширини різального виступу та ширини впадини.

Література

1. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов, Ю.А. Бояршинов и др. // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 76-78, 2. Марчук В.І. Класифікація та походження температурних дефектів на операціях безцентрового шліфування поверхонь обертання / В.І. Марчук, І.В. Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеві / Матеріали Шістнадцятої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї-наука-виробництво», м. Суми, 26-29 жовтня 2016 р. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – С. 102–103.
2. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке. – Физические и компьютерные технологии. – Труды 11-й Международной научно-технической конференции, 2-3 июня 2005 г.– Харьков: ХНПК «ФЭД», 2005. – С.137–146.
3. Марчук І.В. Керування температурою на безцентрово-шліфувальних операціях / І.В.Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеві // «Перспективні технології та прилади». Збірник наукових праць. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 133–138.
4. Джугурян Т.Г.Марчук І.В.Марчук В.І. Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь обертання в підшипниковому виробництві/ «Перспективні технології та прилади». Збірник наукових праць. – Луцьк: ЛНТУ, 2018/6. – Випуск №12(1). - С. 111-117.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2018

УДК 621.43

А.А. Дудніков, О.В. Горбенко, А.О. Келемеш, В.В. Дудник

Полтавська державна аграрна академія

**ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ
МАШИН**

Розглянуті методи підвищення ресурсу сільськогосподарських машин за рахунок зміцнення їх деталей електроконтактним приварюванням

Ключові слова: зношування, надійність, електроконтактне приварювання, мікротвердість, залишкові напруження

А.А. Дудников, А.В. Горбенко, А.А. Келемеш, В.В. Дудник

Полтавская государственная аграрная академия

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ МАШИН**

Рассмотрены методы повышения ресурса сельскохозяйственных машин за счет упрочнения их деталей электроконтактной приваркой.

Ключевые слова: изнашивание, надежность, электроконтактная приварка, микротвёрдость, остаточные напряжения.

A. Dudnikov, O. Gorbenko, A. Kelemesh, V. Dudnyk

Poltava State Agrarian Academy

TECHNOLOGICAL METHODS OF INCREASE OF OPERATING MACHINE RELIABILITY

The methods of increase of the resource of agricultural machines by means of strengthening of their parts by electrocontact welding are considered.

Keywords: wear, reliability, electrocontact welding, microhardness, residual stresses.

Постановка проблеми. Резервом підвищення ресурсу сільськогосподарських машин і агрегатів, економії матеріальних ресурсів є використання зміцнюючих технологій при відновленні деталей. Необхідність їх відновлення обумовлена можливістю їх використання, оскільки собівартість відновлення деталей нижча вартості нових.

Одним з напрямків підвищення довговічності відновлених деталей є використання в технологічних процесах присадочних матеріалів при електроконтактному приварюванні (стрічки, порошкових матеріалів). Дана технологія досить успішно використовується в машинобудуванні. В сільськогосподарському ремонтному виробництві вона застосовується поки що досить слабо в силу недостатнього вивчення даного технологічного процесу.

Тому, розробка основних технологічних параметрів вказаної технології при відновленні деталей ґрунтообробних машин є актуальною, що забезпечує високу якість і економічність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багатьма вченими [1, 2] встановлена головна причина втрати працездатності деталей – тертя, що викликає їх зношування і, в результаті, відказ.

Головним завданням технології відновлення і зміцнення деталей машин і агрегатів є створення поверхонь з потрібними триботехнічними характеристиками: структура матеріалу в процесі тертя не повинна значно змінюватися; поверхневий шар не повинен в процесі тертя наклепуватися; в умовах абразивної ерозії співвідношення матеріалу і абразиву повинно бути не менше 1...1,2 [3].

Знос леза культиваторної лапи за думкою [4] залежить від вологості ґрунту, зі зменшенням якої верхня границя ріжучої кромки зношується активніше. Автор відмічає, що при високій вологості (20...28%) ваговий знос робочого органу значно знижується, оскільки ґрунт стає більш рихлим.

Основні види зносу стрічастих культиваторних лап (затуплення леза, знос носка по довжині, утворення затилочної фаски, зношування лапи по ширині та товщині) погіршують підрізання рослин, підвищують тяговий опір, зменшують глибину обробки [5].

Слід відмітити, недостатній об'єм представлених досліджень в літературі по розробці ресурсозберезувальних технологій відновлення деталей [6].

Постановка завдань. Метою дослідження є розробка технологічного процесу зміцнення та відновлення культиваторних лап методом приварювання зносостійких матеріалів, його зв'язок з режимними параметрами та фізико-механічними властивостями приварюваного матеріалу.

Викладення основного матеріалу. Головним фактором зниження довговічності робочих органів ґрунтообробних машин є руйнування металевих поверхонь деталей в результаті дії твердих ґрунтових частинок.

Багато деталей сільськогосподарських машин безпосередньо пов'язані при виконанні агротехнічних операцій з матеріалами, що призводять до абразивного зношування, при якому в результаті високої концентрації контактних напружень відбувається інтенсивне руйнування поверхневого шару.

Ми вважаємо, що інтенсивність зношування залежить не тільки від твердості матеріалу деталі, фізико-механічних властивостей ґрунтів, режимів (умов) роботи, але і від структури матеріалу деталі. Потрібно відмітити, що довговічність робочих органів ґрунтообробних машин залишається досить низькою (табл. 1).

Таблиця 1.

Основні конструктивні характеристики ріжучих елементів

Найменування деталі	Гранична товщина леза, мм	Товщина деталі, мм	Кут загострення леза, градус	Наробіток на одну деталь, га	Застосування
1. Культиваторна лапа	0,8	4,5	25	0,5...1	При обробці твердих ґрунтів
2. Плужний леміш	3	7	35	1...2	При обробці твердих ґрунтів

Аналіз табличних даних показує, що через низьку зносостійкість леза потрібно виконувати часту заміну або відновлення.

Підвищити наробіток леза можливо за рахунок зменшення товщини ріжучого шару або надання лезу пилоподібної форми.

При першому способі підвищується крихкість, що викликає викришування матеріалу.

Пилоподібне лезо може бути досягнуте у випадку, якщо на ньому зносостійкий шар буде не суцільним, а у вигляді смуг з відповідним кроком. Однак, технологічно таке лезо отримати досить складно.

Для довговічної роботи леза потрібно виконати наступну умову:

$$t = \frac{d}{\cos \gamma}, \quad (1)$$

де t – крок між центрами зерен; γ – кут між твірною леза і лінією, що перпендикулярна до напрямку руху; d – діаметр зерна.

Основні вимоги для лез лап культиваторів по агротехнічним вимогам – підрізання рослин, а не обволочування ними.

Розмір d може бути визначений по залежності:

$$d \leq D \frac{\sin(\gamma - \varphi)}{\cos \gamma - \sin(\gamma - \varphi)}, \quad (2)$$

де D – діаметр рослини; φ – кут тертя.

Залежність співвідношення d/D від кута тертя φ для різних кутів γ культиваторних лап може бути записана:

$$\frac{d}{D} = \frac{\sin(\gamma - \varphi)}{\cos \gamma - \sin(\gamma - \varphi)}. \quad (3)$$

Аналіз даної залежності показує, що при $\varphi = 48...49^\circ$ величина d/D повинна знаходитися в межах $0,06...0,14$ при $\gamma = 50...54^\circ$.

Отриманий розмір d із рівняння (2) забезпечує сходження рослин з робочого органу.

Одним із шляхів підвищення міцності зчеплення покриттів електроконтактним приварюванням (ЕКП) є оптимізація щільності струму в зоні контакту (табл. 2).

Таблиця 2.

Діаметр деталі, мм	Технологічні фактори		
	Величина струму, кА	Тривалість імпульсу зварювання, с	Тиск на ролики-електроди, кН
40...50	5,9...6,4	0,04...0,06	1,5...1,7

Оптимальні режими ЕКП визначались по критерію міцності зчеплення.

Вимірювання твердості покриття виконувались після контактного приварювання стрічки товщиною 0,7 мм із корозійної сталі 12Х13. За допомогою комп'ютерних програм визначалися статистичні характеристики твердості: середнє значення твердості \overline{HV} , дисперсія σ^2 , середнє квадратичне відхилення σ (табл. 3).

Таблиця 3.

Марка сталі	Твердість, HV		Статистичні характеристики твердості	
	до приварювання	після приварювання		
	HV	HV	σ^2	σ
12Х13	120...181	400	133,9	12,2

Зміна глибини і твердості термозміцненої зони при ЕКП показано на рис. 1.

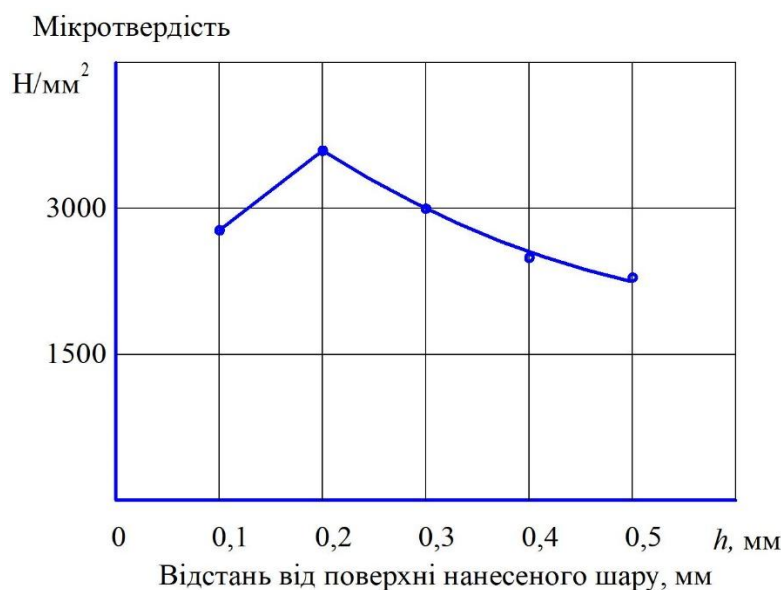


Рис.1. Середнє значення мікротвердості по глибині привареної стрічки зі сталі 12Х13

Отримані дані дозволяють констатувати, що вибором відповідної марки стрічки можна забезпечити необхідну твердість робочих поверхонь деталей, відновлених ЕКП.

Проведений мікроструктурний аналіз привареного шару показує, що в верхній своїй частині він складається із зерен більшого розміру, ніж в середній зоні і поблизу зони сплавлення з основою, що можна пояснити різним впливом термомеханічної дії на стрічку при ЕКП.

Розподіл елементів в привареному шарі на культиваторній лапі свідчить, що зміцнений елемент зберігається в тому ж об'ємі, що і в новій лапі.

Проведений аналіз розподілу залишкових напружень показав високу навантаженість поверхневого шару покриття.

Залишкові напруження в поверхневому шарі покриття зі сталі 12Х13 одного знаку, розтягуючі, по величині близькі до границі текучості металу покриття. В центральній частині покриття виділяється розвантажена до рівня 0...0,25 від границі текучості ділянка покриття. В крайніх ділянках покриття залишкові напруження досягають 0,5...0,6 від границі текучості металу покриття. На вільному краї зразка в поверхневому шарі покриття вони знижуються до нуля.

В процесі ЕКП в поверхневому шарі виникає нерівномірне по напрямку нормалі до поверхні температурне поле. Найбільша температура спостерігається в області контакту основного металу і привареного покриття.

При електроконтактному приварюванні в поверхневому шарі деталі з'являються пластичні деформації стиснення, при охолодженні якого в ньому виникають розтягуючі залишкові напруження.

Висновки. В статті обґрунтований вибір порошкової композиції і схеми технологічного процесу електроконтактного приварювання для відновлення деталей, представлений розрахунок визначення основних параметрів технологічного процесу. Встановлено, що твердість і мікротвердість покриття матеріалів ЕКП змінюється в процесі приварювання як по глибині, так і вздовж поверхні покриття. Показано зміну залишкових напружень в поверхневому шарі покриття.

Список використаних джерел:

1. Ермолов Л.С., Кряжков В.М., Черкун В.Е. Основы надежности техники. М. : Колос, 1982. 271 с.
2. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. М. : Машиностроение, 1989. 480 с.
3. Кулу П. Износостойкость порошковых материалов и покрытий. Таллин : ВАЛГУС, 1988. 120 с.
4. Ткачев В.Н. Износ и повышения долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М. : Машиностроение, 1981. 264 с.
5. Гудзь В.П., Лісовон А.П., Андрієнко В.О., Рибак М.Ф. Землеробство з основами ґрунтознавства і агрохімії. К. : Центр навчальної літератури, 2007. 408 с.
6. Юнусбаев М.Н. Восстановление автотракторных деталей ЭКП порошковых материалов в магнитном поле. Уфа : 2006. 140 с.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2018

УДК 542.85; 665.765; 535.372

Н.М. Защепкіна, В.В. Таранов, О.А. Наконечний

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**КОНТРОЛЬ ІНФОРМАТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ МОТОРНИХ ОЛИВ ЗАСОБАМИ І
МЕТОДАМИ ЛЮМІНЕСЦЕНТНОЇ СПЕКТРОМЕТРІЇ**

Метою роботи є огляд можливості застосування люмінесцентних методів в експрес методиці сортового аналізу моторних олиव та наявності в них сторонніх включень різної хімічної будови в дисперсній фазі. В процесі досліджень було розроблено макет вимірювального засобу придатного до вимірювання квантового виходу люмінесценції флуоресціюючої речовини (за фотострумом та вихідною напругою) в полярних та неполярних розчинниках. В процесі вимірювань були отримані відгуки квантового виходу люмінесценції досліджуваних зразків чистих моторних олив, що показали істотні відмінності їх спектральних характеристик відповідно кількісному та якісному складу зразків.

Ключові слова: люмінесцентний метод, флуоресценція, моторні оливи, вимірювання спектру, монохроматор, фотодіодний детектор, аналоговий сигнал, УФ-світлодіод, продукти зносу, динамічний діапазон.

Н.Н. Защепкина, В.В. Таранов, О.А. Наконечный**КОНТРОЛЬ ИНФОРМАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОТОРНЫХ МАСЕЛ
СРЕДСТВАМИ И МЕТОДАМИ СПЕКТРОМЕТРИИ**

Целью работы является обзор возможности применения люминесцентных методов в экспресс методике сортового анализа моторных масел и наличия в них посторонних включений разного химического строения в дисперсной фазе. В процессе исследований был разработан макет измерительного средства пригодного к измерению квантового выхода люминесценции флуоресцирующего вещества (по фототоку и выходному напряжению) в полярных и неполярных растворителях. В процессе измерений были получены отклики квантового выхода люминесценции исследуемых образцов чистых моторных масел, показано существенные различия их спектральных характеристик в соответствии количественном и качественном составе образцов.

Ключевые слова: люминесцентный метод, флуоресценция, моторные масла, измерения спектра, монохроматор, фотодиодный детектор, аналоговый сигнал, УФ-светодиод, продукты износа, динамический диапазон.

N.M. Zashchepkina, V.V. Taranov, O.A. Nakonechnyi**CONTROL OF INFORMATIONAL PARAMETERS OF MOTOR OILS
BY MEANS AND METHODS OF SPECTROMETRY**

The aim of the work is to review the possibility of using luminescent methods in the express method of varietal analysis of motor oils and the presence of foreign substances of different chemical structures in the disperse phase. In the course of research, a model of a measuring instrument suitable for measuring the quantum yield of a fluorescent substance luminescence (photocurrent and output voltage) in polar and nonpolar solvents was developed. In the course of measurements, quantum yields of luminescence of the studied samples of pure motor oils were obtained, which showed significant differences in their spectral characteristics in accordance with the quantitative and qualitative composition of the samples. Monitoring of informative parameters of motor oils by luminescent methods can be used to provide identification procedures ("authenticity tests") - definition of the varietal and species characteristics of the sample.

Keywords: luminescent method, fluorescence, motor oils, spectrum measurements, monochromator, photodiode detector, analog signal, UV-LED, wear products, dynamic range.

Постановка проблеми. В процесі експлуатації автотранспортного засобу із двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) з'являється необхідність контролю робочих параметрів ДВЗ та забезпечення його якісної та надійної роботи у всьому діапазоні експлуатаційних режимів. Однією із головних вимог забезпечення стабільності роботи ДВЗ є дотримання температурного режиму та динамічних навантажень на його рухомі елементи, чому слугує широка номенклатура мастильних матеріалів різного хімічного складу і технологічного призначення. При роботі ДВЗ змінюються якісні та кількісні показники моторних масел. Якісні зміни зумовлені фізичними і хімічними процесами, що протікають в двигуні (старіння оливи). Кількісні зміни полягають у зменшенні робочого запасу оливи в маслосистемі (згоряння оливи) і накопичення в ній продуктів зносу [2].

Моторна олива складається з основи (базової оливи) і присадок. Властивості оливи визначаються насамперед хімічним складом основи, присадки ж призначені для коригування та поліпшення цих характеристик. Основи оливи бувають мінеральні (тобто отримані шляхом очищення відповідної фракції нафти) і синтетичні (тобто отриманим шляхом каталітичного синтезу з газів). Комбінація мінеральних і синтетичних основ, за умови не менше 25% синтетичної базової оливи, називається напівсинтетичній базою. За допомогою присадок можна значно підвищити експлуатаційні властивості моторних масел, навіть виготовлених з не найкращих

базових масел. Але при тривалій експлуатації, і особливо при високих навантаженнях присадки руйнуються, тому кінцева якість моторної оливи, яка працювала в двигуні більше половини паспортного терміну, визначається властивостями базової оливи.

В процесі старіння оливи спостерігається зміна концентрації її складових, їх будови та ефективності, в результаті розкладу, взаємодії з продуктами згоряння палива і окислення оливи та металевими деталями ДВЗ. Старіння оливи відбувається внаслідок двох основних причин: внутрішніх – обумовлюються зменшенням стабільності оливи (випаровування, окислення, розкладання, полімеризація та ін.) і зовнішніх – обумовлюються забрудненням оливи механічними домішками, водою і паливом [15].

В результаті старіння базової оливи зростають її в'язкість та кислотність, частково компенсовані розрідженням паливом і адсорбцією кислих органічних сполук та утворенням високомолекулярних з'єднань, із подальшою осадкою утворених конгломератів в масляних фільтрах та появою зольних фракцій (сажі з продуктами зносу металевих частин ДВЗ) на його рухомих частинах.

Представлені на ринку синтетичні, мінеральні та змішані моторні оливи досить істотно відрізняються за кількісним та якісним складом (в'язкість, кислотне та лужне число, фракційність, вміст присадок та ін.) та придатністю до використання в конкретних моделях ДВЗ. Тому є необхідність проводити перевірку мастильних матеріалів на справжність (відповідність кількісного та якісного складу моторної оливи паспортним даним), а також їх придатність до подальшої роботи вже в процесі поточних експлуатаційних перевірок ДВЗ згідно регламенту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі на даний момент методи перевірки експлуатаційних властивостей моторних олив можна поділити на такі, що визначають їх окремі характеристики, а саме: забрудненість механічними домішками, в'язкість, діелектрична проникність, лужне число, мийно-диспергуюче-стабілізуючі властивості, вміст води, кислотне число, питома щільність, оптична щільність, температура спалаху, тощо [6].

Визначальними показниками якості моторних олив, що застосовуються в сучасних дизельних та бензинових ДВЗ, що підлягають кількісній та якісній зміні в процесі експлуатації є наступні:

1. *Кінематична в'язкість.* Характеризує приналежність сезонних олив до того чи іншого класу в'язкості. Визначається при 100°C і невисоких швидкостях зсуву (від 20 до 100 с⁻¹). Показник в'язкості збільшується в результаті випаровування легких фракцій оливи, накопичення продуктів неповного згоряння палива у вигляді сажі і появи продуктів окислення. В'язкість зменшується при попаданні палива в оливу, а також в результаті руйнування полімерних присадок в загущених оливах.

2. *Вміст нерозчинного осаду.* Кількість осаду визначає інтенсивність надходження в оливу продуктів неповного згоряння палива, частинок зносу, пилу, спрацьовування присадок.

3. *Вміст продуктів зносу.* Для визначення часток зносу застосовують методи нейтральної активації, спектрального аналізу, радіоактивних ізотопів [1].

В'язкісно-температурні властивості є основними що забезпечують експлуатаційний режим роботи ДВЗ і його мінімальний знос при виході на робочий режим. Причому, в'язкість оливи при прогріванні двигуна, наприклад, від температури -20°C до 100°C може змінюватися більш, ніж в 1000 разів, для всесезонних олив по класифікації SAE. Специфікація SAE (SAE - Society of Automobile Engineers) - Асоціація Автомобільних Інженерів) є міжнародним стандартом, що регламентує в'язкість олив. Вона підрозділяє моторні оливи на шість зимових – 0W, 5W, 10W, 15W, 20W і 25W (буква W-winter вказує на те, що це зимові оливи) і п'ять літніх класів в'язкості (20, 30, 40, 50 і 60) [8]. Всесезонні оливи позначаються здвоєним номером, перший з яких вказує на мінімальні значення динамічної в'язкості оливи при негативних температурах і гарантує пускові властивості, а другий - визначає характерний для відповідного класу в'язкості універсальної оливи діапазон кінематичної в'язкості при 100°C і динамічної в'язкості при 150°C [6,8]. Але в той же час потрібно пам'ятати, що ні про якісні характеристики олив, ні про їх застосування для конкретних марок автомобілів і типів двигунів специфікація SAE нічого не рекомендує.

Із перерахованих вище методів визначення кількісних та якісних характеристик моторних олив можна виділити методи визначення оптичних характеристик досліджуваних зразків, що потребують мінімальної пробопідготовки, та можуть відповідати методиці експрес-діагностики. Контроль інформативних параметрів моторних олив, заснований на відбивній, пропускній спектрометрії та аналізі спектрів люмінесценції, можна застосовувати для визначення сортових

якостей зразків моторних оливо, та у випадку емісійної спектрометрії можна судити про їх якісний та кількісний склад, та наявність сторонніх включень (сірка, фосфор, хлор, метали, зольні фракції та ін.).

В той же час, наявні оптичні методи та засоби точного якісного аналізу моторних оливо, а саме – оптико-емісійна та рентгено-флуорисцентна спектрометрія, потребують металоємкого обладнання високої вартості, та не можуть в повній мірі відповідати вимогам експрес-діагностики при визначенні основних характеристик моторних оливо, до яких можна віднести сортові якості базових оливо та наявність в них сторонніх включень (без поелементного аналізу) в процесі експлуатації. Люмінесцентні методи аналізу, в яких довжина хвилі збуджуючого випромінювання лежить в межах 315-400 нм (що відповідає ближньому УФ-діпазону), дозволяють проводити як сортовий аналіз зразків моторних оливо так і попередній аналіз вмісту зольних фракцій, зависей (металів, сірчаних конгломератів), крапель води, паливно-мастильних матеріалів (іншої оптичної щільності) та повітря що являють собою дисперсійну фазу, та в повній мірі відповідають вимогам експрес-метрії. Застосовуючи дані методи можна проводити швидкий і малозатратний попередній аналіз оптичних показників моторних оливо як нових, так і бувших в роботі. Враховуючи марку двигуна, переважаючий режим роботи та пробіг транспортного засобу, можна судити про наявні експлуатаційні властивості досліджуваних зразків моторних оливо та можливість їх подальшого застосування в транспортному засобі.

Постановка завдань. Метою роботи було розглянути можливість застосування люмінесцентних методів в експрес методиці сортового аналізу моторних оливо та наявності в них сторонніх включень різної хімічної будови в дисперсійній фазі.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено наступні задачі:

– огляд та характеристика існуючих в даний час хімічних, фізичних та фізико-хімічних методів діагностики інформативних параметрів моторних оливо, визначення їх переваг та недоліків;

– проведено вибір методів та засобів аналізу моторних оливо, що мають найкращі показники по відношенню затрати/отриманий результат, та відповідають вимогам експрес діагностики, із забезпеченням достатньої чутливості, селективності та точності вимірів;

– розробка вимірювального засобу придатного до застосування в люмінесцентній флуориметрії моторних оливо та методики проведення вимірювань.

Викладення основного матеріалу. Основною оптичною характеристикою в люмінесцентних методах аналізу є спектри люмінесценції та збудження, а також інтенсивність люмінесценції. У загальному випадку, люмінесценцією називається світіння атомів, молекул, іонів та інших більш складних комплексів, що виникає в результаті електронного переходу в цих частинках при їх поверненні із збудженого стану – в стабільний [7]

Люмінесцентні методи підрозділяють на дві групи:

1) засновані на спостереженні власної люмінесценції аналізованої речовини під час дії збуджуючого УФ-випромінювання (сортовий аналіз);

2) засновані на спостереженні виникнення або гасіння люмінесценції у результаті взаємодії аналізованої речовини з реагентами (хімічний флуоресцентний аналіз).

Між обома групами аналізу – сортовим і хімічним - немає різкого розмежування, так як хімічний флуоресцентний аналіз при використанні його як експрес-методу в значній мірі переходить в сортовий і навпаки [13].

Якщо люмінесценція виникає внаслідок дії УФ-випромінювання з потужністю I_0 , то, згідно правила Вавілова та з закону Стокса, кількість поглиненої світлової енергії дорівнюватиме $I_0 \cdot (1-T)$, де T – пропускання розчину. Із загальної кількості поглинених фотонів частина, рівна квантовому виходу флуоресценції η , висвітлиться зразком в різних напрямках і в усій спектральній області люмінесценції. З цього загального світлового потоку за допомогою світлофільтрів або монохроматора можна виділити і сфокусувати на приймач світла світловий потік, який буде зареєстрований у вигляді фотоструму $I_{\text{люм}}$. Таким чином, інтенсивність люмінесценції $I_{\text{люм}}$ пропорційна інтенсивності збуджуючого світла I_0 , квантовому виходу люмінесценції η , коефіцієнту поглинання світла $(1 - T)$ [4,10]:

$$I_{\text{люм}} = K \cdot I_0 \cdot (1-T) \cdot \eta \quad (1)$$

Так як частина збереженої при поглинанні світла енергії переходить в тепло, то енергія кванта люмінесценції завжди буде менше енергії поглиненого кванта. Вона буде менше на величину розраченої в тепло енергії $E_{\text{тепл.}}$.

$$h\nu_{\text{люм.}} = h\nu_{\text{погл.}} - E_{\text{тепл.}} \quad (2)$$

де $\nu_{\text{люм.}}$ – частота світла, що випромінюється при люмінесценції.

Отже, світло що випромінюється, матиме меншу частоту і більшу довжину хвилі, ніж поглинене світло. Ця залежність носить назву закону Стокса: довжина хвилі, світла, що випускається при люмінесценції, завжди більше довжини хвилі світла, який її викликав:

$$\lambda_{\text{люм.}} > \lambda_{\text{погл.}} \quad (3)$$

Інтенсивність люмінесценції оцінюється за допомогою квантового виходу. Під квантовим виходом люмінесценції φ розуміється відношення кількості квантів люмінесценції n – до кількості отриманих квантів N [4,5]:

$$\varphi = n/N. \quad (4)$$

В процесі досліджень було розроблено макет вимірювального засобу придатного до вимірювання квантового виходу люмінесценції $I_{\text{люм}}$ флуоресцюючої речовини (за фотострумом та вихідною напругою) в полярних та неполярних розчинниках за схемою зображеною на рис.1. Таке рішення дозволяє використовувати у якості джерела збуджуючого випромінювання (C) випромінювачі з безперервним або лінійчатим спектром випромінювання. При використанні джерела світла з безперервним спектром, наприклад УФ-світлодіоди, довжини хвилі збудження задається диспергуючим елементом $M1$, а дисперсор $M2$ формує довжини хвиль в необхідному діапазоні вимірювання спектру люмінесценції. При вимірюванні спектру збудження, навпаки, довжини хвилі випромінювання фіксується дисперсором $M2$, тоді як довжини хвиль збудження скануються в необхідному діапазоні за допомогою диспергуючого елементу $M1$. Очевидно, що при використанні в якості джерела збудження джерела світла з лінійчатим спектром, наприклад, азотного лазера, реєстрація спектру збудження неможлива. Подібну конструкцію в тому чи іншому вигляді має більшість промислових вимірювальних комплексів здатних до реєстрації спектрів поглинання та виходу люмінесценції досліджуваних зразків.

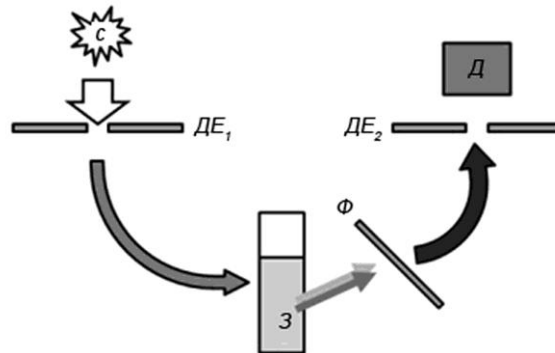


Рис. 1. Схема установки для вимірювання люмінесценції: C – джерело збуджуючого світла (наприклад, ксенонова лампа або УФ-світлодіод), DE_1 і DE_2 – диспергуючі елементи, Z – зразок, Φ – фільтр, D – детектор [3].

Реєстрацію спектрів люмінесценції досліджуваних зразків доцільно проводити, маючи в своєму розпорядженні випромінювач і детектор під кутом, щоб уникнути попадання непоглиненої частки збуджуючого випромінювання на детектор. Отримані в результаті спектри люмінесценції будуть за формою дзеркально симетричні довгохвильовій смузі спектра поглинання, якщо вони побудовані в шкалі частот (енергій), згідно правила Левшина. Для прикладу можна навести спектри поглинання і флуоресценції похідних антрацену (в рідкій фазі), що є сировиною для виготовлення синтетичного бензину (рис. 2а) [16]. Схематично, процеси що відбуваються при поглинанні, перетворенні та випромінюванні електромагнітного випромінювання можна зобразити відповідно до діаграми Яблонського (рис. 2б), Тут, різні стани з наборами відповідних їм коливальних рівнів: S_0 , S_1 , S_2 – електронні стани з однаковою мультиплетністю; T_1 – триплетний електронний стан [9,12].

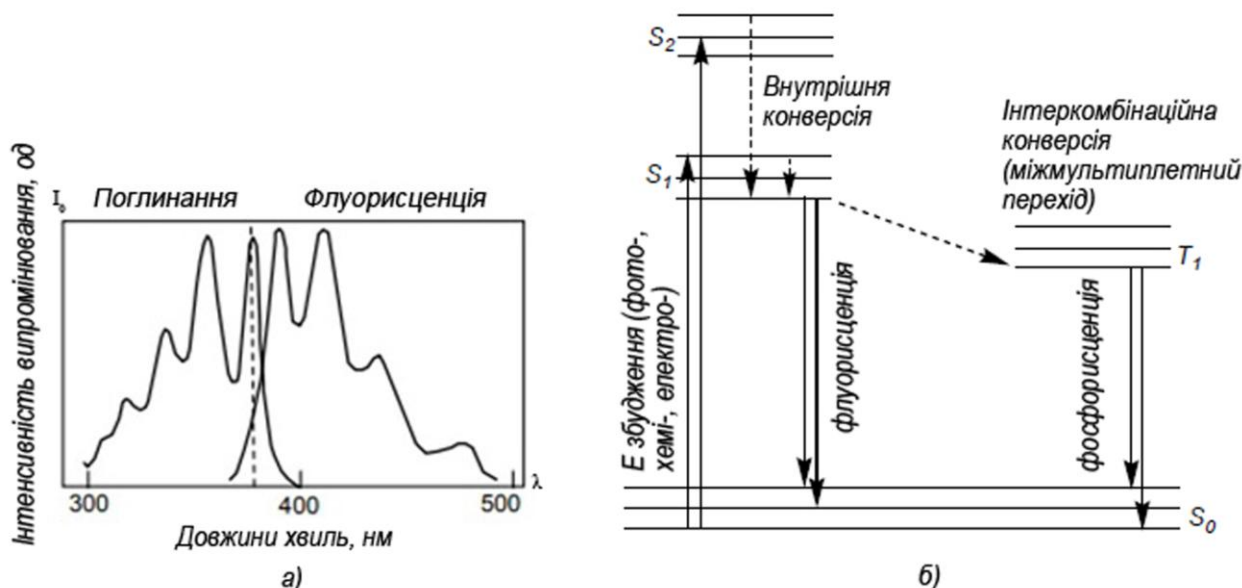


Рис. 1. Характеристичні спектри поглинання і флуоресценції рідких похідних антрацену.
Зліва: спектри; праворуч – електронні рівні і переходи [9,16].

При виборі конструктивних рішень макету ми застосували пару світлодіодів у спектральному діапазоні 365 нм та систему комплементарних обрізуючих світлофільтрів на турелі у якості диспергуючих елементів. В експериментальному пристрої використано світлодіодні випромінювачі (UVH365) фірми «Liteon Optoelectronics» з робочою вихідною потужністю 400 мВт в області 60 градусів, оптична формуюча система – короткофокусний об'єктив, кварцова кювет з оптичним ходом до 10 мм. Реєстрацію люмінесценції здійснювали за допомогою напівпровідникового малощумного фотоприймача TSL267 фірми «TAOS» із підключеним трансімпедантним операційним підсилювачем та подальшою обробкою отриманого сигналу вимірювальної інформації за допомогою блоку формування і обробки сигналу (БФОС) на базі плата розширення Arduino UNO R3 (мікроконтролер ATmega328).

Arduino UNO R3 (мікроконтролер ATmega328) використовує 10 розрядний АЦП, що відповідає 1024 градаціям вихідного коду. Роздільна здатність або точність АЦП з ідеальною передавальною характеристикою дорівнює $100\% / 1024 = 0,098\%$ [13].

Застосований в дослідженнях фотодіодний приймач TSL267 є монолітним фотодіодом із можливістю підключення трансімпедантного підсилювача на виході. В фотодіодному режимі фотодіод працює в режимі фотопровідності забезпечуючи добру лінійність характеристик і низьке значення темного струму. TSL267 працює з напругами від 2,4 В до 6 В і його темновий струм становить всього 100 нА. Діапазон напруг на виході фотодіодного детектору при включенні в фотодіодному режимі становить 1,2-2,8 В. Температурний діапазон роботи фотодіодного приймача становить від 0°C до 70°C. Схема аналогової частини вимірювального контуру застосованого в дослідженнях показана на рис. 3.

Комбінація фотодіода і підсилювача усуває високочастотні шуми, і дозволяє отримати покращення частотної характеристики внаслідок усунення паразитних ємностей. Вихідна напруга лінійно збільшується з інтенсивністю світла. Підсилювач призначений для роботи із одним або із двома джерелами живлення. У випадку застосування операційного підсилювача на виході фотодетектору, ми отримали напругу в межах 2,4-36 В. Отриманий діапазон напруг є достатнім для побудови калібрувальних графіків у випадку подальших вимірювань із застосуванням логометричного методу зрівняння різницевих напруг при використанні двох вимірювальних каналів («еталон» + «зразок») із включенням вимірювальних ланок що містять фотодетектори паралельно.

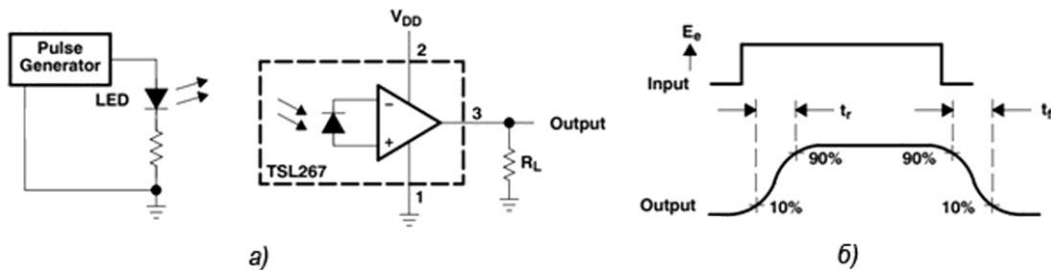


Рис. 3 Схема включення фотодіодного приймача TSL267 із трансімпедантним підсилювачем на виході: а) аналоговий вимірювальний контур; б) формування вимірювального сигналу.

Така схема вимірювань дозволяє калібрувати динамічний діапазон вимірювального засобу по відомим відносним концентраціям хімічних сполук здатних до люмінесценції в чистих розчинниках. Зняття результатів вимірювань можливе як в аналоговій формі, вимірюючи різницю потенціалів на виході операційного підсилювача (*Output*, рис.3а) до землі, так і з використанням АЦП на базі мікроконтролеру ATmega328, що дозволяє обробку та графічне відображення сигналу за допомогою комп'ютеризованих засобів (рис. 4,5,6).

Розроблений макет вимірювального засобу здатного до реєстрації квантового виходу люмінесценції досліджуваних зразків пропонується у вигляді окремих компактних герметичних модулів, має габаритні розміри 100x200x50 мм (ВШД) та є переносним. Програмне забезпечення приладу дозволяє проводити попередній аналіз інформативних параметрів зразків різної структури і хімічної природи в рідкій формі та відображати їх показники у графічній формі за допомогою комп'ютеризованих засобів. Також є функція збереження отриманих даних про певний дослідний зразок та умови проведення дослідів у власну базу даних, з подальшою можливістю обробки та аналізу інформації за допомогою сторонніх електронних обчислювальних засобів.

Для експериментальних робіт було обрано 5 оригінальних зразків універсальних моторних олів зарубіжних виробників. Всі зразки чистих моторних олів були придбані в фірмових магазинах виробників, що підтверджено сертифікатом якості. Перелік моторних олів, та їх порівняльну характеристику наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Порівняльна характеристика універсальних моторних олів

Марка моторної оливи	В'язкість низькотемпературна мПа•с, при температурі, °С (очікувана, згідно SAE)		В'язкість високотемпературна (очікувана, згідно SAE)	
	Провертання	Пропомпуваність	В'язкість, мм ² /с при t = 100 °С	Мін в'язкість, мПа•с при t = 150 °С
Hyundai 5W-30 SL GF 600	6600 при -30°C	60000 при -35 °С	9,3-12,6	≈2,9
Elf Evolution 700 STI 10W-40	7000 при -25°C	60000 при -30°C	12,6-16,3	≈2,9
Mobil Ultra 10W-40	7000 при -25°C	60000 при -30°C	12,6-16,3	≈2,9
THK Magnum Motor Plus 10W-40	7000 при -25°C	60000 при -30°C	12,6-16,3	≈2,9
Nanoprotec Engine Oil 5W-40	6600 при -30°C	60000 при -35 °С	12,6-16,3	≈2,9

В процесі вимірювань були отримані відгуки квантового виходу люмінесценції досліджуваних зразків чистих моторних олів, що показали істотні відмінності їх спектральних характеристик відповідно кількісному та якісному складу зразків (рис.4).

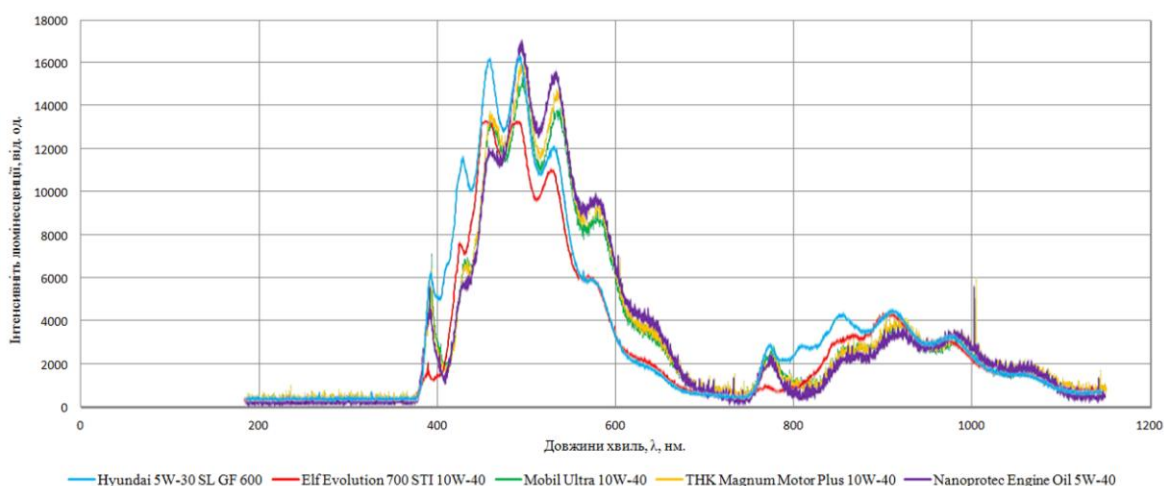


Рис. 4. Характеристичні спектри люмінесценції зразків чистих моторних олів.

Кількість вимірювань для кожного зразку становила 10 разів для серії з певною концентрацією, при $P=0,95$. Результати вимірювалися в одиницях пропорційності що відповідали зміні значення напруги на виході фотодетектору (10 од. інт. = 0,015 В) в робочому діапазоні фотодетектору з трансімпедантним підсилювачем $U = 2,4-32,4$ В, при темновому струмі фотодетектору 100 мА та частотному діапазоні роботи $f_{роб.} = 10 \cdot 10^4$ Гц. В даному випадку увесь відносний динамічний діапазон можливих значень напруги на виході фотодетектору складав 20000 відносних одиниць. Сканування інтенсивності люмінесценції по спектру проводилося в межах 360-1180 нм, з роздільною здатністю 0,5 нм в усьому лінійному діапазоні фотодетектору. Сума інструментальних похибок та власних похибок вимірювального засобу складала 2,3% при серії в 50 стандартних вимірювань.

Отримані дані дозволяють судити про можливість ефективної експрес-ідентифікації моторних олів та перевірки відповідності їх ключових показників що вказані в сертифікаті якості на товар. По отриманим спектрам люмінесценції доцільно проводити ідентифікацію контрафактної продукції експрес-методом із мінімальними затратами на пробопідготовку та інструментальне забезпечення вимірювальними засобами.

В подальшому були проведені порівняльні виміри зразків чистих моторних олів вибраних марок та моторних олів цієї ж марки що були у вжитку. Для проведення подальших дослідів, у якості джерела відпрацьованої оливи було використано ДВЗ та маслосистему легкового автомобіля Citroen C5 2.0 HPI (140 Hp) 2003 р. в. (EW10D) з системою прямого упорскування HPI Siemens Sirius 81 (BMW). Даний автомобіль проходив регулярне технічне обслуговування згідно сервісної книги виробника на протязі всього строку експлуатації. Загальний кілометраж транспортного засобу з моменту початку експлуатації становить 154 тис. км.

При більш детальному розгляді спектральних характеристик чистих та відпрацьованих олів, нами було застосовано моторну оливу Elf Evolution 700 STI 10w-40 – напівсинтетичну моторну оливу рекомендовано для використання в бензинових і дизельних двигунах легкових автомобілів. Особливістю даної моторної оливи є наявність висококипучих компонентів присадок для збереження паспортної в'язкості при високих температурах. Дана олива відповідає вимогам застосування в двигунах із технологією прямого впорскування (HPI).

При проведенні пробопідготовки, із маслосистеми легкового автомобіля Citroen C5 2.0 HPI було відібрано 10 проб під час проведення технічного обслуговування, що відповідали пробігу 2000 ± 10 км та 3500 ± 10 км відповідно, з моменту початкової заміни усієї оливи в маслосистемі даного автомобіля. На протязі всього тестового кілометражу даний автомобіль експлуатувався в міському циклі роботи, з середнім показником витрати палива за цикл 11,8 л на 100 км.

В результаті проведення спектральних вимірів було встановлено, що характеристичні спектри чистих та відпрацьованих олів мають фігурну подібність, але значно відрізняються за інтенсивністю випромінювання люмінесценції. Виміри чистих масел проводилися в динамічному діапазоні фотодетектору нормованому до 1 (логарифмічний масштаб), в той же час виміри відпрацьованих олів проводилися при розширенні діапазону до 20 одиниць. Таким чином, зображенні на рис. 5 характеристичні спектри відпрацьованих олів мають абсолютну інтенсивність в 20 разів меншу від приведеної, що може бути еквівалентно люмінесценції

багатокомпонентної системи що містить 20 частин чистої оливи та 1 частину відпрацьованої. Наведені на рис. 5 характеристичні спектри зразків подані в приведеному масштабі, для кращої ілюстрації збереження подібності чистих і відпрацьованих моторних олив.

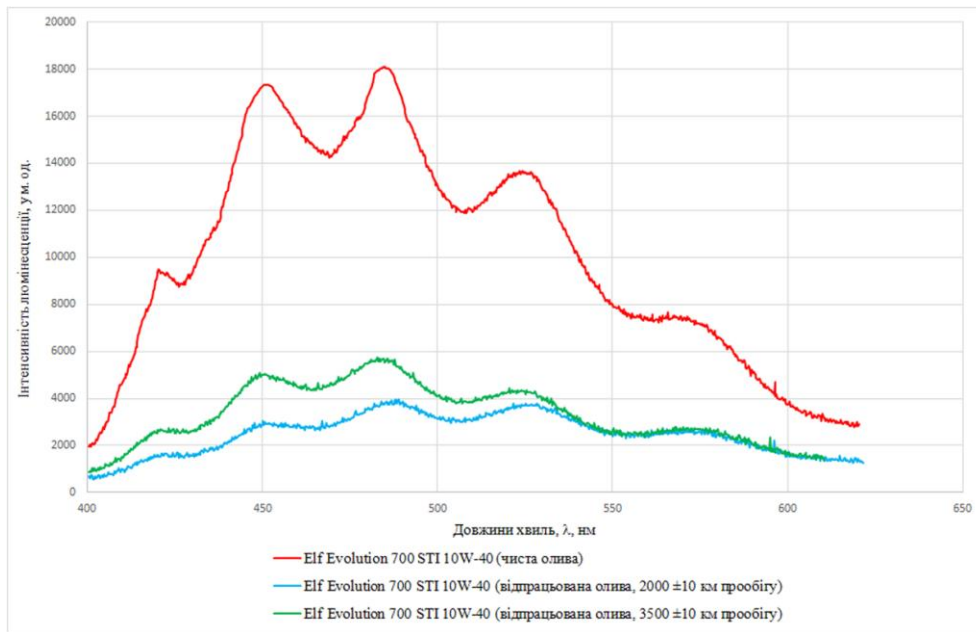


Рис. 5. Характеристичний спектр моторної оливи Elf Evolution 700 STI 10W-40 – чистої та відпрацьованої(після пробігу відповідно 2000 та 3500 км)

Зображені на рис. 5 залежності інтенсивності квантового виходу люмінесценції зразків моторних олив були отримані за допомогою системи смугових фільтрів в діапазоні 380-620 нм. В даному випадку, діапазон фотодетектору із підключеним трансімпедантним підсилювачем становив 20000 відносних одиниць по напрузі, що відповідають діапазону $U_{роб.} = 2,4-32,4$ В.

Висновки

Резюмуючи проведений огляд доступних матеріалів по досліджуваній темі та проаналізувавши отримані статистичні дані, можна стверджувати, що люмінесцентна флуориметрія має досить цікаві перспективи для застосування в експрес-діагностиці органічних та неорганічних олив та олій різної хімічної будови, структури та технологічного призначення. Інструментальна база даного методу дозволяє швидко і точно проводити оцінку якості зразків чистих та відпрацьованих моторних олив в умовах лабораторії та під час регламентованого сервісного обслуговування автотранспортних засобів.

Контроль інформативних параметрів моторних олив люмінесцентними методами може застосовуватися для забезпечення процедур ідентифікації («випробування на справжність») – визначення сортової та видової приналежності досліджуваного зразка. У випадку розробки калібрувальних графіків на окремі компоненти моторних олив певної марки, дані методи можуть бути застосовані для попереднього якісного (визначення наявності певної компоненти) та кількісного (концентрація досліджуваної речовини у зразку) аналізу. Подальше практичне впровадження вищезазначених методів та засобів пропонується у вигляді промислового зразка вимірювального засобу, що може використовуватися у багатьох сферах промисловості та державних органах метрологічного контролю.

Література.

1. Анисимова Н.А. Идентификация органических соединений: учебное пособие (для студентов, обучающихся по специальности «химия»). – Горно–Алтайск: РИО ГАГУ, 2009. – 95 с.
2. Вилков Л.В., Пентин Ю.А. Физические методы исследования в химии(Структурные методы и оптическая спектроскопия).М.: Высш. школа,1987, – 367с.
3. Галкин А.В. Люминесценция водорастворимых компонентов нефтей и нефтепродуктов/ А.В. Галкин, А.Ф. Лунин, А.В. Карякин //Журнал прикладной спектроскопии. 1993. – Т.58. – № 1-2. – С.194-197.
4. Глоба И.И. Оптические методы и приборы контроля качества. Минск, БГТУ, 2003, – 424 с.

5. Глоба И.И., Ламоткин С.А. Хроматографические и спектральные методы анализа. Минск, БГТУ, 2008. – 408 с.
6. Долгова Л.А. Методика определения показателей качества моторного масла на основе теории подобия /Л.А. Долгова, В.В. Салмин// Современные научные исследования и инновации. 2015. – № 2. – Ч.2 – С.27-34.
7. Защепкіна Н.М. Вибір експрес методик аналізу кількісних та якісних параметрів продуктів харчування із застосуванням УФ-випромінювання / Н.М. Защепкіна, О.А. Наконечний // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 4 (1226). – С. 51–57. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079 4525.
8. Класифікація моторних масел по SAE. [Електронний ресурс]: – Режим доступу: <http://uaz-cpri.com/klasifikatsiya-motornikh-masel-po-sae> – Назва з екрану
9. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. – М.: Мир, 1986. – 488 с
10. Лёвшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения: молекулярная люминесценция. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 272 с.
11. Орлова А.О. Анализ многокомпонентной смеси по двумерным спектрам люминесценции. Современные технологии. Труды молодых ученых ИТМО. Под ред. проф. С.А. Козлова, СПб ГИТМО (ТУ), 2001, – с.24-31.
12. Орлова А.О. Анализ многокомпонентной смеси по двумерным спектрам люминесценции. Современные технологии. Труды молодых ученых ИТМО. Под ред. проф. С.А. Козлова, СПб, СПб ГИТМО (ТУ), 2001, с.24-31.
13. Романовская Г.И. Новые методы и подходы в люминесцентном анализе / Г.И. Романовская // Журнал аналитической химии. 1993. – Т.48. – №2. – С.198-216.
14. Специфікація мікроконтролеру ATmega328. [Електронний ресурс]: – Режим доступу:http://ww1.microchip.com/downloads/-en/De-viceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega-328-328P_Da-tasheet.pdf – Назва з екрану.
15. Храмов Н.В. Старение моторного масла/ Н.В. Храмов, А.Е. Королев, Р.Ф. Бай// Известия ТулГУ. Технические науки., 2014. – Вып. 4. – С. 134-136.
16. Valeur, B.; Berberan-Santos, M.N. Molecular Fluorescence: Principles and Applications, 2nd ed.;Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2013, p. 138-142.

Рецензент:

д.т.н., проф. **В.Г. Здоренко**, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки Київського національного університету технологій та дизайну

Стаття надійшла до редакції 14.12.2018

UDC 681.3.093:044.3

D.O. Zuev, E.V. Dos, A.V. Kropachev, O.V. Babkin, O.O. Varlamov
MODELING AND CONTROL OF DATA CENTER POWER CONSUMPTION MINIMIZATION STRATEGIES

Urgency of the research. Optimization of data center power utilization by getting a proper proportion of computing and cooling power consumption reducing as an important problem of modern engineering science was discussed. It was shown that energy-efficiency constraints problem as a main limiting factor for data centers performance can be solved by thermal modeling and control solutions development.

Target setting. Recent studies analysis shows that hybrid cooling solutions which nowadays widely used in a data centers require to provide analysis of virtual machines structure organization and utilize higher cooling capability due to the high operating temperature of active servers.

Actual scientific researches and issues analysis. Thereby it is necessary to develop computational and cooling power consumption optimization solution for hybrid cooling architecture. It will allow to achieve overall power loss minimization with satisfying of service-level agreement requirements.

Uninvestigated parts of general matters defining. For determination of chillers work schedule it is necessary to estimate power consumption of datacenter, cooling mode transition overheads, number of servers, virtual machines and its placement.

The statement of basic materials. There were compared three cooling mode solutions for data centers: fixed temperature regime, P-adaptive regime and PT-adaptive regime. Fixed temperature regime as conventional cooling mode which uses free cooling only when output temperature is lower than pre-defined temperature was proved to be inefficient while P-adaptive regime and PT-adaptive regime was proved to be preferable ones.

The research objective. Proposed solution significantly extends the usability of free cooling for data centers, while it takes into account climate condition, servers' workload, server room's temperature profile and server cooling architecture.

Conclusions. Therefore developed model of cooling mode efficiency estimation allowed recommending PT-adaptive regime as adaptive mode which jointly optimizes the power consumption and transition overhead.

Keywords: data center; power consumption; virtual machine; free cooling mode; electrical cooling mode; fixed temperature regime; PT-adaptive regime.

Д.О. Зуєв, Є.В. Дос, А.В. Кропачов, О.В. Бабкін, О.О. Варламов
МОДЕЛЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ СТРАТЕГІЯМИ МІНІМІЗАЦІЇ
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ДАНИХ

Актуальність теми дослідження. Обговорено методи оптимізації використання енергоспоживання центрів обробки даних шляхом визначення належних пропорцій між витратами на систему охолодження та обчислювальну систему, що на сьогоднішній день є важливою проблемою інженерної науки та інформаційних технологій. Показано, що проблема обмеження енергоефективності як основного обмежувального фактора для роботи центрів обробки даних може бути вирішена шляхом розробки термічного моделювання та управління.

Постановка проблеми. Аналіз сучасних досліджень у даній галузі показав, що гібридні охолоджувальні рішення, які сьогодні широко використовуються в центрах обробки даних, вимагають визначення оптимальної організації комплексу віртуальних машин і застосування більш ефективної системи охолодження у зв'язку з високим рівнем робочої температури активних серверів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, була показана необхідність розроблення рішення для оптимізації використання обчислювальної системи та гібридної системи охолодження. Це дозволяє досягти мінімізації загальної втрати потужності задовольняючи вимоги до угоди про рівень обслуговування центру обробки даних.

Постановка завдання. Запропоноване рішення значно розширює зручність охолодження для центрів обробки даних, враховуючи кліматичні умови, навантаження серверів, температурний режим сервера та архітектуру системи охолодження сервера.

Виклад основного матеріалу. Було проведено порівняння трьох типів режиму охолодження для центрів обробки даних: фіксований температурний режим, P-адаптивний режим та PT-адаптивний режим. Фіксований режим температури, як звичайний режим охолодження, який використовує вільне охолодження тільки тоді, коли вихідна температура нижче заданої температури, виявився неефективним, тоді як P-адаптивний режим і PT-адаптивний режим можуть бути використані у рамках розробленої методології.

Висновки відповідно до статті. Таким чином, розроблена модель оцінки ефективності режиму охолодження дозволила рекомендувати PT-адаптивну схему, що найбільшою мірою оптимізує процес споживання енергії.

Ключові слова: центр обробки даних; споживання електроенергії; віртуальна машина; режим вільного охолодження; режим електро-охолодження; режим фіксованої температури; PT-адаптивний режим.

Д.О. Зуєв, Е.В. Дос, А.В. Кропачев, О.В. Бабкин, А.А. Варламов
МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СТРАТЕГИЯМИ МИНИМИЗАЦИИ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Актуальность темы исследования. Обсуждены методы оптимизации использования энергопотребления центров обработки данных путем определения надлежащих пропорций между затратами на систему охлаждения и вычислительную систему, на сегодняшний день является важной проблемой инженерной науки и

информационных технологий. Показано, что проблема ограничения энерго-эффективности как основного ограничительного фактора для работы центров обработки данных может быть решена путем разработки термического моделирования и управления.

Постановка проблемы. Анализ современных исследований в данной области показал, что гибридные охлаждающие решения, которые сегодня широко используются в центрах обработки данных, требуют определения оптимальной организации комплекса виртуальных машин и применения более эффективной системы охлаждения в связи с высоким уровнем рабочей температуры активных серверов.

Выделение неисследованных частей общей проблемы. Таким образом, была показана необходимость разработки решения для оптимизации использования вычислительной системы и гибридной системы охлаждения. Это позволяет достичь минимизации общей потери мощности удовлетворяя требования к соглашению об уровне обслуживания центра обработки данных.

Постановка задачи. Предложенное решение значительно расширяет удобство охлаждения для центров обработки данных, учитывая климатические условия, нагрузки серверов, температурный режим сервера и архитектуру системы охлаждения сервера.

Изложение основного материала. Было проведено сравнение трех типов режима охлаждения для центров обработки данных: фиксированный температурный режим, P-адаптивный режим и PT адаптивный режим. Фиксированный режим температуры, как обычный режим охлаждения, который использует свободное охлаждение только тогда, когда исходная температура ниже заданной температуры, оказался неэффективным, тогда как P-адаптивный режим и PT-адаптивный режим могут быть использованы в рамках разработанной методологии.

Выводы соответствию со статьей. Таким образом, разработана модель оценки эффективности режима охлаждения позволила рекомендовать PT-адаптивную схему, в наибольшей степени оптимизирует процесс потребления энергии.

Ключевые слова: центр обработки данных потребление электроэнергии; виртуальная машина; режим свободного охлаждения; режим электро-охлаждения; режим фиксированной температуры; PT адаптивный режим.

1. Introduction

Data center power utilization level optimization by getting a proper proportion of computing and cooling power consumption reducing is a *hot spot of modern engineering science and information technologies (IT)*. Usually conventional computing power minimization solutions lead to actual CPU utilization increase and require higher cooling capability in order to work with increased heat density of active servers. Nowadays hybrid cooling solutions are widely used in a datacenters [1-3], which requires to provide further analysis of virtual machines (VM) structure organization and reduces the chance of using free cooling; hybrid cooling schemes usually require high cooling capability due to the high operating temperature of active servers [4-8].

Therefore joint computational and cooling power consumption optimization solution for datacenters as a *target of the research* was proposed (Figure 1). It was developed for hybrid cooling architecture and allows to achieve overall power loss minimization with satisfying of service-level agreement (SLA) requirements. To identify the main aspects of the joint power consumption optimization model development, *systematic analysis of recent studies and publications* was done. There were analyzed modern cooling solutions for cloud services [1-3], VM placement schemes and free cooling system check [4-8]. Statistics of the climate condition and servers' workload [9-11] allowed forming requirement or predictive control scheme development. Computational algorithms that can be used for server room's temperature profile simulation [12-18] were also discussed.

It was shown lack of unified methodology which allows to significantly extend the usability of free cooling for data centers having a hybrid cooling architecture as *uninvestigated part of discussed studies*. Proposed solution takes into account all input parameters of data center server room infrastructure, specifically climate condition, servers' workload, server room's temperature profile and server cooling architecture.

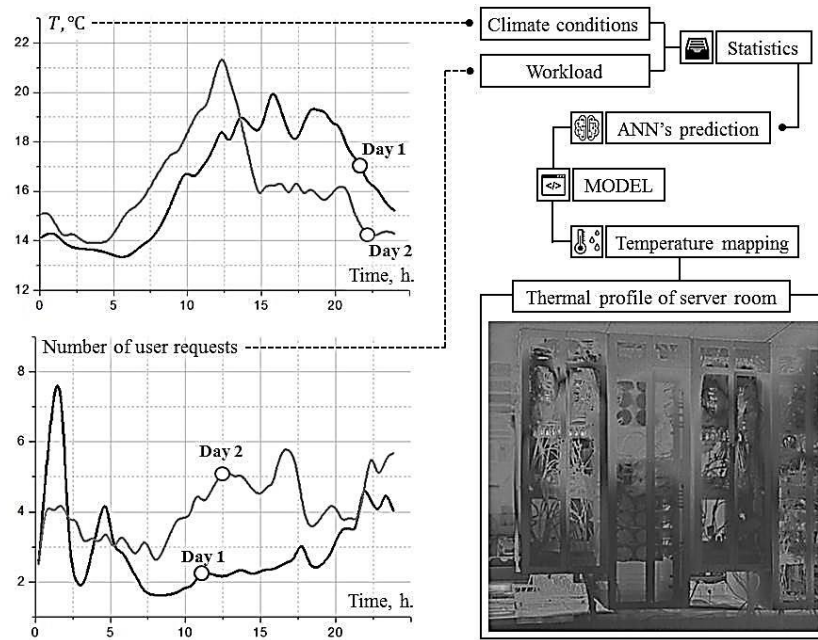


Fig. 1. Joint power consumption optimization scheme for hybrid cooling architecture.

Statistics of the climate condition and servers' workload forms artificial neural network (ANN) training dataset and further can be forecasted by predictive control scheme. In other hand server room's temperature profile and the dependency between the server temperature and cooling solutions can be simulated and modeled by standard algorithms. Thus, the *research objective* implies to development of combined scheme and unified methodology for data center hybrid cooling architecture.

2. Proposed method

Development of combined scheme and unified methodology for data center hybrid cooling architecture implies to build joint power consumption optimization model. It is necessary to estimate optimal cooling mode regime and maximum power consumption of active servers. It allows determining chillers work schedule in order to have no overheads in terms of power and time. Main parameters to be analyzed are:

- power consumption of datacenter P_{DC} ;
- cooling mode transition overheads P_{TR} ;
- number of servers N_S ;
- number of VMs N_{VM} ;
- binary matrix representing VM placement $B(i,j)$;
- binary parameter CM which determines cooling mode ($CM = 0$ for electrical cooling and $CM = 1$ for free cooling).

Power consumption of datacenter can be calculated as

$$P_{DC} = P_{Cool} + P_{Comp}, \quad (1)$$

where P_{Cool} refers to power consumption of cooling system and P_{Comp} represents computational power consumption.

Mathematically the problem solving aspects can be formulated as determining of $B(i,j)$ and CM parameter by obtaining minimums of objective function of entire power consumption P_{Σ} (Figure 2):

$$\begin{cases}
 B(i, j) = \begin{bmatrix} b(1,1) & \dots & b(1, N_{VM}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & b(i, j) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ b(N_S, 1) & \dots & b(N_S, N_{VM}) \end{bmatrix} \\
 CM \in [0;1] \\
 P_{\Sigma} = P_{DC} + P_{TR}
 \end{cases} \tag{2}$$

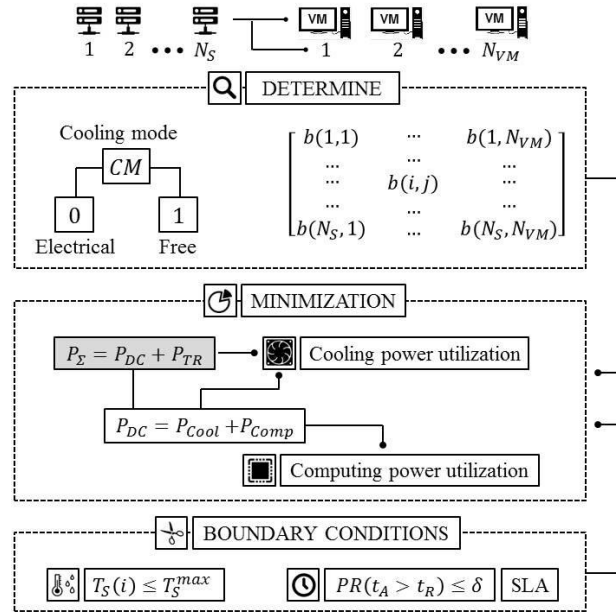


Fig. 2. Mathematical algorithm of joint power consumption scheme for hybrid cooling architecture.

It has to be noticed that obtaining minimums of objective function minimum should also include analysis of boundary conditions for server temperature and server performance.

For boundary conditions estimation on should found $T_S(i)$ which refers to temperature of i -th server and probability $PR()$ of actual execution time t_A exceeding required execution time t_R :

$$\begin{cases}
 T_S(i) \leq T_S^{\max} \\
 PR(t_A > t_R) \leq \delta
 \end{cases} \tag{2}$$

where T_S^{\max} is maximum temperature constraint for data center servers and is δ SLA requirement parameter. Thereby optimization problem can be translated into a bin-packing problem by exploiting the analogy between a bin and a server.

3. Experimental results and analysis

To simplify developed methodology two-phase algorithm can be proposed. It includes determination of optimal pair of parameters of cooling regime and active servers' utilization threshold level $\{CM; U_S^{TH}\}$ which allows to satisfy temperature and performance requirements (3). At the second stage VMs have to be assigned to servers in order to minimize number of servers. Optimization procedure should be iterated at every predefined time interval. Thereby equations (2) and (3) could be estimated as:

$$\begin{cases} B(i, j) \in [0, U_S^{TH}] \\ CM \in [0;1] \\ P_{\Sigma}(k) = \sum_{i=k}^{k+N_T-1} a^{i-k} \cdot (P_{Cool}^{PR} + P_{TR}^{PR}) \end{cases} \quad (4)$$

and boundary conditions could be defined as:

$$\begin{cases} U_S^{TH}(l) \geq \hat{U}_R / N_S \\ l \in [k, k + N_S - 1] \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_S^{TH} \leq \min(U_S^{\max}, U_S^T(l)) \\ \forall l, 1 \leq a \leq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

where

- N_T is number of time periods;

- P_{Cool}^{PR} , P_{Comp}^{PR} and P_{TR}^{PR} are predicted values of P_{Cool} , P_{Comp} and P_{TR} values at the l -th time period;

- \hat{U}_R is the prediction of average user requests normalized with maximum number of user requests for single server;

- a is a weighting factor;

- U_S^{\max} is maximum acceptable performance loss regime power;

- $U_S^T(l)$ is highest utilization satisfying maximum temperature constraint.

Figure 3 shows dependence of the power consumption on the U_S^{TH} value. Figure demonstrates that total power consumption at free cooling mode is usually changes in proportion to computing power as U_S^{TH} increase is more significant than the cooling power consumption growth. However, the cooling capability of the free cooling is limited, and maximal value of U_S^{TH} for this cooling mode is also limited.

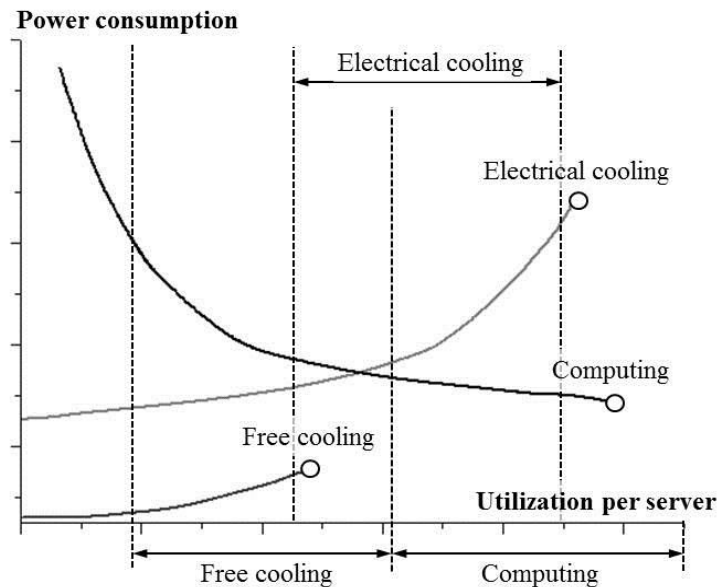


Fig. 4. Dependence of the power consumption on the active servers' utilization threshold level for free cooling and electrical cooling regimes.

To evaluate the effectiveness of the joint optimization model statistical dataset of CloudSim simulation [19] was used (Figure 5). There were compared three cooling mode solutions for data centers:

- fixed temperature regime as conventional cooling mode which uses free cooling only when output temperature is lower than pre-defined temperature ($U_s^{TH} = U_s^{\max}$);

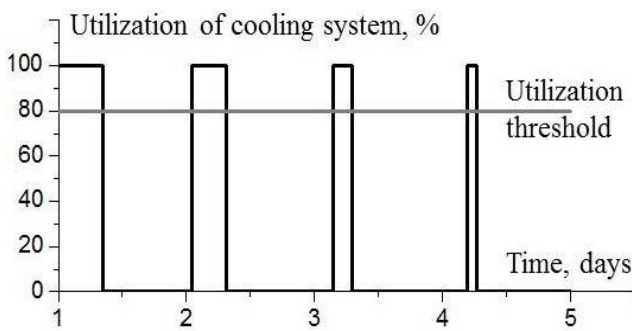
- P-adaptive regime as adaptive mode which adjusts the cooling and the utilization threshold to minimize power consumption of data center;

- PT-adaptive regime as adaptive mode which jointly optimizes the power consumption and transition overhead.

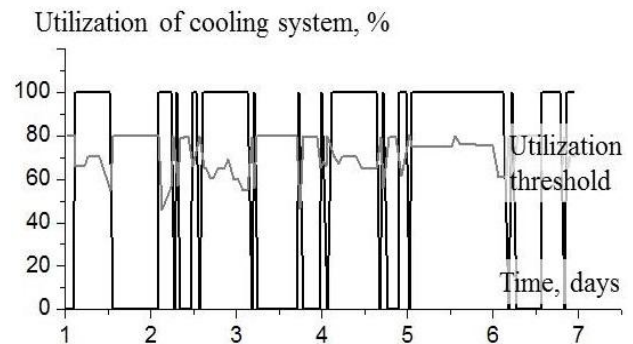
The highest power consumption savings were observed at comparison of fixed temperature regime and P-adaptive regime while output temperature was usually higher pre-defined temperature so free cooling mode utilization was usually impossible. In other hand PT-adaptive regime allowed to use free cooling mode by lowering the maximum server power consumption.

Comparison of P-adaptive and PT-adaptive regimes has shown almost similar level of power consumption savings. However, PT-adaptive regime allowed to significantly decrease number of cooling modes transitions by accounting for the overhead caused by the cooling mode transitions. It is important to notice that the effectiveness of PT-adaptive gets enhanced as the power consumption proportion of servers gets to be improved.

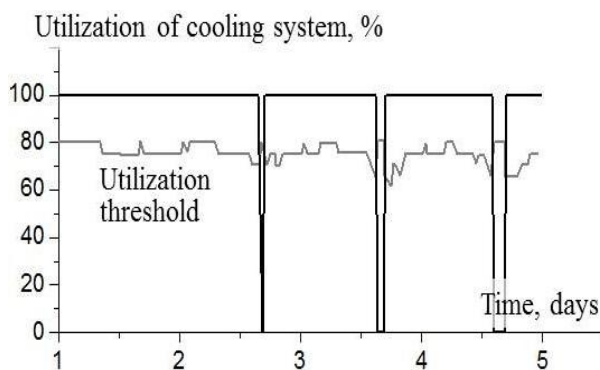
Normalized power consumption as the power proportionality of servers should be defined as the ratio of the static power P_{ST} to the total power consumption P_{Σ} . For low value of P_{ST}/P_{Σ} can be used free cooling for longer periods of time due to lower server utilization threshold. Thereby minimal number of active servers can be used and developed methodology can be used to achieve higher energy-proportionality. Experiments' simulation statistics datasets demonstrates that PT-adaptive allows to provide higher level of power consumption savings for datacenter infrastructure.



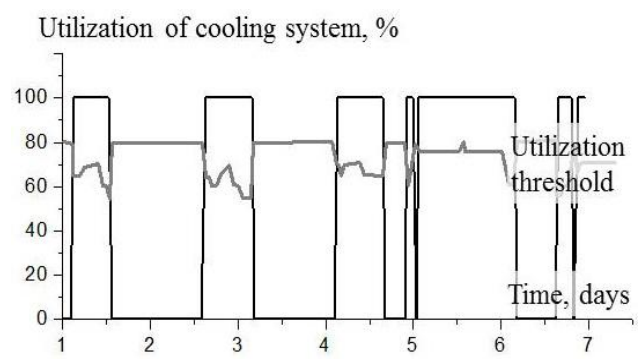
(a)



(d)



(b)



(e)

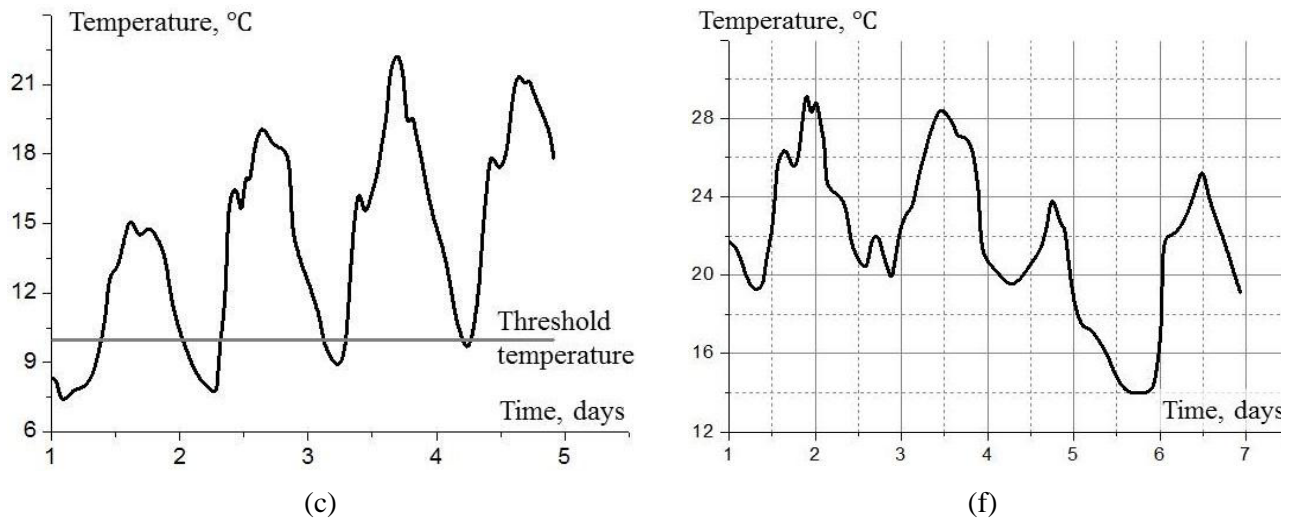


Fig. 6. Comparison of power utilization of fixed temperature (a) and PT-adaptive (b) cooling modes at temperature regime "1" (c) and power utilization of P-adaptive (d) and PT-adaptive (e) cooling modes at temperature regime "2" (f).

Thereby energy-efficiency constraints problems as a main limiting factor for data centers performance can be solved by thermal modeling and control solutions development which have to be considered as key aspect of power consumption reducing.

4. Conclusions

Key aspects of data center power utilization optimization by getting a proper proportion of computing and cooling power consumption reducing were analyzed. Energy-efficiency constraints problem have to be solved by thermal modeling and control solutions development. While nowadays hybrid cooling solutions are widely used in data centers it is important to provide analysis of virtual machines structure organization and utilize higher cooling capability due to the high operating temperature of active servers. It allows to achieve overall power loss minimization with satisfying all requirements.

Proposed methodology extends the usability of free cooling for data centers. It takes into account climate condition, servers' workload, server room's temperature profile and server cooling architecture. It was demonstrated that for development joint power consumption optimization model it is necessary to estimate optimal cooling mode regime and maximum power consumption of active servers. For determination of chillers work schedule were estimated power consumption of datacenter, cooling mode transition overheads, number of servers, virtual machines and its placement. There were compared three cooling mode solutions for data centers: fixed temperature regime, P-adaptive regime and PT-adaptive regime. Fixed temperature regime was shown as inefficient one while P-adaptive regime and PT-adaptive regime was proved to be preferable ones. Developed model of cooling mode efficiency estimation demonstrated preferences of PT-adaptive regime as adaptive mode which jointly optimizes the power consumption and transition overhead.

References

1. Garday, D. (2007). Reducing data center energy consumption with wet side economizers,"White paper, Intel
2. Atwood, D. and Miner, J. G. (2008). Reducing data center cost with an air economizer, White Paper: Intel Corporation
3. Lu, T., Lü, X., Remes, M., & Viljanen, M. (2011). Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. *Energy and Buildings*, 43(12), 3360-3372.
4. Kourai, K., & Ooba, H. (2016). VMBeam: Zero-Copy Migration of Virtual Machines for Virtual IaaS Clouds. 2016 IEEE 35th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS).
5. Kusic, D., Kephart, J. O., Hanson, J. E., Kandasamy, N., & Jiang, G. (2009). Power and performance management of virtualized computing environments via lookahead control. *Cluster computing*, 12(1), 1-15.

6. J. Xu and J.A. Fortes, "Multi-objective virtual machine placement in virtualized data center environments," in Green Computing and Communications (Green Com), 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on and Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPS Com), pp. 179–188. IEEE, 2010.
7. Jang, J. W., Jeon, M., Kim, H. S., Jo, H., Kim, J. S., & Maeng, S. (2011). Energy reduction in consolidated servers through memory-aware virtual machine scheduling. *IEEE Transactions on Computers*, 60(4), 552-564.
8. Verma, A., Dasgupta, G., Nayak, T. K., De, P., & Kothari, R. (2009, June). Server workload analysis for power minimization using consolidation. In Proceedings of the 2009 conference on USENIX Annual technical conference (pp. 28-28). USENIX Association.
9. Meng, X., Isci, C., Kephart, J., Zhang, L., Bouillet, E., & Pendarakis, D. (2010, June). Efficient resource provisioning in compute clouds via vm multiplexing. In Proceedings of the 7th international conference on Autonomic computing (pp. 11-20). ACM.
10. Halder, K., Bellur, U., & Kulkarni, P. (2012, June). Risk aware provisioning and resource aggregation based consolidation of virtual machines. In Cloud Computing (CLOUD), 2012 IEEE 5th International Conference on (pp. 598-605). IEEE.
11. Weller, B. (2010). Installing and Setting Up SQL Server Modeling. In *Beginning SQL Server Modeling* (pp. 1-12). Apress.
12. Rivoire, S., Ranganathan, P., & Kozyrakis, C. (2008). A Comparison of High-Level Full-System Power Models. *HotPower*, 8(2), 32-39.
13. Pedram, M., & Hwang, I. (2010, September). Power and performance modeling in a virtualized server system. In *Parallel Processing Workshops (ICPPW), 2010 39th International Conference on* (pp. 520-526). IEEE.
14. Patterson, M. K. (2008, May). The effect of data center temperature on energy efficiency. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2008. ITherm 2008. 11th Intersociety Conference on* (pp. 1167-1174). IEEE.
15. Choi, J., Kim, Y., Sivasubramaniam, A., Srebric, J., Wang, Q., & Lee, J. (2008). A CFD-based tool for studying temperature in rack-mounted servers. *IEEE transactions on computers*, 57(8), 1129-1142.
16. Brown, W., & Lim, T. Y. (2017, July). Quantifying Bolt Relaxation During High Temperature Operation. In *ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference* (pp. V03AT03A031-V03AT03A031). American Society of Mechanical Engineers.
17. Nakamura, H. (2009, January). Cooling fan model for thermal design of compact electronic equipment: Improvement of modeling using PQ Curve. In *ASME 2009 InterPACK Conference collocated with the ASME 2009 Summer Heat Transfer Conference and the ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability* (pp. 221-228). American Society of Mechanical Engineers.
18. Ayoub, R., Nath, R., & Rosing, T. (2012, February). JETC: Joint energy thermal and cooling management for memory and CPU subsystems in servers. In *High Performance Computer Architecture (HPCA), 2012 IEEE 18th International Symposium on* (pp. 1-12). IEEE.
19. Buyya, R., Ranjan, R., & Calheiros, R. N. (2009, June). Modeling and simulation of scalable Cloud computing environments and the CloudSim toolkit: Challenges and opportunities. In *High Performance Computing & Simulation, 2009. HPCS'09. International Conference on* (pp. 1-11). IEEE.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2018

УДК 621.9-1/-9

В.О. Іванов¹, В.О. Залога¹, Є.В. Басова², В.С. Капанайко¹Сумський державний університет¹НТУ «Харківський політехнічний інститут»²**АЛГОРИТМ ВИБОРУ УСТАНОВЛЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕРСТАТНИХ ПРИБОРІВ**

Питання щодо підвищення ефективності сучасного свердильно-фрезерно-розточувального обладнання в умовах багатонаменклатурного виробництва є пріоритетними в сучасному машинобудуванні. Використання верстатних пристроїв є обов'язковою умовою для забезпечення точності і якості машинобудівної продукції. У роботі розглянуті питання вибору установлювальних елементів як етапу проектування компоновок верстатних пристроїв. На підставі розробленого алгоритму реалізується обґрунтований вибір установлювальних елементів для заготовок корпусних деталей при реалізації схеми базування за трьома площинами. Наведено послідовність формування безлічі рішень при виборі функціональних елементів верстатного пристрою з бази даних з урахуванням конструкторсько-технологічних характеристик оброблюваної деталі. Практична цінність дослідження полягає в реалізації автоматизованого вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв, що дозволить підвищити ефективність процесу проектування технологічного оснащення та знизити трудомісткість технологічної підготовки виробництва.

Ключові слова: базування, верстатний пристрій, установлювальний елемент, гнучкість, автоматизація

В.А. Иванов, В.О. Залога, Е.В. Басова, В.С. Капанайко**АЛГОРИТМ ВЫБОРА УСТАНОВОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ**

Вопросы повышения эффективности современного сверильно-фрезерно-расточного оборудования в условиях многонаменклатурного производства являются приоритетными в современной машиностроении. Использование станочных приспособлений – это обязательное условие для обеспечения точности и качества машиностроительной продукции. В работе рассмотрены вопросы выбора установочных элементов как этапа проектирования компоновок станочных приспособлений. На основании разработанного алгоритма реализуется обоснованный выбор установочных элементов для заготовок корпусных деталей при реализации схемы базирования по трем плоскостям. Приведена последовательность формирования множества решений при выборе функциональных элементов станочного приспособления из базы данных с учетом конструкторско-технологических характеристик обрабатываемой детали. Практическая ценность исследования заключается в реализации автоматизированного выбора установочных элементов станочных приспособлений, что позволит повысить эффективность процесса проектирования технологической оснастки и снизить трудоемкость технологической подготовки производства.

Ключевые слова: базирование, станочное приспособление, установочный элемент, гибкость, автоматизация

V. Ivanov, V. Zaloga, Y. Basova, V. Kapanaiko**ALGORITHM FOR THE SELECTION OF LOCATING ELEMENTS OF FIXTURES**

Issues of increasing the efficiency of modern drilling, milling and boring equipment in the conditions of multiproduct manufacturing are priorities in modern machine-building. The use of fixtures is a prerequisite for ensuring the accuracy and quality of engineering products. The paper discusses the selection of locating elements as a design stage for the fixture design. Based on the developed algorithm, a reasonable choice of locating elements for prismatic workpieces is realized when implementing a locating chart on three planes (3-2-1 locating chart). The sequence of forming a set of solutions for selecting the functional elements of the fixtures from the database, taking into account the design and technological characteristics of the workpiece. The practical value of the research lies in the implementation of automated selection of locating elements of fixtures, which will increase the efficiency of the tooling design process and reduce the labor content of the production planning.

Keywords: locating, fixture, locating element, flexibility, automation

Постановка проблеми. Сучасне машинобудівне виробництво характеризується багатонаменклатурністю виробів і нестабільністю обсягів випуску продукції. Велика різноманітність деталей потребує механічної обробки для досягнення необхідної точності розмірів, форми та взаємного розташування, а також якості поверхонь згідно з їх службовим призначенням. Усі типи деталей потребують точного базування та надійного закріплення при механічній обробці для забезпечення заданих конструктором параметрів, що дозволить забезпечити працездатність і надійність виробу в цілому. У зв'язку з цим значна увага приділяється верстатним пристроям (ВП) [1]. Варто відмітити, що враховуючи розширення технологічних можливостей сучасних верстатів [2], їх високу вартість та необхідність здійснення великої кількості переналагоджень при переході до обробки деталей іншого типорозміру, стрімкого розвитку набуває інтенсифікація виробництва [3]. Це передбачає підвищення гнучкості ВП, скорочення підготовчо-заклучного часу, а також можливості багатокординатної та багатоінструментної обробки деталей за один установ, що повинно забезпечуватись саме конструкцією

ВП [4-6]. Усе це сприяє скороченню витрат часу на технологічну підготовку виробництва, а отже сприятливо впливає на зниження вартості продукції [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз вітчизняних та закордонних джерел інформації свідчить, що процес проектування ВП є складним та трудомістким, до того ж потребує одночасного урахування великої кількості інформаційних даних [9]. Схему базування корпусних деталей за трьома площинами ще називають «принцип 3-2-1», що забезпечує максимальну жорсткість і мінімальну кількість елементів ВП. Правильне базування заготовки у ВП є важливим етапом для забезпечення точності обробки. Установлювальні елементи повинні бути розташовані якомога далі один від одного та з умовою, щоб центр мас знаходився між ними, що забезпечить стійкість положення заготовки. Затискні елементи забезпечують надійність положення заготовки у процесі обробки на верстаті. Актуальним є знаходження оптимальних позицій установлювальних і затискних елементів [10]. Menassa and DeVries [11] використовували мінімізацію відхилення заготовки у визначених точках як критерій для проектування при визначенні позицій установлювальних елементів ВП. Meyer and Liou [12] запропонували підхід, в основі якого лінійне програмування, для синтезу компонувань ВП із урахуванням динамічних умов обробки. Крім того, було запропоновано рішення для мінімізації сили закріплення та сил реакції опор. Li and Melkote [13] за допомогою методу нелінійного програмування довели, що похибка базування заготовки у ВП мінімізується завдяки локалізації пружних деформацій. Roy and Liao [14] розробили евристичний метод для позиціонування установлювальних і затискних елементів ВП. Tao et al. [15] презентували методологію геометричного обґрунтування для визначення оптимальних позицій затискних елементів ВП і послідовності закріплення заготовки для складних заготовок. Liao and Hu [16] презентували систему для аналізу компонувань ВП, що базується на динамічній моделі, та аналізує систему «ВП – заготовка» залежно від змінних у часі силових навантажень. Li and Melkote [17] запропонували комбінований метод оптимального синтезу компонувань ВП і призначення сил закріплення з урахуванням динаміки заготовки під час обробки. Amaral et al. [18] використовували скінченноелементне моделювання для вирішення оптимізаційної задачі на перевірку працездатності компонування ВП. Tan et al. [19] здійснили моделювання, аналіз та перевірку найвигідніших компонувань ВП методами силового затискання, оптимізації та скінченноелементного моделювання. Mihaylov and Nikolcheva [20] розробили методику позиціонування установлювальних елементів ВП для установаження заготовок призматичного та циліндричного типу за принципом «3-2-1». За цією методикою позиції функціональних елементів розраховуються з урахуванням центру ваги заготовки, що дозволяє підвищити жорсткість системи «ВП – заготовка». У більшості вищезазначених досліджень використовувалися методи лінійного або нелінійного програмування, що часто не забезпечує глобальне оптимальне рішення. Wan et al. [21] провели дослідження та запропонували метод проектування затискних елементів для закріплення заготовок при механічній обробці. Обґрунтовано кількість обмежень ступенів вільності залежно від особливостей обробки деталей. Також розроблено алгоритм автоматичної генерації схеми позиціонування та систему аналізу рівноваги під дією сил при обробці. Rétfalvi [22] для прискорення процесу проектування ВП розробив систему, що реалізується у кілька етапів: вибір функціональних елементів, їх розміщення у компонуванні ВП та подальше складання. Вхідними даними є САД-модель та її технологічні особливості обробки. Система самостійно вибирає поверхні необхідні для базування. Hunter Alarcon et al. [23] розробили та впровадили програмний продукт для проектування ВП, особливістю якого є те, що він самостійно формує супровідну конструкторсько-технологічну документацію та забезпечує колективну роботу між безпосередніми виконавцями при проектуванні ВП. Nelaturi et al. [24] розробили алгоритм генерації моделі ВП із урахуванням стійкості заготовки, точок контакту між заготовкою та його функціональними елементами, постійності сил закріплення. Система вибирає компонування ВП із елементів, що є в наявності та задовольняють умовам проектування. Peng et al. [25] створили систему віртуального складання модульних ВП. Методологію позиціонування функціональних елементів створено на основі аналізу ступенів вільності елементів, що взаємодіють. Wu et al. [26] розробили алгоритм визначення місцеположення функціональних елементів на опорній плиті для встановлення деталі складної форми. Алгоритм створений на основі теорії механізмів зчеплення, що дозволяє визначити оптимальне положення функціональних елементів та самої заготовки. Також цей алгоритм дозволяє проаналізувати можливі варіанти розміщення елементів, та вибрати такий варіант, що найбільш відповідає виробничим умовам. Vichare et al. [27] описали методику, що дозволяє виявити взаємозв'язки між функціональними елементами модульних ВП за допомогою використання єдиної виробничої ресурсної моделі та створити інформаційну базу з

логічними зв'язками між елементами, що в подальшому дозволить швидко виявляти зв'язки та складати готові ВП.

Постановка завдань. Метою представленого дослідження є розробка алгоритму автоматизованого вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв для забезпечення циклу проектування та точності обробки корпусних деталей на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах.

Викладення основного матеріалу. З метою скорочення витрат часу на проектні процедури при проектуванні компонувань ВП запропоновано та розроблено алгоритм автоматизованого вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв, що використовується для базування корпусних деталей на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах відповідно до конструкторсько-технологічних особливостей заготовок.

Алгоритм здійснює вибір установлювальних елементів (опорні пластини або опори) для заготовок корпусних деталей за схемою базування «за трьома площинами» та реалізується у три основні етапи (рис. 1): для установлювальної, напрямної та опорної баз. Вибір здійснюється шляхом виконання логічних операцій на основі розроблених правил.

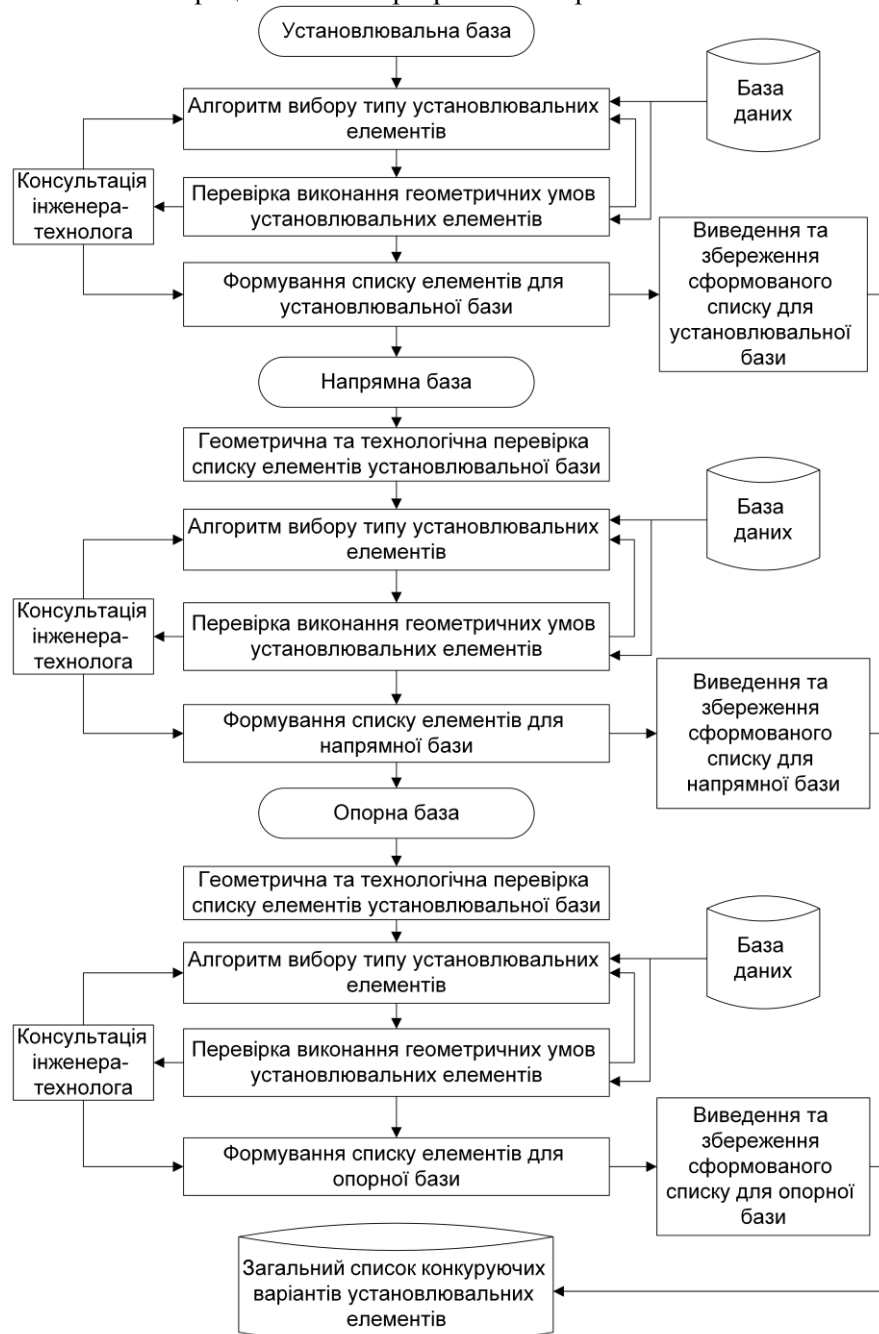


Рис. 1 Логічна схема вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв для реалізації схеми базування «за трьома площинами»

Далі, враховуючи інформацію про шорсткість базової поверхні заготовки, відбувається уточнення типу установлювального елемента (рис. 2).

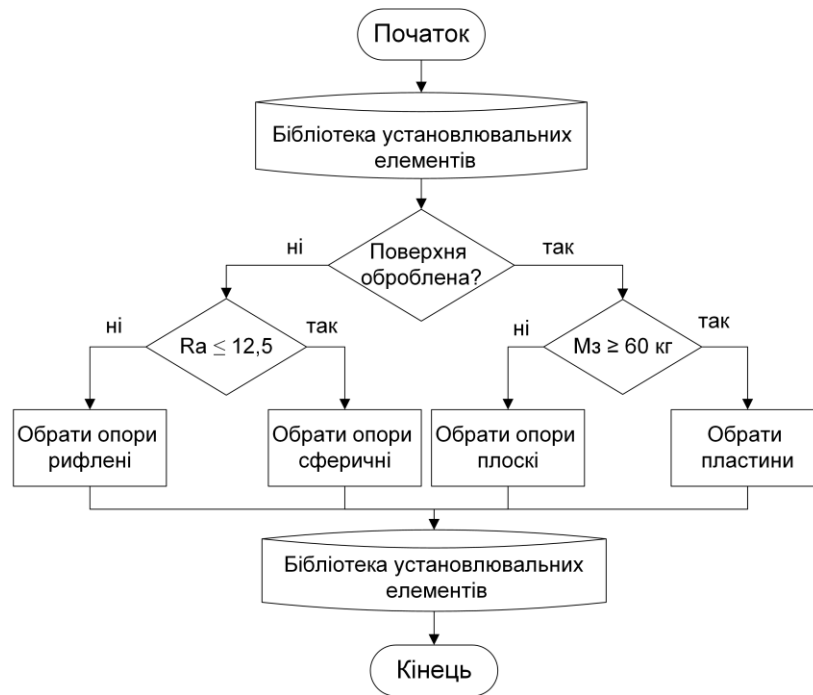


Рис. 2 Алгоритм вибору типу установлювальних елементів

За установлювальну базу обирається поверхня найбільша за своєю площею. У випадку використання опорних пластин перевірка виконання геометричних умов виконується з урахуванням довжини та ширини заготовки. Також враховується те, що достатньою умовою реалізації установлювальної бази є використання двох пластин. Вибір опорних пластин із бібліотеки установлювальних елементів здійснюється з урахуванням довжини l_{Π} і ширини пластини b_{Π} , довжини l_{wp} , і ширини b_{wp} установлювальної бази, а також коефіцієнту гарантованого відступу, який приймаємо рівним 0,9 за формулами:

$$l_{\Pi} \leq 0,9 \cdot b_{wp}, \quad (1)$$

$$b_{\Pi} \leq \frac{0,9 \cdot l_{wp}}{2}. \quad (2)$$

При використанні опор, перевірка виконання геометричних умов виконується з урахуванням довжини l_{wp} та ширини b_{wp} установлювальної бази. Діаметр опори D_o приймається в два рази менший ширини заготовки та в 4 рази менший довжини заготовки з урахуванням коефіцієнту гарантованого відступу 0,9:

$$D_o \leq \frac{0,9 \cdot b_{wp}}{2}, \quad (3)$$

$$D_o \leq \frac{0,9 \cdot l_{wp}}{4}. \quad (4)$$

Якщо жодна опорна пластина чи опора не задовольнила геометричні умови установлювальної бази на етапі вибору, консультація інженера-технолога є обов'язковою відповідно до розробленої схеми (рис. 1). Результатом роботи вибору установлювальних елементів є сформований список опорних пластин або опор, що задовольняють геометричні та технологічні умови установлювальної бази.

Зазвичай, за напрямну базу обирається поверхня, яка є найбільшою за довжиною. Для покращення роботи алгоритму над вибором установлювальних елементів для реалізації наступних баз виконується перевірка уже сформованого на попередньому етапі списку установлювальних елементів за технологічними та геометричними умовами: тобто йде відсіювання елементів списку, що не задовольняють даний етап по стану та шорсткості поверхні. Після цього здійснюється

геометрична перевірка за довжиною опорної пластини l_{Π} , що залежить від довжини заготовки l_{wp} , а ширина b_{Π} – від висоти поверхні, що реалізує напрямну базу. Для забезпечення надійного базування достатньо однієї опорної пластини, розміри якої необхідно розраховувати з урахуванням коефіцієнта гарантованого відступу 0,9:

$$l_{\Pi} \leq 0,9 \cdot l_{wp}, \quad (5)$$

$$b_{\Pi} \leq 0,9 \cdot h_{wp}. \quad (6)$$

На відміну від пластин, для реалізації напрямної бази необхідно і достатньо двох опор, діаметр яких повинен бути вдвічі меншим за довжину заготовки. Також необхідно враховувати коефіцієнт гарантованого відступу 0,9:

$$D_o \leq 0,9 \cdot h_{wp}, \quad (7)$$

$$D_o \leq \frac{0,9 \cdot l_{wp}}{2}. \quad (8)$$

Результатом перевірки списку за технологічними і геометричними умовами напрямної бази, формується список елементів, які також будуть входити до списку установлювальної бази. У тому разі коли жоден елемент зі списку установлювальної бази не задовольнив геометричні або технологічні умови напрямної бази, буде здійснено виконання алгоритму, але вже для випадку нової бази (напрямної). І одразу після перевірки геометричних умов згідно з формулами (5), (6) або (7), (8) відповідно до вибраного типу установлювальних елементів. По аналогії з вибором елементів для установлювальної бази, в разі неможливості підбору установлювальних елементів за їх геометричними параметрами, інженер-технолог повинен самостійно скорегувати вхідні дані, або ввести необхідний набір елементів. Результатом другого етапу алгоритму є сформований список установлювальних елементів для реалізації напрямної бази.

Третій етап характеризується тим що для реалізації опорної бази достатньо однієї опорної пластини чи опори. На цьому етапі здійснюється перевірка списку установлювальних елементів напрямної бази відповідно до умов опорної бази (аналогічно як у випадку з перевіркою списку установлювальної бази для умов напрямної). Перевірка здійснюється за формулами (9), (10) – для опорних пластин, та (11), (12) – для опор.

$$l_{\Pi} \leq 0,9 \cdot b_{wp}, \quad (9)$$

$$b_{\Pi} \leq 0,9 \cdot b_{wp}, \quad (10)$$

$$D_o \leq 0,9 \cdot h_{wp}, \quad (11)$$

$$D_o \leq 0,9 \cdot l_{wp}, \quad (12)$$

За аналогією з першим та другим етапами у випадках невиконання технологічних та геометричних умов інженер-технолог повинен скорегувати чи сформулювати список. Результатом третього етапу алгоритму є сформований список установлювальних елементів для опорної бази.

Результатом роботи всього алгоритму є сформований список конкуруючих варіантів установлювальних елементів, придатних для реалізації технологічних баз деталі корпусного типу, який включає в себе списки елементів для установлювальної, напрямної та опорної баз.

Для систематизації даних при виборі установлювальних елементів основною умовою є створення бази даних, яка містить повний перелік функціональних елементів, їх технологічні та геометричні характеристики. Однією з основних технологічних характеристик є можливість реалізації певної бази конкретним елементом. Також вказується можливість використання функціональних елементів для обробленої чи необробленої поверхні заготовки, поверхні з певною шорсткістю, а також певної форми заготовки. Кожен функціональний елемент повинен мати свій унікальний номер. Фрагмент бібліотеки установлювальних елементів наведено у таблиці 1, де вказано його призначення, тип функціональної поверхні, тип поверхні заготовки, для якої може бути використаний даний елемент.

Для формування списку елементів, необхідних для реалізації схеми базування, розроблено алгоритм, який дозволяє відібрати функціональні елементи з загального списку за стадією обробки поверхні заготовки, її шорсткістю, масою заготовки та геометричними розмірами.

Таблиця 1.

Фрагмент бібліотеки установлювальних елементів

Зображення	УБ	НБ	ОБ	ПНБ	ПОБ	Тип поверхні функціонального елемента	Тип поверхні заготовки
	+	+	+			Плоска	Оброблена
	+	+	+			Плоска	Оброблена
	+	+	+			Плоска	Оброблена
	+	+	+			Плоска	Оброблена
	+	+	+			Рифлена	Не оброблена
	+	+	+			Рифлена	Не оброблена
	+	+	+			Рифлена	Не оброблена
	+	+	+			Плоска	Оброблена
				+	+	V-подібна	Оброблена / оброблена
				+	+	V-подібна	Оброблена / не оброблена
			+		+	Циліндрична	Оброблена
					+	Циліндрична	Оброблена

Це дозволяє значно скоротити список елементів та розподілити які елементи будуть реалізовувати конкретну базу. Але в подальшому формуються конкретні вимоги до функціональних елементів та за ними вибирають необхідний комплект функціональних елементів, що повністю забезпечить виробничі потреби. Розроблений алгоритм інтегровано у систему автоматизованого проектування верстатних пристроїв [28].

Висновки.

Розроблено алгоритм вибору установлювальних елементів верстатних пристроїв на основі конструкторсько-технологічних параметрів оброблюваної заготовки. На прикладі схеми базування корпусної деталі за схемою базування за трьома площинами, виявлено, що на вибір установлювальних елементів впливають технологічні (вид обробки, шорсткість базових поверхонь) та конструктивні (габаритні розміри, геометрична форма заготовки) параметри. Вибір елементів проводиться у автоматизованому режимі, але при виникненні спірних питань, інженер-технолог може корегувати вибрані комп'ютером варіанти та призначати свої комбінації функціональних елементів на основі досвіду.

Список використаних джерел:

1. Ivanov V., Dehtiarov I., Zajac, J. Flexible Fixtures for Parts Machining in Automobile Industry, Proceedings of 2nd EAI Int. Conf. on Management of Manufacturing Systems (MMS-2017) (22-24.11.2017, Slovakia). Slovakia, EAI, 2018, 15 pages. doi: 10.4108/eai.22-11-2017.2274155.
2. Іванов В. О., Карпусь В.Є., Дегтярьов І.М. Конструкторсько-технологічний аналіз сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. № 33 (1205). С. 95–105.
3. Карпусь В.Є., Іванов В.О., Котляр О.В. та ін. Інтенсифікація процесів механічної обробки: монографія/ ред. В.Є. Карпуся. Суми: Сумський державний університет, 2012. 436 с.
4. Bakker O.J., Papastathis T.N., Ratchev S.M., Popov A.A. Recent Research on Flexible Fixtures for Manufacturing Processes. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2013. Vol.6, Issue 2. pp. 107–121. doi: 10.2174/2212797611306020003.
5. Tohidi H., Algeddawy T. Planning of Modular Fixtures in a Robotic Assembly System. Procedia CIRP, 2016. Vol. 41. pp. 252–257. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.090.
6. Ivanov V., Zajac J. Flexible Fixtures for CNC Machining Centers in Multiproduct Manufacturing. EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems, 2018. Vol. 4, Issue 12. e5, doi: 10.4108/eai.10-1-2018.153552.
7. Li H., Chen W., Shi S. Design and Application of Flexible Fixture. Procedia CIRP, 2016. Vol. 56. pp. 528–532. doi: 10.1016/j.procir.2016.10.104.
8. Gothwal S., Raj T. Different Aspects in Design and Development of Flexible Fixtures: Review and Future Directions. International Journal of Services and Operations Management, 2017. Vol. 26, Issue 3. pp. 386–410. doi: 10.1504/IJSOM.2017.081944.
9. Іванов В.О., Карпусь В.Є., Ващенко С.М., Заяць Й., Кармаза А.І. Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв / В.О. Іванов, В.Є. Карпусь, С.М. Ващенко, Й. Заяць, А.І. Кармаза// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. Х.: НТУ «ХПІ», 2017. №17(1239). С. 30–37.
10. Ivanov V., Pavlenko I. Fundamental Approach for Analysis of Dynamic Characteristics of Fixtures, EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems, 2018. Vol. 4, Issue 13. e1. doi: 10.4108/eai.20-3-2018.154366.
11. Menassa R. J., DeVries W.R. Optimization methods applied to selecting support positions in fixture design. ASME Journal of Engineering for Industry, 1991. Vol. 113. pp. 412–418.
12. Meyer R.T., Liou F.W. Fixture analysis under dynamic machining. International Journal of Production Research. 1997. Vol. 35, Issue 5. pp. 1471–1489.
13. Li R., Melkote S.N. Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1999. Vol. 39. pp. 871–883.
14. Roy U., Liou J. Geometric reasoning for re-allocation of supporting and clamping positions in the automated fixture design system. IEEE Transactions. 1999. Vol. 31. pp. 313–322.

15. Tao Z.J., Kumar A.S., Nee A.C. A computational geometry approach to optimum clamping synthesis of machining fixtures. *International Journal of Production Research*. 1999. Vol. 37, no 15. pp. 3495–3517.
16. Liao Y.J., Hu S.J. Flexible multibody dynamics based fixture–workpiece analysis model for fixturing stability. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000. Vol. 40. pp. 343–362.
17. Li B., Melkote S.N. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001, Vol. 18. pp. 701–707.
18. Amaral N., Rencis J.J., Rong Y. Development of a finite element analysis tool for fixture design integrity verification and optimisation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2004, Vol. 21, pp. 411–419.
19. Tan E.T., Kumar A.S., Fuh J.H., Nee A.C. Modeling, analysis and verification of optimal fixturing design. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2004, Vol. 1, no. 2, pp. 121–132.
20. Mihaylov O., Nikolcheva G. An integrate RGR fixture design system. *CBU International Conference on Inovations in Science and Education*. 2017. pp. 1175–1180.
21. Neng W., Zhan W., Rong M. An intelligent fixture design method based on smart modular fixture unit. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 2. pp. 2629–2630.
22. Rétfalvi A. Fixture Design System with Automatic Generation and Modification of Complementary Elements for Modular Fixtures. *Acta Polytechnica Hungarica* 2015, Vol. 19, pp. 163–182.
23. Hunter Alarcon R., Rios Chueco J., Perez Garcia J.M., Vizan Idoipe A. Fixture knowledge model development and implementation based on a functional design approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2010. Vol. 10. pp. 56–66.
24. Nelaturi S., Rangarajan A., Fritz C., Kurtoglu T. Automated fixture configuration for rapid manufacturing planning. *Computer-Aided Design*, 2014. Vol. 9. pp. 160–169.
25. Gaoliang P., Wenjian L., Haiquan Y. A desktop virtual reality-based interactive modular fixture configuration design system. *Computer-Aided Design*. 2010. Vol. 12. pp. 432–444.
26. Wu Y., Gao S., Chen Z. Automated modular fixture planning based on linkage mechanism theory. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2008. Vol. 11. pp. 38–49.
27. Vichare P., Nassehi A., Newman S.T. Unified representation of fixtures: clamping, locating and supporting elements in CNC manufacture. *International Journal of Production Research*. 2010. Vol. 16. pp. 5016–5032.
28. Ivanov V., Vashchenko S., Rong Y. Information Support of the Computer-aided Fixture Design System. *Proc. of 12th Int. Conf. ICTERI'2016 (21–24.06.2016, Kyiv), Ukraine, CEUR-WS.org*, online CEUR-WS.org/Vol-1614/paper_37.pdf.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК 621.967

В.Л. Калюжний, Д.В. Касян*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***АНАЛІЗ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВПЛИВУ ОСЬОВОГО ЗАЗОРУ НА НЕПОВНІСТЮ ЗАКРИТЕ ВІДРІЗАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ КРУГЛОГО ПРОКАТУ ЗСУВОМ У ШТАМПІ НА ПРЕСІ**

Показана та описана схема неповністю закритого відрізання заготовок із круглого прокату в штампі на пресі. Методом скінченних елементів з використанням програми DEFORM-3D створені математичні моделі та проведений комп'ютерний аналіз вказаного процесу для отримання заготовок із середньовуглецевої сталі. Використана пластична зі зміцненням модель металу. Встановлений вплив величини осьового зазору між рухомих та нерухомих ножами на енергосилові параметри відрізання, напружений стан в осередку деформації при максимальному зусиллі відрізання та кінцеві напружений та деформований стан в момент відокремлення заготовки від прутка. Визначені залежності зусиль, які виникають на рухомому ножі напрямку переміщення рухомого ножа і в поперечному напрямку, від його переміщення. Приведені розподіли компонент напружень при максимальному значенні зусилля відрізання. Проведена оцінка питомих зусиль на ножах при відрізання. Визначено вплив величини зазору між ножами на напрямок розвитку тріщини у прутку при відрізання. Установлені форми і розміри заготовки після відрізання. По розрахункових даних розроблена конструкція штампа для неповністю закритого відрізання заготовок.

Ключові слова: відрізання заготовок; круглий прокат; метод скінченних елементів; зусилля відрізання; тулочний ніж; напруження; деформації; форма і розміри заготовок.

В.Л. Калюжний, Д.В. Касян**АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ОСЕВОГО ЗАЗОРА НА НЕПОЛНОСТЬЮ ЗАКРЫТУЮ ОТРЕЗКУ ЗАГОТОВОК ИЗ КРУГЛОГО ПРОКАТА СДВИГОМ В ШАМПЕ НА ПРЕССЕ**

Показана и описана схема неполностью закрытой отрезки заготовок из круглого проката в штампе на прессе. Методом конечных элементов с использованием программы DEFORM-3D созданы математические модели и проведен компьютерный анализ указанного процесса для получения заготовок из среднеуглеродистой стали. Использована пластическая с упрочнением модель металла. Установлено влияние величины осевого зазора между подвижным и неподвижным ножами на энергосиловые параметры отрезки, напряженное состояние в очаге деформации при максимальном усилии отрезки и конечное напряженное и деформированное состояние в момент отделения заготовки от прутка. Определены зависимости усилий, которые возникают на подвижном ноже в направлении перемещения ножа и в поперечном направлении, от его перемещения. Приведены распределения компонент напряжений при максимальном значении усилия отрезки. Проведена оценка удельных усилий на ножах при отрезке. Определено влияние величины зазора между ножами на направление развития трещины в прутке при отрезке. Установлены формы и размеры заготовок после отрезки. По расчетным данным разработана конструкция штампа для неполностью закрытой отрезки заготовок.

Ключевые слова: отрезка заготовок; круглый прокат; метод конечных элементов; усилия отрезки; напряжения; деформации; форма и размеры заготовок.

V. Kaliuzhnyi, D. Kasian**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE AXIAL GAP ON THE INCOMPLETELY CLOSE CUTTING PROCESS OF A ROUND METAL RODS WITH SHEAR IN PRESS DIE BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

The scheme of incompletely close cutting of round-rolled billets in a press on a press is shown and described. The finite element method using the DEFORM-3D program created a mathematical model and conducted a computer analysis of the process for obtaining billets from medium carbon steel. Used plastic with hardening metal model. The influence of the size of the gap between moving and stationary knives on the energy-power cutoff parameters, the stressed state in the deformation cell and the final deformation state at the time of the workpiece separation from bar are found. The dependences of the cutting forces that arise on the moving knife in the direction of movement of the knife and in the transverse direction, from its movement are established. The distribution of stress components at the maximum value of the cutoff effort is shown. The evaluation of the specific force on the knives in the segment. The influence of the size of the gap between the knives on the direction of crack development in a bars with a piece is determined. The shapes and dimensions of the blanks after cutting are established. According to the calculated data, a stamp design was developed for an incompletely closed cutting of workpiece.

Keywords: cutting of workpiece; round rods; finite element method; cutting force; movable plate cutter; sleeve cutter; stress; strain; blade knife; stress; strain; the shape and size of the workpieces.

Для виготовлення виробів процесами холодного об'ємного штампування в серійному і масовому виробництвах використовують калібровані заготовки, які отримані із сортового прокату відрізанням зсувом в штампах на пресах. Процес відрізання зсувом в штампах на пресах

характеризується високою продуктивністю та являється практично безвідхідним в порівнянні з отриманням заготовок на токарних верстатах. Основи теорії процесів відрізання, рекомендації по конструктивних, енерго-силових режимах та по проектуванню штампового оснащення для різних схем відрізання викладені в джерелі [1]. По останніх даних відрізанням заготовок зсувом в штампах отримують заготовки діаметром до 80 мм [2]. У наведеному джерелі приведені рекомендації по розташуванню прутків відносно напрямку сили відрізання, які дозволяють зменшити енерго-силові режими відрізання. В останній час в області розділення сортового прокату на заготовки відбувається пошук шляхів підвищення точності форми і розмірів отриманих заготовок. В роботах [3-5] показано, що створення додаткового гідростатичного тиску в осередку деформації при відрізання заготовок дозволяє суттєво підвищити точність форми зовнішньої поверхні та торців відокремленої заготовки. Для цього запропоновані відповідні конструкції штамів. Використання обертально-поступального руху ножів при відрізання також забезпечує підвищення якості отриманих заготовок [6,7]. Покращення якості в напівфабрикатів і виробів в розділових процесах обробки металів тиском, зокрема і при відрізання заготовок із прутків круглого і фасонного перерізу, забезпечується створенням нового спеціалізованого пресового обладнання для вказаних процесів [8,9].

Актуальними задачами для відрізання заготовок із прутків в штампах є подальше доскональне дослідження закономірностей відрізання, силових режимів, питомих зусиль на ножах з урахування комплексного впливу конструктивних і технологічних факторів, які впливають на цей процес. Такі задачі можна вирішити шляхом комп'ютерного моделювання з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) [10-12]. Особливо це важливо для способу неповністю закритого відрізання, який широко використовують для виробництва мірних вихідних заготовок під подальше холодне об'ємне штампування виробів різноманітної конфігурації.

Метою роботи є використання метода скінченних елементів для встановлення впливу осьового зазору на параметри неповністю закритого відрізання заготовок із круглого прутка в штампі на пресі шляхом моделювання в програмі DEFORM3D.

Схема на початку процесу неповністю закритого відрізання заготовок із круглого прокату в штампі та розрахункові схеми зображені на рис. 1. Схема з позначеннями на початку відрізання показана на рис. 1а. Пруток 1 діаметром d подається через втулочний ніж 2 отвір діаметром d_n , який розміщений в корпусі 3. Корпус 3 закріплений на нижній плиті 4 штампа. Переміщення прутка через отвір у рухомому втулочному ножі 5, який встановлений у корпусі 6 та закріплений до верхньої плити 7 штампа, обмежується упором 8. Упор 8 визначає довжину заготовки l , яка відокремлюється від прутка. Ширина обох ножів становить величину b . Між отворами ножів і прутком має місце поперечний зазор z_n для вільного переміщення прутка. Також має місце осьовий зазор z_{oc} між ножами. Зусилля відрізання P_B прикладається за допомогою переміщення рухомого ножа. По такій схемі із прутка діаметром $d=10$ мм із сталі 45 відрізання зі швидкістю $V_0=5$ мм/с та коефіцієнтом тертя між прутком і ножами $\mu=0,12$ відрізання підлягали заготовки з відношенням $l/d=1,5$. Величина поперечного зазору складала $z_n=0,25$ мм, а діаметр отворів ножів відповідно дорівнював $d_n=10,25$ мм при ширині ножів $b=12$ мм. Досліджувався вплив осьових зазорів $z_{oc}=0,10; 0,25$ і $0,50$ мм. На рис. 1б наведена в розрізі в площині xz розрахункова схема на початку відрізання. Пруток 1, який розподілений на скінченні елементи, встановлений в рухомому 2 та нерухомому 3 ножах. Для вибору пресового обладнання зусилля відрізання P_B визначали в напрямку віс iz , а розпираюче зусилля P_p на ножах для проектування штампового оснащення розраховували в напрямку вісі x . Розрахункова схема при максимальному значенні зусилля відрізання показана на рис. 1в. На цій стадії відрізання на верхній поверхні частини прутка, що відокремлюється, утворюється ум'ятинна від рухомого ножа, а на нижній поверхні має місце утяжина. При цьому, по причині наявності поперечного зазору, має місце нахил прутка і частини, що відокремлюється, на певний кут. Розрахункова схема в момент відокремлення заготовки від прутка приведена на рис. 1г.

Моделюванням встановлені зусилля відрізання, розвиток напружено-деформованого стану в осередку деформації при відрізання та кінцеві форми і розміри отриманих заготовок. На рис. 2 зображені силові режими відрізання з різними величинами осьового зазору z_{oc} . Залежності зусиль відрізання P_B і P_p , які виникають на рухомому ножі від його переміщення наведені на рис. 2а. Для розглянутих величин z_{oc} вказані зусилля зростають до певної величини переміщення рухомого ножа, а потім зменшуються до кінця відрізання. При відрізання із $z_{oc}=0,1$ мм зусилля P_B зусилля P_B досягає максимуму при переміщенні ножа 1,3 мм, а зусилля P_p – при переміщенні 4,8 мм (рис. 2а). Збільшення зазору до $z_{oc}=0,25$ мм приводить до зростання зусилля відрізання P_B та

зменшення розпираючого зусилля P_p на рухомому ножі (рис. 2б). При цьому найбільші значення цих зусиль виникають при переміщеннях приблизно в два рази більших, чим в попередньому випадку.

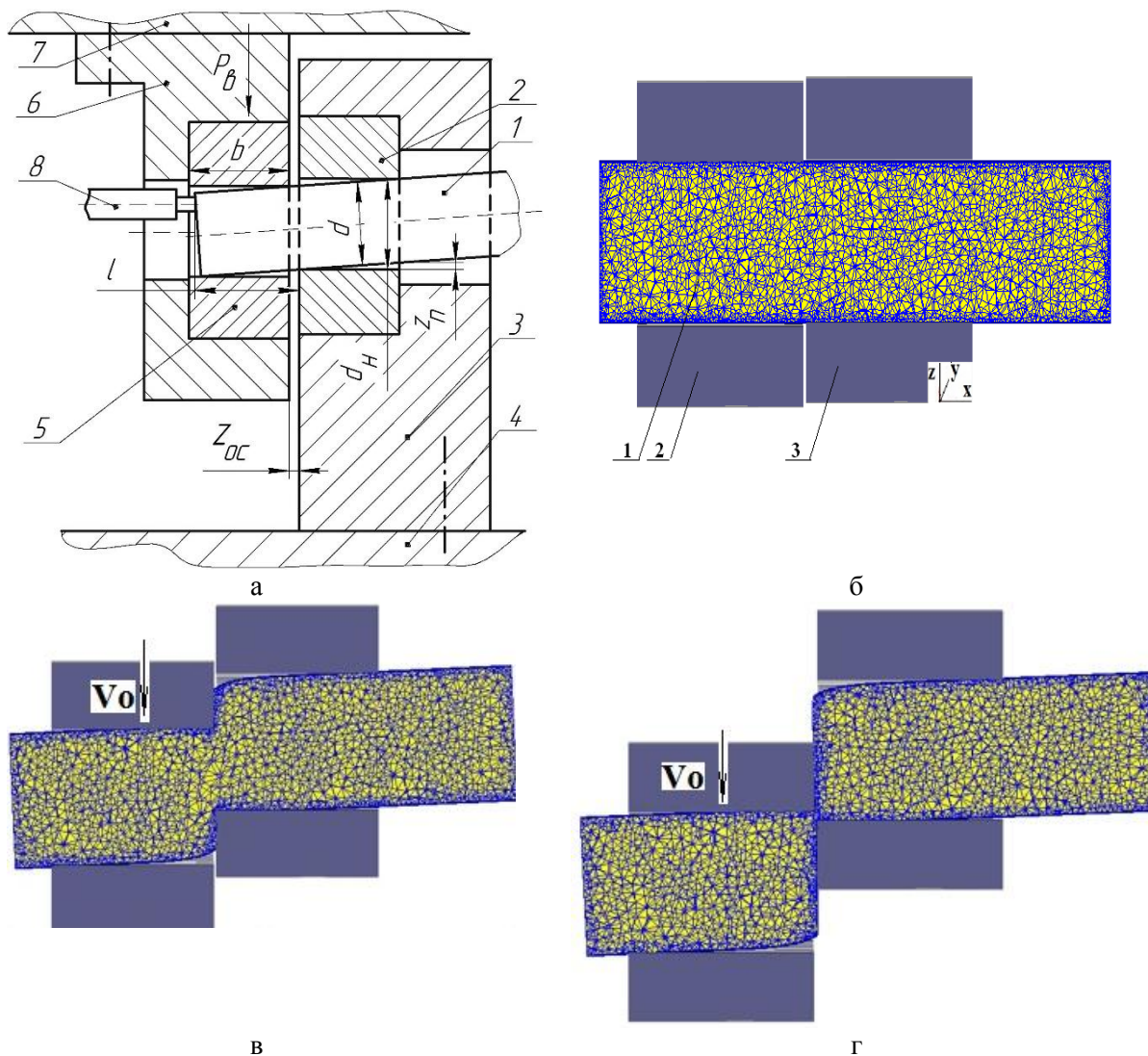


Рис. 1. Схема неповністю закритого відрізання та розрахункові схеми: а – схема на початку неповністю закритого відрізання, б – розрахункова схема на початку відрізання, в – розрахункова схема при максимальному зусиллі відрізання, г – розрахункова схема в момент відокремлення заготовки

Подальше збільшення величини осьового зазору приводить до зменшення величини зусилля P_B та зростання зусилля P_p (рис. 2в). Залежність максимального значення зусилля відрізання P_B від величини осьового зазору z_{oc} приведена на рис. 2г. Крім того варто відмітити що розпираюче зусилля при зазорі $z_{oc} = 0,25$ мм складає приблизно $P_p = 0,25 P_B$, тоді як при двох інших зазорах - $P_p = 0,5 \div 0,6 P_B$.

Для оцінки питомих зусиль на контактуючих поверхнях між ножами і прутком при відрізанні та причини утворення утяжини був визначений напружений стан при максимальних значеннях зусилля відрізання. На рис. 3 наведений розподіл напружень σ_z в перерізі прутка по площині zx для відрізання із зазором $z_{oc} = 0,25$ мм, при якому зусилля відрізання має найбільше значення. На вказаних поверхнях стискаючі напруження σ_z досягають величини -2280 МПа. При таких питомих зусилля для підвищення стійкості ножів їх необхідно виготовляти бандажованими.

Причиною утворення утяжин при неповністю закритому відрізанні являються значні розтягувальні напруження σ_x . Найбільші величини таких напружень виникають при відрізанні із зазором $z_{oc} = 0,5$ мм. На рис. 4 показаний розподіл напружень σ_x при максимальному зусиллі P_B для

$z_{oc} = 0,5$ мм. В нижній області частини прутка, що відокремлюється, має місце зона з розтягувальними напруженнями величиною $\sigma_x = 500$ МПа. Аналогічна зона з такими напруженнями виникає і у верхній частині самого прутка. Тут також утворюється утяжина. Виникнення утяжин разом з ум'ятинами приводить до овальності торців на заготовках.

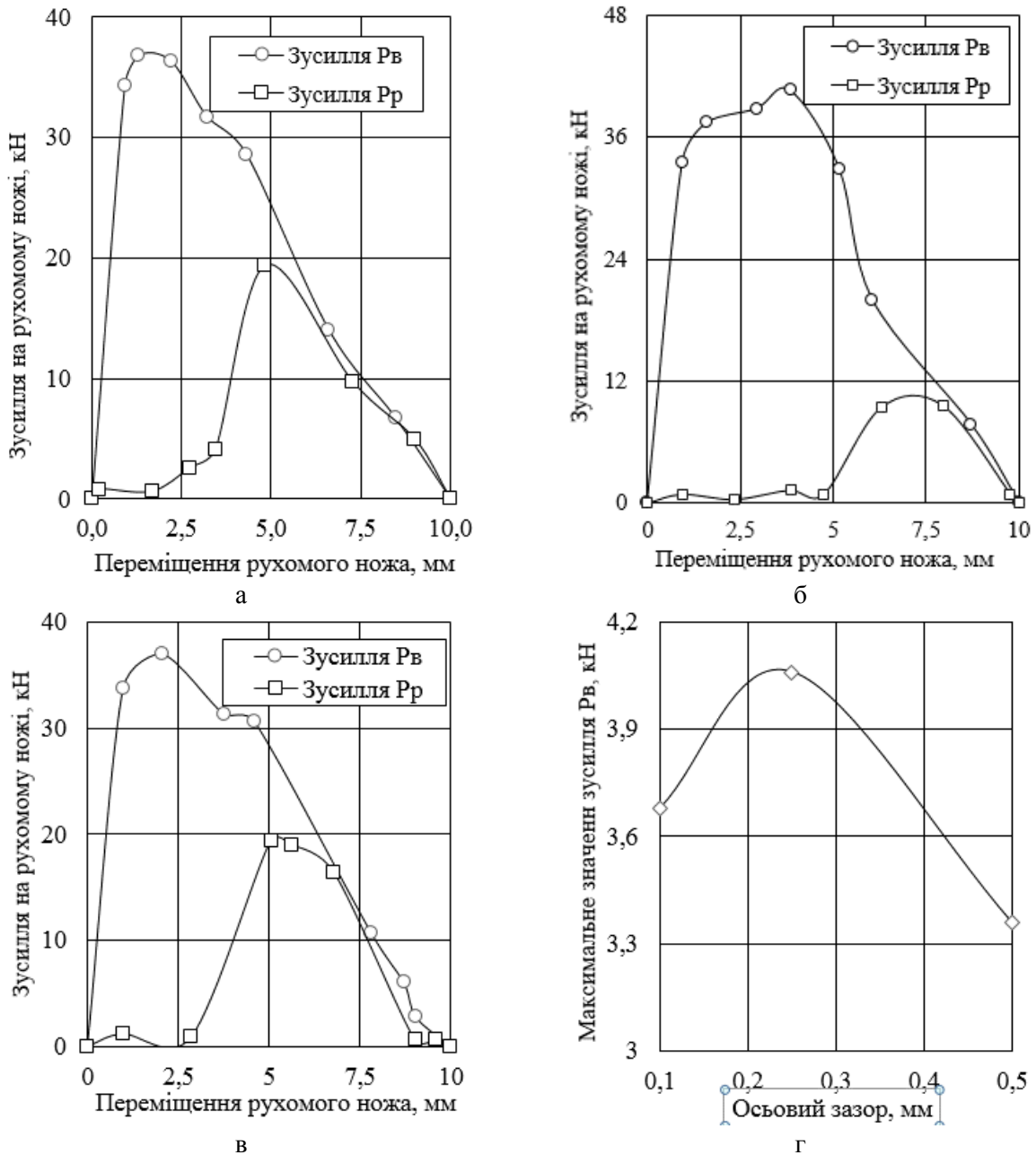


Рис. 2. Силові режими відрізання з різними величинами осьового зазору. Залежності зусиль P_v і P_p від переміщення рухомого ножа: а - $z_{oc} = 0,10$ мм, б - $z_{oc} = 0,25$ мм, в - $z_{oc} = 0,5$ мм, г - залежність величини максимального зусилля P_v від осьового зазору z_{oc}

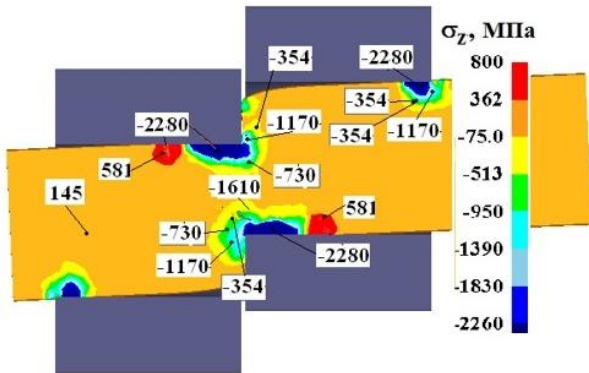


Рис. 3. Розподіл напружень σ_z при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,25$ мм

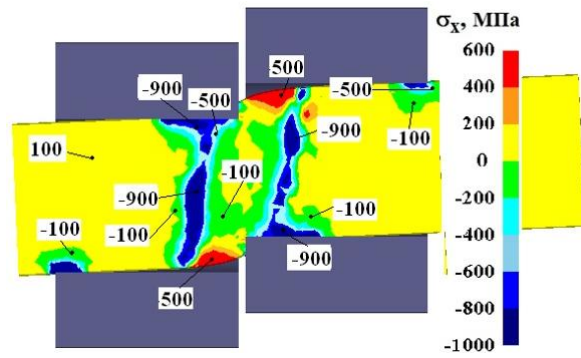


Рис. 4. Розподіл напружень σ_x при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,5$ мм

Напрямок розвитку тріщин від нерухомого до нерухомого ножів та величину осередку деформації при відрізанні можна визначити по розподілу інтенсивності напружень σ_i . На рис. 5 наведений розподіл напружень σ_i при відрізанні із зазором $z_{oc}=0,25$ мм. Області напружень у межах $\sigma_i=809\div 925$ МПа розташовані практично на одній лінії по висоті прутка, тому траєкторії розвитку тріщин співпадають. Осередок деформації у частині прутка, що відокремлюється, та у самому прутку розповсюджується на глибину до 3 мм, що можна визначити по зонам розподілу з величиною $\sigma_i=\sigma_{0,2}=400$ МПа (тут $\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості сталі 45). Розміри осередка деформації зберігаються до кінця відрізання. На рис. 6 приведений розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в момент відокремлення заготовки від прутка при відрізанні із зазором $z_{oc}=0,25$ мм.

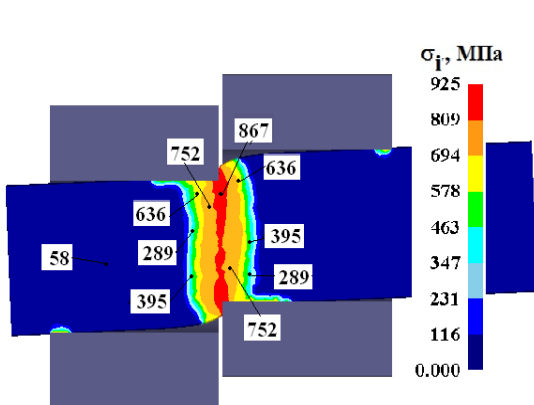


Рис. 5. Розподіл інтенсивності напружень σ_i при максимальному зусиллі відрізання із $z_{oc}=0,25$ мм

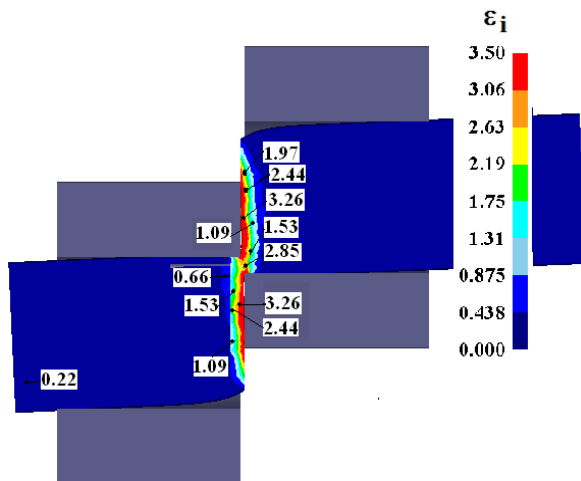
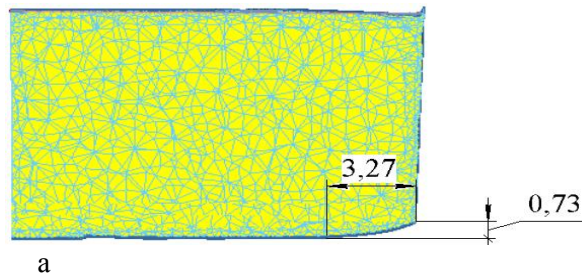
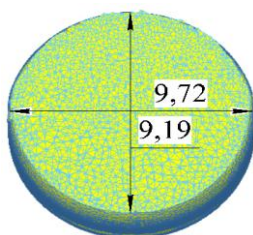


Рис. 6. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в кінці відрізання із $z_{oc}=0,5$ мм

Величина зазору z_{oc} впливає на форму і розміри отриманих заготовок. На рис. 7 наведені форма і розміри заготовок в двох перерізах по місцю відокремлення – по площині z_y та по площині z_x . Збільшення величини зазору приводить до зменшення овальності торів та збільшення утяжини. Після відрізання із $z_{oc}=0,1$ мм довжина утяжини складає 3,27 мм, висота



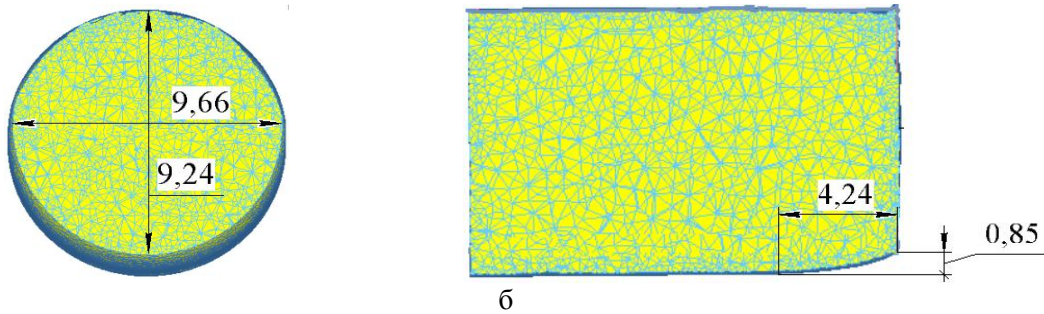


Рис. 7. Форма і розміри заготовок після відрізання: а – із $z_{oc}=0,1$ мм, б - із $z_{oc}=0,5$ мм

0,73 мм, а відношення розмірів овала торця $\delta = 9,72/9,19=1,06$ (рис. 7а). Збільшення зазору до $z_{oc} = 0,5$ мм приводить до зростання ширини і висоти утяжини відповідно до 4,24 мм і 0,85 мм, а відношення розмірів овала зменшується до $\delta = 9,66/9,24=1,04$.

По результатах розрахунків спроектована конструкція загального вигляду штампальця неповністю закритого різання, яка зображена на рис. 8. Нерухомий втулочний ніж 1 встановлений в корпусі 3, який кріпиться за допомогою чотирьох гвинтів 10 до нижньої плити 5 штампальця. В нижню плиту 5 запресована направляюча втулка 8. Аналогічна втулка 9 розміщена в плиті 6, яка за допомогою чотирьох гвинтів 17 прикріплена до корпусу 3. Втулки 8 і 9 служать направляючими для рухомої обойми 7. Обойма 7 представляє собою прямокутну частину з двома циліндричними колонками для направлення в плитах 5 і 6. В прямокутній частині встановлений бандажований рухомий втулочний ніж 2. До обойми 7 за допомогою гвинтів 21 прикріплені два кутники 22. Через отвори у кутниках проходять два гвинти 12, які додатково фіксують плити 5 і 6 між собою. При цьому кутники спираються на дві пружини 13, що призначені для повертання рухомого ножа в вихідне положення після відрізання. Зворотній рух обойми обмежений двома регулювальними гвинтами 11 для забезпечення співпадіння вісей ножів 1 і 2 в вертикальному напрямку. Довжина заготовки, що відрізається визначається рухомим упором 15, який прикріплений до гвинта 23 з гайкою 16, що спирається на пружину 20. Також на гвинт 23 накручується накидна гайка 19. Сам гвинт 23 з упором 15 рухається в корпусі 14, який зафіксований до плити 5 за допомогою гвинтів 10. Гайка 4 і контргайка 15 призначені для регулювання осевого зазору між нерухомим 1 і рухомим 2 ножами. В вихідному стані вісі ножів 1 і 2 співпадають завдяки гвинтам 11 і попереднього стискання пружин 13, що притискають обойму 7 до гвинтів 11. Пруток подається через отвір у гайці 4, нерухомий ніж 1 і рухомий ніж 2 до підпружиненого упору 15, який спрацьовує при натисканні на накидну гайку 19. Після повертання упору назад 15 під дією пружини 13 виконується відрізання шляхом прикладання навантаження від повзуна пресу на обойму 7 та переміщення її вниз. Виштовхування заготовки із рухомого ножа 2 після повертання обойми 7 в вихідне положення виконується наступною подачею прутка.

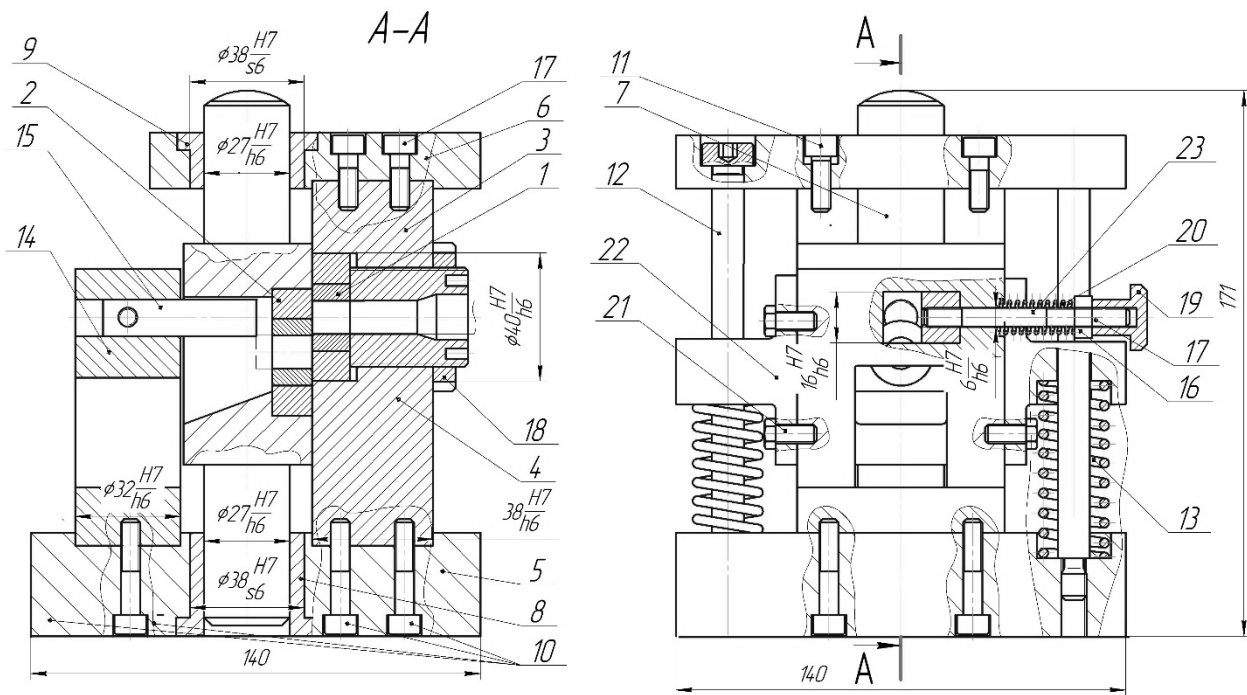


Рис. 8. Конструкція штампу для неповністю закритого відрізання

Висновки. За допомогою МСЕ створені моделі та проведений комп'ютерний аналіз по впливу осевого зазору при неповністю закритому відрізання на силові режими, напружено-деформований стан в осередку деформації при відрізання та кінцеві форми і розміри отриманих заготовок. Встановлені величини зусилля відрізання, зусилля розпору ножів при відрізання. Проведена оцінка питомих зусиль на ножах при максимальному зусиллі відрізання. Показані причини виникнення овальності торців та утворення утяжин на отриманих заготовках. Запропонована конструкція штампу для розділення круглого прокату на заготовки шляхом неповністю закритого відрізання в штампі на пресі.

Список використаних джерел:

1. Соловцов С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С.С. Соловцов // – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Роганов Л.Л. Разделение сортового проката больших поперечных сечений способом отрезки сдвигом / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2010. №2(23). – С. 131-141.
3. Маркин Н.И. Технологические параметры отрезки коротких точных заготовок в штампах в состоянии всестороннего сжатия / Н.И. Маркин, Э.А. Кравцова, С.А. Москвитин и др. // - Заготовительное производство в машиностроении: Москва, 2010. №6. – С. 21-24.
4. Алифанов А.В. Оптимизация процесса рубки в штампах точных заготовок из прутка / А.В. Алифанов, А.М. Милукова, Л.Л. Сотник // Сб. статей XIII Межд. науч.-практ. конф. «Высокие технологии, экономика, промышленность». Т. 2, Часть 2: Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 18-21.
5. Алифанов А.В. Полузакрытый штамп для рубки сколом высокоточных прутковых заготовок / А.В. Алифанов, Л.Л. Сотник // Весник БарГУ. Серия: Физико-технические науки. – Барановичи: ГУ, 2013, № 1. - С. 38-43.
6. Карнаух С.Г. Применение критериев разрушения материалов для выбора способа разделения сортового проката / С.Г. Карнаух, М.А. Винников, Д.С. Карнаух, // - Металлообработка: Санкт-Петербург, 2011, №1(61). – С. 35-41.
7. Диамантопуло К.К. Качество реза и параметры точности заготовок при отрезке в штампах вращающимся инструментом / К.К. Диамантопуло // Известия Московского ГТУ «МАМИ». Т2, 2013. – С. 271-276.
8. Роганов Л.Л. Перспективные направления развития оборудования для безотходного разделения сортового проката на мерные заготовки / Л.Л. Роганов, Н.В. Чоста // Обработка материалов давлением. – Краматорск: ДГМА, 2013. №3(36). – С. 207-212.

9. Роганов Л.Л. Разработка нового типа кузнечно-штамповочного оборудования для разделительных операций / Л.Л. Роганов, С.Г. Карнаух, Н.В. Чоста // - *Металлообработка*: Санкт-Петербург, 2010. №6(60). – С. 28-34.

10. Songa J.L. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained stat / J.L.Songa, Y.T. Lia, Z.Q. Liua // - *Materials Science and Engineering*, 2009, Vol. 499. - Pp. 225-229.

11. Ishiguro T. Deformation analysis of shearing process using results / T. Ishiguro, Y. Yoshida, N. Yukawa // *Materials Transactions.-The Japan Institute of Metals*, 2009. - Vol. 50, No. 7. - Pp. 1671 – 1677.

12. Калюжний В.Л. Аналіз методом скінченних елементів процесу неповністю відкритого відрізання заготовок із круглого прокату зсувом у штампі на пресі / В.Л. Калюжний, О.С. Ярмоленко // *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудування та металургії», Харків: НТУ «ХП», 2018, № 23 (1306). - С. 28-33.

Рецензенти:

Баглюк Геннадій Анатолійович, д.т.н., с.н.с, заступник директора з наукової роботи ІПМ НАН України;

Гожій Сергій Петрович, д.т.н., доцент, професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

УДК 629.083: 621-113

Д.М. Клец, О.І. Назаров, Є.М. Шпінда*Харківський національний автомобільно-дорожній університет***ПОТЕНЦІЙНА МОЖЛИВІСТЬ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИРОЩЕННЯ ВПОВІЛЬНЕННЯ ЛЕГКОВИМИ АВТОМОБІЛЯМИ ПІД ЧАС ЕКСТРЕНИХ ГАЛЬМУВАНЬ В РІЗНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ**

Розроблено методику реалізації відносно більшої величини уповільнення двовісних автомобілів під час екстрених гальмувань у різних експлуатаційних умовах, яка полягає в тому, що у початковий момент гальмування нормальні навантаження на колесах задньої осі, при фазі процесу гальмування з заблокованими колесами, мають більші прирощення, ніж у фазі з заблокованими колесами. Якщо у цей час реалізувати відповідні прирощення величин гальмівних сил, прикладених у п'ятні контакту задніх коліс із дорогою, то можна забезпечити більше уповільнення двовісного автомобіля за даних експлуатаційних умов.

Ключові слова: двовісний автомобіль, екстрене гальмування, експлуатаційні умови, уповільнення.

Д.М. Клец, А.И. Назаров, Е.М. Шпинда*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет***ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИРАЩЕНИЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ЛЕГКОВЫМИ АВТОМОБИЛЯМИ ПРИ ЭКСТРЕННЫХ ТОРМОЖЕНИЯХ В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ**

Разработана методика реализации относительно большей величины замедления двухосных автомобилей во время экстренных торможений в различных эксплуатационных условиях, которая заключается в том, что в начальный момент торможения нормальные нагрузки на колесах задней оси, при фазе процесса торможения с заблокируемыми колесами, имеют большее приращение, чем в фазе с заблокированными колесами. Если в это время реализовать соответствующие приращения величин тормозных сил, приложенных в пятне контакта задних колес с дорогой, то можно обеспечить большее замедление двухосного автомобиля при данных эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: двухосный автомобиль, экстренное торможение, эксплуатационные условия, замедление.

D.M. Klets, A.I. Nazarov, E.M. Spinda**POTENTIAL POSSIBILITY FOR IMPLEMENTATION OF INFRINGEMENTS BY TWO TRANSPORT VEHICLES AFTER EXTREMELY STOPPING IN DIFFERENT OPERATING CONDITIONS**

A method has been developed for implementing a relatively large amount of deceleration of two-axle vehicles during emergency braking in various operating conditions, which is that at the initial moment of deceleration normal loads on the rear axle wheels, during the phase of the braking process with non-blocking wheels, have a greater increment than in the phase with locked wheels. If at this time to realize the corresponding increase in the values of the braking forces applied to the fifth contact of the rear wheels with the road, then it is possible to provide more deceleration of the two-axle vehicle under the given operational conditions. With the onset of the phase of the braking process with locked wheels, the growth of normal reactions on wheels and the corresponding increase in the values of the braking forces applied to the fifth contact of the rear wheels with the road fall.

Keywords: two-axle vehicle, emergency braking, operating conditions, deceleration

Постановка проблеми. Питанням дослідження підвищення ефективності гальмування в період експлуатації двовісних транспортних засобів присвячена значна кількість наукових робіт [1-3]. Особливо гостро стоїть проблема підвищення стабільності функціонування гальмівних систем експлуатованих транспортних засобів, не обладнаних електронними системами стеження за процесом гальмування, пов'язана зі зміною гальмівних моментів на колесах [4], що є наслідком нерівномірності розподілу нормальних реакцій [5, 6].

Класично [7, 8] приймається визначення ефективності гальмування транспортного засобу на межі блокування всіх коліс, тобто при заблокованих колесах. Нормативами [10, 11] при цьому встановлюється гранична величина мінімального уповільнення та гальмівного шляху.

Насправді, перед гальмуванням із заблокованими колесами обох осей, у початковий період гальмування транспортний засіб рухається з заблокованими колесами. Цей факт впливає не тільки на розподіл нормальних реакцій між осями, але й на їх величини.

Проблема розв'язувалась у відповідності до плану науково-дослідних робіт за напрямком «Дослідження ефективності функціонування гальмівних систем легкових автомобілів, що експлуатуються».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В літературних джерелах [2, 3, 12-14] вказується, що експлуатаційні фактори, які викликають зміну гальмівних властивостей транспортних засобів, носять випадковий характер і визначаються їх конструктивними та експлуатаційними параметрами. Найбільш важливими з них є положення центру мас, коефіцієнт зчеплення між шиною та опорною поверхнею дороги, коефіцієнт розподілу гальмівних сил, використовуваний спосіб регулювання гальмівних сил, що пов'язано з розподілом нормальних реакцій між осями при гальмуванні, і особливостями конструкції елементів їх гальмівних систем.

Реалізація граничних за значенням гальмівних сил на колесах транспортного засобу, яка забезпечує одночасне доведення до межі блокування передніх і задніх коліс, можлива не тільки в разі прямолінійного руху по горизонтальній опорній поверхні дороги, але й по криволінійній поверхні з фіксованим радіусом повороту або поверхні дороги з ухилом. Ця задача стає більш актуальною з урахуванням аеродинамічної сили [15-17].

З аналізу наукових праць [15-17] відомий факт про те, що коефіцієнт динамічної зміни нормальних реакцій на задній осі транспортного засобу, який рухався по горизонтальній дорозі з найбільшим прискоренням, перед виконанням екстреного гальмування може коливатись у межах 1,15-1,28. Це значить, що величина нормального навантаження на колесах задньої осі в такому разі зростає на 15-28%. Тоді можливим є збільшення й величини гальмівної сили на задній осі. Якщо реалізувати її, то в даних умовах можна досягнути більшої величини уповільнення.

Для рішення такої задачі було розроблено [18, 19] динамічні регулятори гальмівних сил, вхідні сигнали які одержували від спеціальних гальмівних пристроїв, керованих зміною робочого ходу передньої підвіски.

Мета і постановка задачі. Метою роботи є встановлення залежності величини прирощення вповільнення двохосьовими транспортними засобами від експлуатаційних умов при виконанні екстрених гальмувань.

Математична модель і алгоритм рішення задачі. Для двохосьових транспортних засобів, гальмівні системи яких не обладнані АБС, при екстрених гальмуваннях в певних експлуатаційних умовах є можливість реалізації енергії гальмування через наявність запасу нормального навантаження на задніх колесах. У такому разі загальну схему екстреного гальмування зі збереженням курсової стійкості можна подати у вигляді рис. 1.

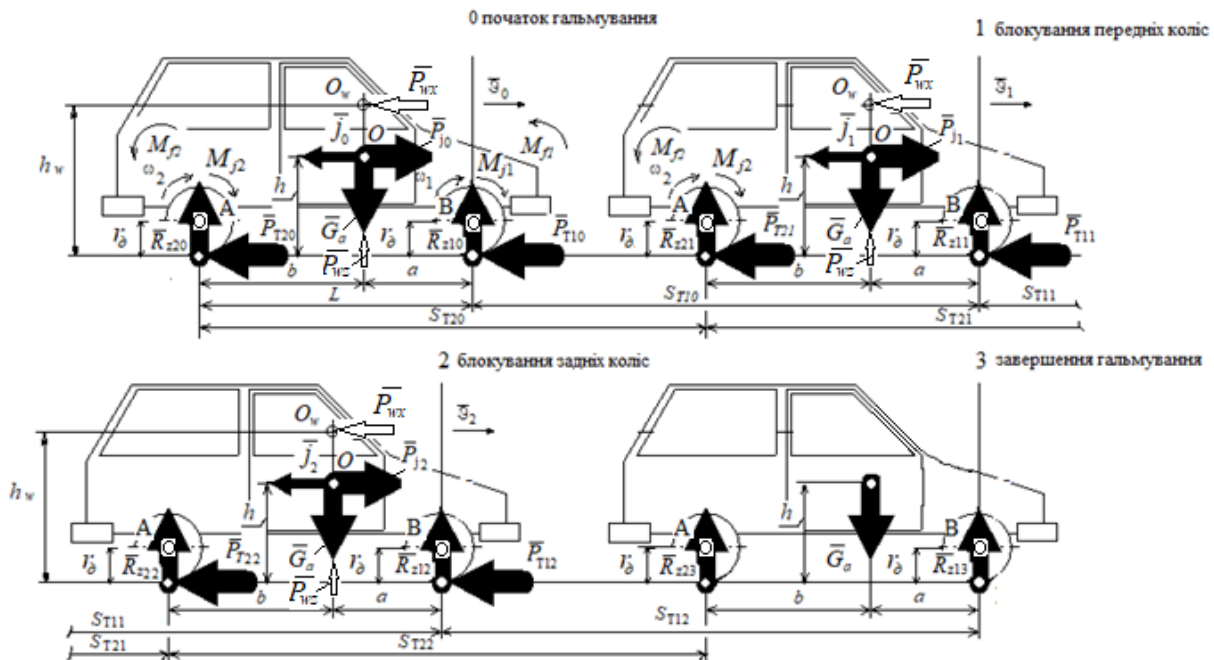


Рис. 1. Схема дії сил при екстреному гальмуванні двовісного транспортного засобу

Розглядаючи рівність моментів відносно точок А і В (див. рис. 1) для випадку гальмування транспортного засобу без блокування коліс обох осей (період 0-1), одержимо

$$P_{T1} \cdot r_d + P_{T2} \cdot r_d + P_j \cdot (h - r_d) + G_a \cdot b - P_{Wz} \cdot b - P_{Wx} \cdot (h_w - r_d) - R_{z1} \cdot L + \sum M_j - \sum M_f = 0; \quad (1)$$

$$P_{T1} \cdot r_D + P_{T2} \cdot r_D + P_j \cdot (h - r_D) + G_a \cdot a - P_{wz} \cdot a - P_{wx} \cdot (h_w - r_D) - R_{z2} \cdot L + \sum M_j - \sum M_f = 0; \quad (2)$$

де r_D – динамічний радіус коліс передньої та задньої осей;

b, h – координати центру мас транспортного засобу;

h_w – висотна координата метацентру транспортного засобу;

L – подовжня база транспортного засобу;

P_{wx} – сила лобового опору транспортного засобу;

P_{wz} – піднімальна аеродинамічна сила транспортного засобу;

R_{z1} – вертикальна реакція на колесах передньої осі транспортного засобу;

$\sum M_j$ – сумарний момент інерції обертальних мас на передньої та задньої осей;

$\sum M_f$ – сумарний момент опору коченню коліс передньої та задньої осей;

P_j – сила інерції, яка діє на транспортний засіб під час гальмування;

G_a – вага транспортного засобу.

У разі блокованих коліс (періоди 1-2 та 2-3, див. рис. 1) відповідні гальмівні сили перетворюються на сили тертя ковзання.

$$\text{З урахуванням того, що } \sum M_j = \sum I_i \cdot \frac{d\omega_i}{dt};$$

$$\sum M_f = M_{f1} + M_{f2} = R_{z1} \cdot f_a \cdot r_{cm} + R_{z2} \cdot f_a \cdot r_{cm} = f_a \cdot r_{cm} (m_a \cdot g - P_{wz});$$

$$P_{wz} = \lambda_z \cdot P_{wx},$$

одержані залежності (1) і (2) приймуть вигляд відповідно

$$\begin{aligned} P_{z1} \cdot L = m_a \cdot g \cdot b + r_D \cdot \varphi \cdot (m_a \cdot g - \lambda_z \cdot P_{wx}) + m_a \cdot j \cdot (h - r_D) - \\ - \lambda_z \cdot P_{wx} \cdot b - \lambda_z \cdot P_{wx} \cdot (h_w - r_D) + \\ + \sum I_i \cdot \frac{d\omega}{dt} - f_a \cdot r_{ct} \cdot (m_a \cdot g - \lambda_z \cdot P_{wx}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{z2} \cdot L = m_a \cdot g \cdot a - r_D \cdot \varphi \cdot (m_a \cdot g - \lambda_z \cdot P_{wx}) - m_a \cdot j \cdot (h - r_D) - \\ - \lambda_z \cdot P_{wx} \cdot a + \lambda_z \cdot P_{wx} \cdot (h_w - r_D) - \\ - \sum I_i \cdot \frac{d\omega}{dt} - f_a \cdot r_{ct} \cdot (m_a \cdot g - \lambda_z \cdot P_{wx}) \end{aligned} \quad (4)$$

де m_a – маса легкового автомобіля;

f_a – коефіцієнт опору коченню коліс передньої та задньої осей;

r_{cm} – статичний радіус колеса;

$\sum I_i$ – сумарні моменти інерції обертальних мас і-ої осі автомобіля;

ω – кутова швидкість обертання коліс і-ої осі легкового автомобіля;

λ_z – частка вертикальної складової в аеродинамічній силі лобового опору;

$P_{wx} = K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot \dot{v}_0^2$ – подовжня складова аеродинамічної сили;

\dot{v}_0 – результативна швидкість;

K_0 – коефіцієнт обтічності кузова автомобіля;

H_a і B_a – висота і ширина легкового автомобіля (площі Міделя).

Оскільки кутове уповільнення заблокованого колеса при гальмуванні може бути визначено,

як $\frac{d\omega}{dt} = \frac{j}{r_k}$, то приймаючи за результативну швидкість, – швидкість транспортного засобу на

початок гальмування, тобто $\mathcal{G}_a = \mathcal{G}_0$ і $r_D = r_k$, в результаті отримуємо із формул (3) і (4) залежності для практичної оцінки нормальних реакцій на передній і задній осях автомобіля, котрі враховують експлуатаційні умови, у яких здійснюється гальмування

$$R_{z1} = \frac{1}{L} \left[\begin{aligned} & m_a \cdot g \cdot (b + x \cdot n) - m_a \cdot g \cdot [f_a \cdot r_{ct} + r_k \cdot (z - \varphi)] + \frac{j}{r_k} \cdot \sum I_i - \\ & - K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot \mathcal{G}_0^2 \cdot [h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) + \lambda_z \cdot (b - f_a \cdot r_{ct})] \end{aligned} \right] \quad (5)$$

$$R_{z2} = \frac{1}{L} \left[m_a \cdot g \cdot (a - z \cdot h) + m_a \cdot g \cdot [f_a \cdot r_{ct} + r_k \cdot (z - \varphi)] + \frac{j}{r_k} \cdot \sum I_i + \right. \\ \left. + K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot \mathcal{G}_0^2 \cdot [h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) + \lambda_z \cdot (a - f_a \cdot r_{ct})] \right] \quad (6)$$

Нехтуючи дією експлуатаційних факторів (повітряний потік, моменти опору коченню коліс та інерції обертових мас та ін.), отримуємо систему рівнянь [7, 8] для граничного класичного випадку ($z = \varphi$)

$$R_{z1}^0 = m_a \cdot g \cdot \left(\frac{b}{L} + \varphi \cdot \frac{h}{L} \right), \quad (7)$$

$$R_{z2}^0 = m_a \cdot g \cdot \left(\frac{a}{L} - \varphi \cdot \frac{h}{L} \right). \quad (8)$$

З огляду на складові сили опору повітря, що діє на автомобіль при гальмуванні (див. рис.1), можна записати вираз

$$m_a \cdot j - P_{wx} = (m_a \cdot g - P_{wx}) \cdot \varphi \quad (9)$$

Звідки після перетворень величина граничного уповільнення при неблокованих колесах всіх осей (період 0-1)

$$j = \frac{(m_a \cdot g - P_{wx}) \cdot \varphi + P_{wx}}{m_a} = \varphi \cdot g + \frac{K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot v_0^2}{m_a} \cdot (1 - \lambda \cdot \varphi) \quad (10)$$

Позначивши аеродинамічний фактор, як

$$\Phi_e = \frac{P_{wx}}{G_a} = \frac{K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot v_0^2}{m_a \cdot g} = \frac{\rho_B \cdot c_x \cdot H_a \cdot B_a \cdot v_0^2}{2m_a \cdot g} \quad (11)$$

де ρ_B – густина повітря;

c_x – коефіцієнт лобового опору автомобіля,

отримаємо залежність, що зв'язує реалізоване уповільнення транспортного засобу з його ваговими, геометричними, аеродинамічними і зчипними властивостями

$$j = g \cdot (z + \Phi_e \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi)), \quad (12)$$

де $z = \frac{j}{g}$ – коефіцієнт гальмування [7, 8], який може досягати, а в деяких випадках, і

перевищувати коефіцієнт зчеплення φ .

Отже, в випадку без блокування коліс (період 1-2) можлива реалізація вповільнення може бути збільшена на величину

$$\Delta_j = \frac{\rho_B \cdot c_x \cdot H_a \cdot B_a \cdot v_0^2}{2m_a} \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi). \quad (13)$$

Якщо у рівнянні (5) ввести наступне позначення

$$\Delta_{R1} = \frac{1}{L} \cdot \left(m_a \cdot g \cdot [f_a \cdot r_{ct} + r_k \cdot (z - \varphi)] - \frac{j}{r_k} \cdot \sum I_i + \right. \\ \left. + K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot v_0^2 \cdot [h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) + \lambda_z \cdot (b - f_a \cdot r_{ct})] \right), \quad (14)$$

а у рівнянні (6)

$$\Delta_{R2} = \frac{1}{L} \cdot \left(m_a \cdot g \cdot (f_a \cdot r_{ct} + r_k \cdot (z - \varphi)) - \frac{j}{r_k} \cdot \sum I_i + \right. \\ \left. + K_0 \cdot H_a \cdot B_a \cdot v_0^2 \cdot [h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) - \lambda_z \cdot (b + f_a \cdot r_{ct})] \right), \quad (15)$$

то з урахуванням класичних залежностей (7) і (8) отримуємо спрощені вирази для нормальних реакцій на передній і задній осі транспортного засобу у вигляді

$$R_{z1} = R_{z1}^0 - \Delta_{R1}, \quad (16)$$

$$R_{z2} = R_{z2}^0 - \Delta_{R2}. \quad (17)$$

Очевидно, що в такому випадку буде виконуватись умова $\Delta_{R1} = \Delta_{R2} \geq 0$.

Це можливо, якщо виконуються нерівності

$$f_a \cdot r_{ct} + r_k \cdot (z - \varphi) \geq 0, \quad (18)$$

$$h_w - r_k \cdot (1 - \lambda_z \cdot \varphi) - \lambda_z \cdot (a + f_a \cdot r_{ct}) \geq 0. \quad (19)$$

Після рішення нерівності (18) отримаємо

$$z \geq \varphi - f_a \cdot \frac{r_{ct}}{r_k}. \quad (20)$$

Для побудови графічної залежності $z = f(\varphi)$ (рис. 2) отримаємо характерні точки: при $z = 0, \varphi = f_a \cdot \frac{r_{ct}}{r_k}$ при $\varphi = 0, z = -f_a \cdot \frac{r_{ct}}{r_k}$

Як показує аналіз графічної залежності (див. рис. 2), поточному значенню φ_1 відповідає таке значення z_1 , що нерівності (20) в такому випадку задовольняють значення від z_1 до z_{max} , тобто має місце приріст уповільнення автомобіля за певних експлуатаційних умов.

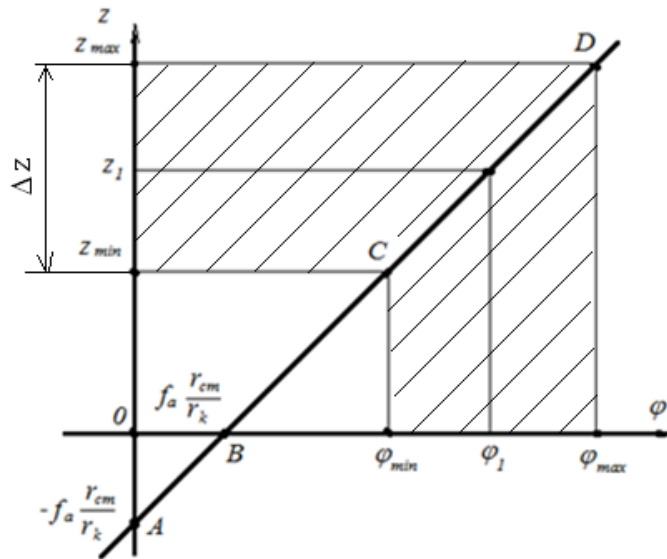


Рис.2. Можливе прирощення уповільнення $z = f(\varphi)$

При вирішенні нерівності (19) після перетворень отримаємо

$$\frac{h_w}{r_k} + \lambda_z \cdot \left(\varphi - f_a \cdot \frac{r_{ct}}{r_k} - \frac{a}{r_k} \right) \geq 1. \quad (21)$$

Оскільки, практично для всіх легкових автомобілів $\frac{h_w}{r_k} > 1, \frac{b}{r_k} > 1, \frac{a}{r_k} > 1, \frac{r_{ct}}{r_k} < 1, \lambda_z < 1$, то нерівність (21) має єдине рішення при

$$\frac{h_w}{r_k} \geq 1 - \lambda_z \cdot \left(\varphi - f_a \cdot \frac{r_{ct}}{r_k} - \frac{a}{r_k} \right). \quad (22)$$

Це означає, що величина Δ_{R2} у виразі (15) завжди буде додатною.

Звідки випливає, що нормальні реакції на задній осі загальмовуваного транспортного засобу, які визначаються з урахуванням експлуатаційних умов, в порівнянні з нормальними реакціями, визначеними за класичною теорією, мають більшу величину. Отже, у такому разі гальмівні моменти на колесах задньої осі автомобіля також бути можуть збільшені, що в результаті може привести до збільшення реалізованого ним уповільнення. Але для цього необхідні спеціальні гальмівні пристрої, які б відслідковували зміну нормальних навантажень на колесах.

Висновки. Одержано залежність (13), яка підтверджує потенційну можливість для реалізації якомога більшої величини уповільнення при виконанні екстрених гальмувань двовісними транспортними засобами у різних експлуатаційних умовах. Це можливо, якщо реалізувати більший гальмівний момент за рахунок збільшення нормальних реакцій на колесах задньої осі на початку гальмування без блокування коліс, що має місце, коли автомобіль рухався з прискоренням, особливо, з урахуванням аеродинамічного фактора.

Для підвищення ефективності функціонування гальмівних систем двохосових

транспортних засобів, у тому числі й обладнаних АБС, слід використовувати розроблені гальмівні пристрої [18], здатні відстежити приріст нормальних реакцій на колесах задньої осі та забезпечити відповідний керуючий вплив гальмівного привода для реалізації найбільшого уповільнення в даних експлуатаційних умовах.

Список використаних джерел:

1. Исследование потенциальных возможностей автомобиля при действии боковой силы в процессе торможения / А.С. Федосов, М.А. Подригало // Автомобильный транспорт. – Киев: Техника, 1980. – Вып.17. – С. 73-78.
2. Русановский А.Е. Влияние эксплуатационных факторов на тормозную динамику автомобиля, оборудованного регуляторами тормозных сил [Текст]: автореф. дис. на соискание наук, степени канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта»/ А.Е. Русановский. – Волгоград, 1982. – 18 с.
3. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин / [Подригало М.А., Волков В.П., Карпенко В.А. и др.]; под ред. М.А. Подригало. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 614с.
4. Подригало М.А. Анализ неравномерности вертикальных реакций на колесах и ее влияние на эксплуатационные свойства автомобиля [Текст] / Подригало М.А. // Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы: IV-ая междунаро. научно-техн. конф., 11-15 апр. 2000 г. – Севастополь: СевГТУ, 2000. – С. 76-79.
5. Карпенко В.А. Влияние межколесного дифференциала на динамические характеристики автомобиля при неравномерном распределении вертикальной нагрузки между колесами / В.А. Карпенко // Механіка та машинобудування. – 2000. – №1. – С. 67-71.
6. Влияние тяговых моментов на динамическое распределение вертикальных реакций между колесами автомобиля / [Подригало М.А., Клец Д.М., Назарко О.А., Потапов Н.Н.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – Вып.39. – С. 64-74.
7. Булгаков Н.А. Исследование динамики торможения автомобиля. Научное сообщение №18/ Булгаков Н.А., Гредескул А.Б., Ломака С.И. – Харьков: Изд-во госуниверситета им. А.М. Горького, 1962. – 36 с.
8. Расчет конструкций, испытания и эксплуатация автобусов и троллейбусов, их агрегатов и узлов / Труды ВКЭИ автобустрома. – Львов: Высшая школа, 1975. – С. 95-110.
9. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання (БЗ №11-12-2010/436): ДСТУ 3649: 2010. – Офіц. вид. – [Чинний від 28.11.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 26 с. – (Національний стандарт України).
10. Автотранспортні засоби. Гальмівні властивості. Терміни та визначення: ДСТУ 2886-94. – Офіц. вид. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 24 с. – (Державний стандарт України).
11. Говорущенко Н.Я. Основы теории эксплуатации автомобилей / Говорущенко Н.Я. – К.: Выща школа, 1971. – 232с.
12. Скутнев В.М. Исследование регулирования тормозных сил легковых автомобилей [Текст]: дис. ...канд.техн.наук: 05.05.03 / Скутнев Василий Михайлович. – Харьков, 1975. – 160 с.
13. Волков В.П. Оценка стабильности распределения тормозных сил между осями колесной машины / Волков В.П. // Автомобильный транспорт. – Харьков: РИО ХНАДУ, 2001. – №7. – С. 72–74.
14. Papashev, O.Kh. Regulators of brake force of passenger automobiles / Papashev, O.Kh., Filipenko, S.V., Podrigalo, M.A., Volkov, V.P., Nazarov, A.I. // Avtomobilnaya Promyshlennost, - Moskau, 2004. - №12. – pp. 17-19
15. Назаров В.И. Перераспределение вертикальных нагрузок при экстренном торможении легкового автомобиля, движущегося в воздушном потоке на горизонтальном участке дороги / Назаров В.И. // Вісник НТУ «ХП»: Серія «Механіка та машинобудування». – Харків, 2014. – №1. – С. 102-110.
16. Назаров В.І. Математичне моделювання перерозподілу реакцій на осях під час екстреного гальмування на дорозі з нахилом / Назаров В.І., Назаров О.І., Назаров І.О. // Вісник НТУ «ХП»: Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків, 2014. - №39(1082). – С. 134-140.
17. Назаров А.И. Перераспределение вертикальных реакций на колесах легкового автомобиля, движущегося в воздушном потоке по горизонтальной дороге с фиксированным радиусом кривизны / Назаров А.И., Назаров И.А., Назаров В.И. // Вісник НТУ «ХП»: Серія «Автомобіле- і тракторобудування». – Харків, 2015. – №8(1117). – С. 57-65.
18. Пат. №1173243 Україна, МПК 2006.01, В60Т 8/1766, В60Т 8/30. Гідравлічний гальмівний привід легкових автомобілів / [Назаров О.І., Назаров І.О., Назаров В.І., Ємельянов В.Л.]; заявник і патентотримач Харків, національний автомобільно-дорожній університет №u201613490; заявл. 28.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл. №12.

Рецензенти:

Волков В.П., докт. техн. наук, професор, ХНАДУ

Бондаренко А.І., докт. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»

Стаття надійшла до редакції 25.10.2018

УДК 69.001.5

Р.В. Кропачов¹, Е.Р. Ахтямова², З.Р. Мухаметзянова³, А.К. Дібіров¹¹ТОВ «Оберон» Казанський національний дослідницький технологічний університет²ТОВ «Оберон» Російський хіміко-технологічний університет ім. Д.І. Менделєєва³ТОВ «Оберон» МБОУ Гімназія №54**ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ У БУДІВНИЦТВІ ПРИ 3D-ДРУЦІ**

У роботі проведено аналіз використовуваних матеріалів при 3D друці в будівництві. При цьому в якості нових матеріалів запропоновано використовувати геополімерний бетон, технологія отримання якого заснована на ідеї використання неорганічних мінеральних речовин і, якому характерні більш високі властивості і довговічність у порівнянні зі звичайним бетоном. Також для підвищення теплоізоляційних властивостей побудованих конструкцій, а також для підвищення фізико-механічних властивостей запропоновано використання нових матеріалів при 3D друці – бетону на основі вирізаного очерету, пресованої соломи, конопляних шипів, застосування легкого бетону і легкого бетону на основі пасом конопель.

Ключові слова: 3D друк, бетон, нові матеріали, будівництво, фізико-механічні властивості.

Р.В. Кропачев¹, Э.Р. Ахтямова², З.Р. Мухаметзянова³, А.К. Дибиров¹¹ООО «Оберон» Казанский национальный исследовательский технологический университет²ООО «Оберон» Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева³ООО «Оберон» МБОУ Гимназия №54**ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ**

В работе сделан анализ используемых материалов при 3D-печати в строительстве. При этом в качестве нового материала предложено использовать геополімерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ и для которого характерны лучшие свойства и долговечность по сравнению с обычным бетоном. Для увеличения теплоизоляции построенных конструкций, а также для улучшения физико-механических свойств предложено использование новых материалов при 3D-печати: бетона на основе вырезанного тростника, пресованной соломы, конопляных шипов, применение легкого бетона и легкого бетона на основе прядей конопля.

Ключевые слова: 3D-печать, бетон, новые материалы, строительство, физико-механические свойства.

R.V. Kropachev¹, E.R. Akhtiamova², Z.R. Mukhametzyanova³, A.K. Dibirov¹¹CEO KNRTU²D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia³Trainee 54 School**APPLICATION OF NEW MATERIALS IN CONSTRUCTION IN 3D-PRINTING**

In work the analysis of used materials is carried out at 3D-printing in construction. At the same time, it is proposed to use geopolymer concrete as new materials, the technology of which is based on the idea of using inorganic mineral substances and which is characterized by higher properties and durability in comparison with conventional concrete. Also, to improve the thermal insulation properties of the constructed structures, as well as to improve the physical and mechanical properties, it is proposed to use new materials for 3D-printing - concrete based on carved cane, pressed straw, hemp spikes, lightweight concrete and lightweight concrete based on hemp weaves.

Key words: 3D-printing, concrete, new materials, construction, physical and mechanical properties.

Постановка проблеми. Технологическое продвижение для определенной страны или сообщества напрямую связано с их экономическим ростом, а технология влияет на экономику посредством создания рабочих мест, роста ВВП, появления новых услуг и отраслей, преобразования рабочей силы, инноваций в бизнесе [11]. Адаптация и эффективное использование новых технологий ранее были связаны с трансформацией рынка, улучшением уровня жизни и более надежной международной торговлей, которые позволяют развивать практически все отрасли экономики [11]. Во всех сферах нашей жизни, в том числе и строительстве, можно постоянно искать новые, более современные методы и технологии, которые отвечают принципам устойчивого развития.

С одной стороны, новые подходы должны быть более эффективными, учитывать сохранение истощаемых ресурсов нашей планеты и оказывать минимальное воздействие на окружающую среду, а с другой – обеспечивать более высокое качество конечного продукта. Строительная сфера в этом плане не исключение. Одной из новых перспективных технологий является технология 3D-печати отдельных конструкций и зданий в целом.

Для строительной отрасли характерно потребление невозобновляемых ресурсов и природных материалов в огромных объемах [8, с. 79]. При этом возникают проблемы, связанные с

низкой производительностью труда и аварийными ситуациями на строительных площадках, сложностью контроля строительных процессов, недостатком квалифицированных рабочих [5, с. 32]. Решением данных проблем является применение 3D-печати [16, с. 62].

Бетон – важный материал, используемый в строительных конструкциях различных сооружений, которые могут испытывать ударные нагрузки. Бетон в строительных конструкциях должен противостоять энергии искусственных и природных сил, приводящих к оседанию и растрескиванию, и поглощать ее (Warszawski, 1998). Использование небольшого количества полипропиленовых волокон в бетоне увеличивает сопротивление его растяжению и вязкости.

Механические свойства полипропиленового армированного железобетона (PFRC) достаточно изучены и широко используются в технике. Однако большинство этих исследований ограничивалось только определенными случаями, о которых писали Танг (Tang, 2004), Жак и Сете (Jacques and Cete, 2004), Vonneau et al (1996), Richard и Cheyrezy (1995).

Во всем мире практики-разработчики пытаются решить проблему подбора строительных материалов для 3D-печати. Поэтому для применения строительной 3D-печати необходимо изучить и разработать новейшие материалы, с улучшенными характеристиками и высокой долговечностью.

Применение обычного бетона для 3D-печати в строительстве возможно, но ограничено, поскольку существуют требования к таким материалам [16, с. 293]. При выполнении оптимизационных процессов 3D-печати должна учитываться сила сцепления слоев материала, а сам материал должен достаточно быстро затвердевать и выдерживать вес нанесенных слоев без протекания процессов деформации. Для обеспечения достаточной прочности и крепкого сцепления между осажденными слоями необходимо снижение временного интервала между нанесением слоев, что достигается применением бетона с улучшенными свойствами. Поэтому актуальным является разработка и применение новых материалов в строительстве при 3D-печати.

Формулирование целей статьи. В данной статье предлагается использовать новые материалы в строительстве при 3D-печати.

Анализ последних исследований и публикаций. Одним из способов осаждения в строительстве с применением бетона является экструзия бетона с использованием цифровых технологий. Как отмечено в [1, с. 29], целью 3D-печати в строительстве является масштабирование настольного 3D-принтера до размера строительной площадки. В настоящее время такие методы недостаточно развиты для промышленного применения, но удается создавать стеновые элементы в лабораторных условиях [7, с. 294, 7 – 12].

Тем не менее сама присадочная технология экструзии может быть применена для эффективного и надежного строительства, причем в промышленных масштабах. Для достижения этой цели и оптимизации процесса необходимо преодолеть два основных ограничения [1, 13 – 16]: во-первых, прочность соединения между смежными слоями, которая является слабой стороной печатной структуры. Сила сцепления будет уменьшаться с временным промежутком между нанесенными слоями [6, 7, 14, 15]. Вторым ограничением является процесс затвердевания материала при 3D-печати с течением времени, т.е. материал должен обладать достаточной твердостью чтобы выдерживать вес осаженных слоев. Данное ограничение приводит к увеличению времени всего строительного производства. Также при выборе состава бетонной смеси учитываются четыре основных параметра: экструдированность, удобоукладываемость, способность к сборке (buildability) и время действия (opentime).

В настоящее время для 3D-печати в строительстве используется широкий спектр компонентов: суперпластификаторы, ускорители, замедлители, минеральные добавки и другие материалы. Для повышения прочности бетона используются различные полимеры и резины, порошки сталей, сплавов титана, никеля, алюминия, меди, а также инструментальные и конструкционные керамики, биосовместимые и нанопропрочненные композиты.

Китайская компания Winsun, занимающая одну из лидирующих позиций в области 3D-печати, успешно применяет стойкий к истиранию состав Crazy Magic Stone [1, 4, 10, 12, 17]. Высокие механические характеристики обусловлены наличием обработанного кварцевого песка и специальной фибры. Winsun также широко использует гипс с добавлением стекловолокна (Glass Fiber Reinforced Gypsum). GFRG содержит 3-25% фибры длиной от 1 до 13 см и диаметром от 5,8 до 100 мкм. Водогипсовое соотношение находится в пределах от 0,25 до 0,60 [1, 4, 10, 12, 17]. Стекловолокно повышает сопротивление состава бетона к трещинообразованию, делает его более пластичным и удобоукладываемым. В композитах с использованием стекловолокна растягивающие напряжения воспринимает на себя фибра, что существенно повышает

сопротивление такого материала растяжению и изгибу.

Изучив свойства армированного полипропиленовым волокном бетона, Karahan и Atis (2011) обнаружили, что добавление объемной доли 0,05 и 0,10% волокна слегка увеличивало или поддерживало прочность бетона, соответственно. При этом, когда добавлялось 0,20% полипропиленового волокна, прочность бетона снижалась.

В работах [4, 9, 10, 12] динамические свойства армированного полипропиленовым волокном бетона были экспериментально исследованы с использованием метода SHPB. Сущность метода приведена в [4, 9, 10, 12]. В исследовании были использованы четыре типа цементных материалов: портландцемент (ПЦ), микрокремнезем (SF), ультратонкая зола (UFFA) и ультратонкий шлак (UFSL). Естественный речной песок с максимальным размером 3 мм использовался для замены ультратонкого кварцевого песка [4, 9, 10, 12]. Также был использован суперпластификатор с коэффициентом уменьшения воды 30%, производимый компанией Jingwei в Гуанчжоу. Стальные волокна были произведены компанией Guo Mao Steelfiber Company, КНР. Образцы представляли собой круглые цилиндры диаметром 40 мм с одинаковой длиной 20 мм. Скорость деформации достигала от 30 до 100 с⁻¹. Результаты показали, что для всех исследуемых видов бетона при различном давлении в камере повышается прочность. Это связано с увеличением доли трещин в бетоне и относительным удлинением с ростом давления, что указывает на более равномерное распределение трещин при меньшем давлении.

Изложение основного материала. На основе анализа публикаций и исследований предлагается применение новых материалов в строительстве при 3D-печати.

При строительстве здания любым известным в настоящее время способом необходимо обеспечить энергоэффективность строительных оболочек, а также всего здания. Альтернативная конструкция стены здания, созданная 3D-печатью, заставляет искать новые методы энергоэффективности.

В качестве новых материалов может быть использован геополлимерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ [2]. Геополлимерный бетон является экологически чистым, а главное его преимущество – простота изготовления. Этот бетон высокоустойчив к коррозии, обладает высокими теплоизоляционными свойствами и быстро застывает. Кроме того, он имеет повышенную степень сцепки с различными поверхностями.

Строительный геополлимерный бетон для 3D-печати обладает улучшенными свойствами и долговечностью. Вследствие его повышенной тиксотропности и текучести появляется возможность регулировать сроки его схватывания при 3D-печати с обеспечением высокой прочности.

Также можно улучшить теплоизоляционные свойства строительных объектов, созданных с помощью 3D-печати, путем укладки энергоэффективной теплоизоляции в пустые стеновые конструкции (рис. 1) [9]. Для этого возможно применение пенополистирола, пенополиуретана, каменной ваты и других теплоизоляционных материалов. Также было предложено применение бетона на основе вырезанного тростника, прессованной соломы, конопляных шипов, использование легкого бетона и легкого бетона на основе прядей конопли. Данные материалы обладают следующими основными свойствами (табл. 1) [13].



Рис. 1. Построение полого строения при 3D-печати: а – армированные волокном, б – усиленные перегородками

Характеристики теплоизоляционных бетонов для 3D-печати

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Вырезанный тростник	400	0,12
	300	0,09
	260	0,078
	220	0,06
Прессованная солома	150 – 250	0,09
	90 – 110	0,045
	73 – 85	0,04 – 0,05
	100	0,054 – 0,065
Конопляные шипы	70 – 90	0,048 – 0,06
Легкий бетон	1000	0,13
	900	0,114
	580	0,073
	420	0,071
Легкий бетон на основе прядей конопли	260	0,075
	360	0,079
	400	0,084

Предложенные материалы позволяют в ближайшем будущем перейти от теории к практике, повысить возможности технологии строительной 3D-печати и сделать процесс строительства быстрым, и эффективным. Эти материалы позволяют улучшить теплоизоляционные свойства построенных конструкций, а также их физико-механические показатели и долговечность.

Процессы 3D-печати различными растворами в основном отличаются толщиной печатного слоя и общей высотой продукта. Толщину экструдированного слоя формирует экструдер с различным размером сопла. Во время печати можно настроить геометрию экструдированного слоя, изменить скорость печати для получения высококачественных строительных продуктов.

Для повышения эффективности печати можно также предложить использовать печатающую головку с несколькими соплами, установленными на разных уровнях один за другим (рис. 2). Принимая во внимание свойства уложенной смеси, расстоянием между экструдерами 1, 3 и 4 можно регулировать расширение возможностей технологии печати и прочности строительных конструкций.

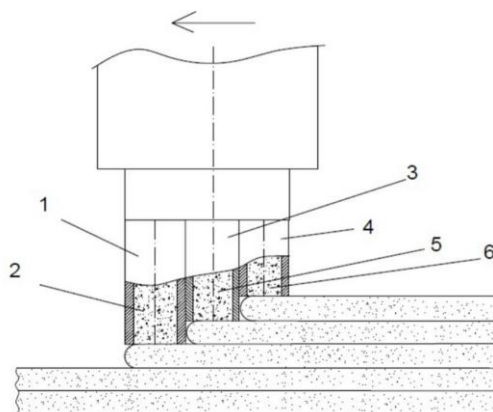


Рис. 2. Печатающая головка с несколькими экструдерами: 1, 3, 4 – экструдеры; 2, 5, 6 – полость с бетоном

Кроме того, можно привести пример принтера с двумя-тремя соплами от Contour Crafting, который делает многослойные стены в один проход. Техника 3D-печати, используемая Contour Crafting, может построить дом диаметром 14,6 м и высотой 3,7 м за менее чем 14 часов. Таким образом увеличивается скорость и эффективность строительства.

Выводы. В работе проведен анализ используемых материалов при 3D-печати в строительстве. В качестве новых материалов предложено использовать геополлимерный бетон, технология получения которого основана на идее использования неорганических минеральных веществ. Для него характерны улучшенные свойства и долговечность по сравнению с обычным бетоном. Для улучшения теплоизоляционных свойств построенных конструкций, а также их физико-механических показателей предложено использование новых материалов при 3D-печати: бетона на основе вырезанного тростника, пресованной соломы, конопляных шипов, а также применение легкого бетона и легкого бетона на основе прядей конопли.

Список использованной литературы

1. 3D-печать в строительстве / [Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С. и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1. – С. 27–46.
2. Геоцемент. Высокотехнологичный материал нового поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://apis-cor.com/about/blog/geocement-new-generation-hightech-material>.
3. Bederina M. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete / Bederina M, Makhloufi Z, Bouziani T. // *Physics Procedia*. – 2011. – №21. – С. 28–34.
4. Conctrucktion. Mega Scale 3D Printing [Электронный ресурс] / [Alwi A., Karayiannis S., Starkey B. та ін.]. – Group 1. Final Report, 11th January 2013. Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey. 2012. – Режим доступа до ресурсу: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20%20Group%201.pdf>.
5. Di Carlo T. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete / Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. // ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. – 2013. – С. V009T10A062-V009T10A062.
6. Grugel R. N. Sulfur “concrete” for lunar applications–Sublimation concerns / Grugel R.N., Toutanji H. // *Advances in Space Research*. – 2008. – Т. 41. – No. 1. – P. 103 – 112.
7. Hager I. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? / I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz // *Procedia Engineering*. – 2016. – No. 151. – P. 292–299.
8. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects / Ibrahim M. I. M. // *Sustainable Cities and Society*. – 2016. – No. 23. – С. 78–93.
9. Joop de Boer. Which Architect Is Winning The 3D Printing Rat Race? [Электронный ресурс] / Joop de Boer // *Pop-Up City*. – 2014. – 1 July. – Режим доступа до ресурсу: <http://popupcity.net/which-architect-is-winning-the-3d-printing-rat-race/>.
10. Khoshnevis B. Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies [Электронный ресурс] / Khoshnevis B. // *Automation in Construction*. – 2004. – Vol. 13, iss. 1. – PP. 5–19. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736>.
11. Kvochko E. “Fiveways technology can help economies” [Электронный ресурс] / Kvochko E. // *World Economic Forum*, 11 April 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.weforum.org/agenda/2013/04/five-ways-technology-can-help-the-economy/> (20 March 2017).
12. Lipson H. *Fabricated. The New World of 3D Printing* / H. Lipson, M. Kurman. – Indiana : Wiley, 2013. – 320 p.
13. Options of sustainable development of region’s territory / Savytskyi M.V., Bondarenko O.I., Babenko M.M. and Benderskyi Yu.V. // *Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2015. – № 4. – С. 157–161.*
14. Perrot A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / Perrot A., Rangedard D., Pierre A. // *Materials and Structures*. – 2016. – Т. 49. – No. 4. – P. 1213–1220.
15. Wallevik J. E. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown / Wallevik J. E. // *Cement and Concrete Research*. – 2009. – Т. 39. – No. 1. – С. 14–29.
16. Warszawski A. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects / Warszawski A., Navon R. // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 1998. – No. 124. – P. 31–41.
17. Zhang J. Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting / Zhang J., Khoshnevis B. // *Automation in Construction*. – 2013. – No. 29. – С. 50–67.

УДК 621.9.06-529-8

О.В. Литвин, І.Р. Ящук, С.Б. Паньков

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

**АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ СИНТЕЗІ
КОНСТРУКЦІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ**

В статті проаналізовано сучасний стан застосування методів і правил пошуку рішення інженерних задач. Проаналізовані евристичні, алгоритмічні та комбіновані методи стосовно їх використання при вирішенні задач машинобудування. Зроблено висновок, що кожний метод ретельно підбирається перед поставленою задачею. Проте з розвитком технологій, пошук ефективніших методів генерування нових рішень постає досить актуальним і сьогодні. Тому використання машинного навчання в задачах технічної творчості дозволить внести в технічні рішення алгоритмічні розрахунки з елементами, притаманними інженеру, складових інтуїції та досвіду, які нерідко стають головними, визначальними факторами успішності розв'язання задач багатоваріантного процесу проектування. Сформульована можливість використання нейронних мереж при пошуку нових технічних рішень. Розроблено передумови алгоритмізації креативного підходу на основі класичних методів пошуку технічних рішень з використанням нейронних мереж. Досліджено сфери застосування й принцип роботи штучних нейронів, а також архітектуру та методи навчання нейронних мереж. Дані дослідження та аналіз дозволять в подальшому уникнути проблем при застосуванні нейронних мереж в нетипових задачах, пов'язаних з особливостями їх навчання та функціонування при проектуванні конструкцій в машинобудуванні.

Ключові слова: синтез, пошук, дослідження, метод, машинобудування, технічне рішення, нейронна мережа, штучний нейрон.

А.В. Литвин, И.Р. Ящук, С.Б. Паньков

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

**АНАЛИЗ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ СИНТЕЗЕ
КОНСТРУКЦИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

В статье проанализировано современное состояние применения методов и правил поиска решения инженерных задач. Проанализированы эвристические, алгоритмические и комбинированные методы относительно их использования при решении задач машиностроения. Сделан вывод, что каждый метод тщательно подбирается перед поставленной задачей. Однако с развитием технологий, поиск эффективных методов генерирования новых решений возникает весьма актуальным и сегодня. Поэтому использование машинного обучения в задачах технического творчества позволит внести в технические решения алгоритмические расчеты с элементами, присущими инженеру, составляющие интуицию и опыт, которые нередко становятся главными определяющими факторами успешности решения задач многовариантного процесса проектирования. Сформулирована возможность использования нейронных сетей при поиске новых технических решений. Разработаны предпосылки алгоритмизации креативного подхода на основе классических методов поиска технических решений с использованием нейронных сетей. Исследованы сферы применения и принцип работы искусственных нейронов, а также архитектура и методы обучения нейронных сетей. Данные исследования и анализ позволят в дальнейшем избежать проблем при применении нейронных сетей в нетипичных задачах, связанных с особенностями их обучения и работы при проектировании конструкций в машиностроении.

Ключевые слова: синтез, поиск, исследование, метод, машиностроение, техническое решение, нейронная сеть, искусственный нейрон.

O. Litvin, I. Yashchuk, S. Pankov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ANALYSIS OF THE BACKGROUND OF THE APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN
THE DESIGN SYNTHESIS IN MECHANICAL ENGINEERING**

The article analyzes the current state of application of methods and rules for finding solutions to engineering problems. Heuristic, algorithmic, and combined methods are analyzed regarding their use in solving engineering problems. It is concluded that each method is carefully chosen for the task. However, with the development of technology, the search for effective methods of generating new solutions appears very relevant today. Therefore, the use of machine learning in the tasks of technical creativity will make it possible to introduce into technical solutions algorithmic calculations with elements inherent to an engineer, components of intuition and experience, which often become the main determining factors in the success of solving problems in a multi-variant design process. The formulated possibility of using neural networks when searching for new technical solutions. The prerequisites for the algorithmization of a creative approach based on classical methods for finding technical solutions using neural networks have been developed. The spheres of application and the principle of operation of artificial neurons, as well as the architecture and training methods of neural networks, have been investigated. The research data and analysis will further allow to avoid problems in the application of neural networks in atypical tasks related to the characteristics of their training and work in the design of structures in mechanical engineering.

Keywords: synthesis, search, research, method, engineering, technical solution, neural network, artificial neuron.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій стимулює науково-технічний прогрес до нових відкриттів, які у свою чергу породжують нові виклики, щодо вдосконалення та створення більш ефективних методів пошуку конструкторсько-технологічних рішень у машинобудуванні. Більшість фахівців змушені шукати нестандартні підходи до вирішення традиційних, що здаються нетворчими, проблем. У зв'язку з цим особливий інтерес набуває питання про методи подібного рішення. Практично всі автори, що займаються питаннями технічної творчості і винахідництва, стверджують про те, що більшість винаходів було зроблено в результаті використання методу проб і помилок.

Тому розробка нових креативних підходів дозволить раціонально організувати пошук нових технічних рішень (ТР), що не тільки підвищить технічний рівень розроблених ТР, але й дозволить скоротити час їх проектування, що так важливо для сучасного інженера з чотирьохрічним терміном навчання та з недостатніми досвідом та практичними навичками.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. У численній літературі, присвяченій проектуванню та технічній творчості, детально розглядаються методи і правила пошуку ідей рішення інженерних задач. Вони дозволяють підвищити ефективність як індивідуальної творчої роботи конструктора, так і ефективність творчої діяльності колективу розробників.

У теперішній час існує велика кількість методів (та їх похідних) пошуку нових ТР, які розрізняються рівнем складності, комплексності, ступенем автоматизації та специфікою застосування. Так, для розв'язання винахідницьких задач використовують класичні *евристичні* (морфологічного аналізу/синтезу (Ф. Цвіккі), мозковий штурм: прямий і обернений (А. Осборн), синектики (В. Гордон), семикратного пошуку (Г.Буш), контрольних питань (Т. Ейлоарт, А. Осборн), метод маленьких чоловічків (Г.Альтшулер), метод гірлянд асоціацій і раптовостей (Г.Буш), метод "Шість капелюхів мислення" (Е.Боно) і ін.) та *алгоритмічні* методи: функціонально-фізичний метод пошукового конструювання (Р. Коллера), алгоритм розв'язання винахідницьких задач (Г.Альтшулер), теорія розв'язань винахідницьких задач (Г.Альтшулер), вепольний аналіз (Г.Альтшулер), узагальнений евристичний метод (О.Половинкін) та ін.

Останніми роками стрімкої популярності набув метод еволюційного моделювання або генетичного алгоритму І. Холланда, який складає теоретичний розділ штучного інтелекту та представлений, як інтелектуальний метод пошуку нових ТР.

Одним із сучасних креативних підходів пошуку нових ТР у верстатобудуванні є диференційно-морфологічний метод структурно-схемного синтезу затискних механізмів Ю.М.Кузнецова. На стадії пошуку структур використовуються евристичні прийоми повного, неповного і комбінованого розчленовування, диференціюючі й інтегруючі функції та поверхні, що дають різні (основні та додаткові) ефекти, а при повному однонаправленому розчленовуванні структури (що синтезуються) відповідають новим принципам затиску або забезпечують нові якості.[1].

Ю.М. Кузнецовим розроблено новий підхід до створення та опису механізмів технологічного обладнання на основі генетико-морфологічного синтезу, за яким елементи системи можна описувати на різних рівнях складності: генетичному, хромосомному, об'єктному, видовому, популяційному, системному, міжсистемному. Даний підхід можна застосовувати для опису та синтезу широкого кола механізмів[2].

Метод морфологічного аналізу може бути успішно застосованим і до задач технологічного передбачення, а саме для побудови стратегії прийняття рішень в складних системах різної природи, зокрема, в задачах створення нових складних технічних систем з урахуванням ситуації з деяким ступенем невизначеності та ризику [3].

Відомі дослідження [4,5], в яких запропоновано використовувати принципи системного аналізу для оптимізації вирішення винахідницьких задач на основі морфологічних та інших методах дослідження. До таких методів відноситься комбінаторний синтез елементів різних модульних систем, структурно-параметричний аналіз і т.д.

У роботі [6] авторами пропонуються креативний підхід запису компоновок затискних патронів (ЗП) за допомогою структурних формул. Таким чином, переміщення елементів патрона описуватиметься відповідно до встановленої системи координат з позначенням індексів відносності рухів в позначеннях поверхонь. Також, згідно методу уніфікаційного синтезу кожний із елементів технічної системи ЗП можна подати у вигляді бінарного коду, складеного із, так званих, X та Y хромосом.

У статті [7] автори розробили методику пошуку нових ТР і вибору раціональної структури у машинобудуванні, на ранніх стадіях проектування, який ґрунтується на структурному синтезі,

який оснований на положеннях системного та кластерного аналізу, і включає математичне і комп'ютерне модулювання.

Відомо пропозицію проектування технологічної оснастки комплектами (сімействами), які б охоплювали монтаж конструкцій в необхідному діапазоні їх розмірів і мас, що нагадує процес нормалізації, тобто систематизацію інформації та зведення її в нормалізовані таблиці [8].

Автори [9] запропонували синтез нових способів навивання гвинтових заготовок методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу, що дозволило отримати два принципово нові способи навивання гвинтових заготовок

У роботах [10, 11] авторами було досліджено багатоваріантну структуру ЗП із врахуванням взаємозв'язку морфології з особливостями конструктивно-функціонального синтезу, а також запропонований креативний підхід для опису графічних структур ЗП у вигляді структурних формул, які дозволяють ефективно здійснювати їх системний опис, аналіз та пошук нових ТР.

Знання структури дозволяє вже на етапі проектування вибрати найбільш раціональні структурні елементи, уніфікувати можливі і виключити зайві структури. Функціонально-структурна модель дозволяє вести цілеспрямований синтез механізмів. Остаточний вибір схеми обраного механізму і його параметрів можливий за допомогою математичної моделі, що відбиває найбільш загальні особливості роботи синтезованих механізмів [12].

Кожний метод має як переваги, так і свої недоліки, та ретельно підбирається перед поставленою задачею. Проте, з розвитком технологій, пошук ефективніших методів генерування нових рішень постає досить актуальним і сьогодні. Тому використання машинного навчання в задачах технічної творчості дозволить внести в ТР алгоритмічні розрахунки з елементами, притаманними інженеру, складових інтуїції та досвіду, які нерідко стають головними, визначальними факторами успішності розв'язання задач багатоваріантного процесу - проектування.

Постановка завдань. В статті поставлено за мету проаналізувати та дослідити можливість використання нейронних мереж (НМ) в ролі оптимізатора, для спрощення пошуку нових ТР. Розробка передумов алгоритмізації креативного підходу на основі класичних методів з використанням НМ складає наукову новизну роботи.

Викладення основного матеріалу. На сьогоднішній день впровадження нових технологій у різних галузях не обходиться без застосування машинного навчання. У більшості досліджень при детальному розгляді можна знайти класичні постановки завдань для нейронних мереж.

На даний час найбільш поширене застосування НМ полягає в задачах розпізнавання образів, оптимізації, прогнозування тощо. Практичне застосування НМ пов'язане з вирішенням задач у таких сферах:

- *медицина* (діагностика захворювань, моніторинг стану пацієнта, прогнозування результатів лікування тощо);
- *безпека* (розпізнавання та ідентифікація осіб/предметів, аналіз даних з датчиків/сенсорів, моніторинг інформаційних потоків в комп'ютерній мережі тощо);
- *автоматизація виробництва* (оптимізація виробничого процесу, контроль якості продукції, моніторинг і візуалізація інформації тощо);
- *робототехніка* (розпізнавання об'єктів/перешкод, прокладання маршруту руху, управління маніпуляторами, підтримання рівноваги тощо);
- *авіоніка* (автопілот, розпізнавання сигналів радарів, безпілотні літальні апарати);
- *економіка* (прогнозування часових рядів (курсів, цін, попиту, обсягів продажів і т.д.), оцінка ризиків, рейтингування, оптимізація товарних і грошових потоків тощо);
- *обробка інформації* (розпізнавання текстів/документів/мовних команд, мовне введення тексту в комп'ютер);
- *зв'язок* (стиснення відеоінформації, швидке кодування-декодування, оптимізація стільникових мереж і схем маршрутизації пакетів);
- *політологія* (передбачення результатів виборів, аналіз опитувань, прогноз динаміки рейтингів, кластеризація електорату, дослідження і візуалізація соціальної динаміки населення);
- *геологорозвідка* (аналіз сейсмічних даних, асоціативні методики пошуку корисних копалин, оцінка ресурсів родовищ);
- *інтернет* (асоціативний пошук інформації, фільтрація і блокування спаму, автоматична рубрикація повідомлень, реклама і маркетинг для електронної торгівлі).

Тому, використання НМ в задачах технічної творчості та інноватики в машинобудуванні є досить актуальним і дозволить внести в ТР алгоритмічні розрахунки з елементами складових інтуїції та досвіду.

Оскільки, дана постановка задачі не є класичною для нейронної мережі (на відміну від задач кластеризації, класифікації, апроксимації, розпізнавання образів тощо), то в результаті це призводить до виникнення низки проблем, пов'язаних з вибором архітектури, підготовкою вхідних даних, визначенням оптимальних алгоритмів навчання НМ тощо. Вирішення цих питань ускладнене відсутністю стандартів в даній області. Тому перед постановкою задачі синтезу ТР доцільно ознайомитися з класичним застосуванням НМ та методами їх навчання, що дозволить в подальшому уникнути проблем, пов'язаних з особливостями їх навчання та функціонування.

Штучний нейрон (ШН) – спрощена модель біологічного нейрона (рис.1), структура якого приймає сигнал, перетворює його (приблизно так, як це роблять справжні нейрони), і передає іншим нейронам (які роблять те ж саме).

Як і біологічний, штучний нейрон складається з тіла (соми), дендритів (приймають інформацію від аксонів інших нейронів) і аксонів (що передають інформацію дендритам інших нейронів). Передача сигналу від одного нейрона до іншого здійснюється за допомогою синапсів, що знаходяться на стику дендрита з аксоном. Вхідні сигнали, що потрапляють на вхід нейрона прагнуть активувати або загальмувати його. Якщо збудження нейрона чисельно перевищує певний поріг, то отриманий сигнал проходить далі через аксон розглянутого нейрона до дендритів інших нейронів і так само поширюється (або не поширюється) далі.

В цій моделі можна виділити три основних елемента [13]:

1. Набір *синапсів* (зв'язків), кожний з яких характеризується своїм *ваговим* коефіцієнтом. Так, сигнал x_n на вході синапсу n , пов'язаного з нейроном j , множиться на вагу W_{nj} . Вага штучного нейрона приймає як додатні значення, так і від'ємні.

2. *Суматор* Σ (функція передачі) складає вхідні сигнали, зважені щодо відповідних синапсів нейрона. Цю операцію можна описати як лінійну комбінацію.

3. *Функція активації* (φ) обмежує амплітуду вихідного сигналу нейрона. Ця функція також називається функцією стиснення. Зазвичай нормалізований діапазон амплітуд виходу нейрона лежить в інтервалі $[0,1]$ або $[-1,1]$.

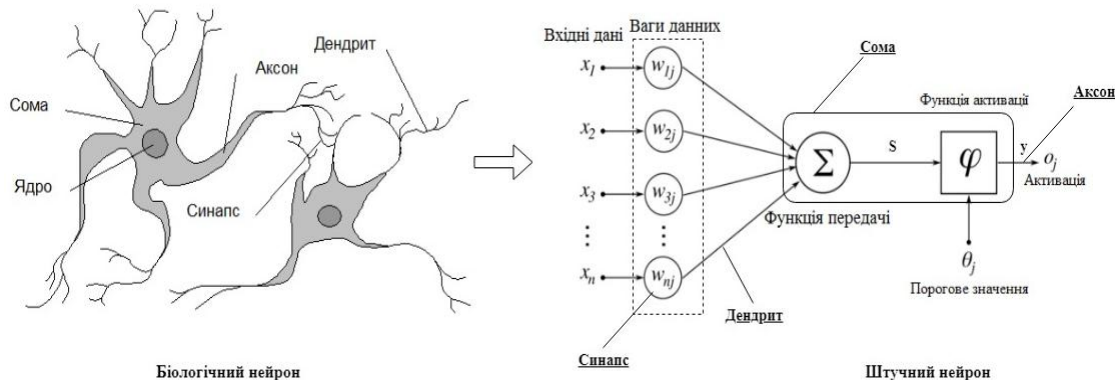


Рис.1. Спрощена порівняльна модель штучного та біологічного нейрона

У зображену модель нейрона, також, включений *пороговий елемент* (порогове значення), який позначений символом Θ_j . Ця величина відображає збільшення або зменшення вхідного сигналу, що подається на функцію активації.

Математична модель нейрона описується співвідношеннями (1):

$$\begin{cases} y = f(s) \\ S = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot x_i + \theta \end{cases} \quad (1)$$

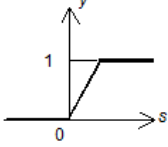
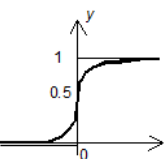
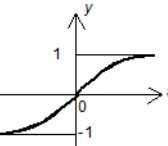
де y – вихідний сигнал нейрона, f – нелінійний перетворювач (функція активації), S – результат сумування, x_i – компонент вхідного вектора (вхідний сигнал), ω_i – вага синапса, θ – значення зміщення, n – число входів нейрона.

Таким чином, нейрон повністю описується своїми вагами w_i і функцією активації $f(s)$ від вибору якої залежить не тільки швидкість, але й метод навчання НМ. Одержавши набір чисел (вектор) x_i як входи, нейрон видає деяке число y на виході.

В теорії побудови НМ застосовують велику кількість функцій активації, але частіше за все використовують наступні (табл.1) [14]:

Таблиця 1

Приклади найчастіше застосовуваних активаційних функцій

Функція активації	Графічна інтерпретація
<p><i>Порогова функція</i> - кусочно-лінійна функція. Якщо вхідне значення менше порогового, то значення функції активації рівне мінімально допустимому, інакше - максимально допустимому;</p> $f(s) = \begin{cases} 0, & s < \theta, \\ 1, & s \geq \theta \end{cases}$	
<p><i>Лінійний поріг</i> - кусочно-лінійна функція, яка має дві лінійних ділянки, де функція активації тотожно дорівнює мінімально допустимому і максимально допустимому значенням і є ділянка, на якій функція монотонно зростає;</p> $f(s) = \begin{cases} -1, & s \leq -1, \\ s, & -1 < s < 1, \\ 1, & s \geq 1 \end{cases}$	
<p><i>Гіперболічний тангенс</i> - функція активації, яка в основному застосовується біологами для більш реалістичної моделі нервової клітини.</p> $f(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$	
<p><i>Сигмоїдальна функція</i> - монотонно зростаюча диференційна нелінійна функція з насиченням. Це швидко зростаюча функція, яка підтримує баланс між лінійною і нелінійною поведінкою.</p> $f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$	

На даний момент ще не розроблений алгоритм визначення необхідної функції активації для того чи іншого випадку, а вибір її параметрів залежить від діапазону вхідних значень та методу навчання.

Структура нейронних мереж тісно пов'язана з використовуваними алгоритмами навчання. У загальному випадку можна виділити три фундаментальні класи нейромережових архітектур [13].

1. *Одношаровий перцептрон* - одношарова нейронна мережа, всі нейрони якої мають жорстку порогову функцію активації. Дана мережа, зображена на рис.2а, має n входів, на які надходять сигнали, що йдуть по синапсах на 3 нейрона. Ці три нейрона утворюють єдиний шар даної мережі і видають три вихідних сигнали.

2. *Багатошаровий перцептрон* - нейронна мережа прямого поширення сигналу (без зворотних зв'язків), в якій вхідний сигнал перетворюється в вихідний, проходячи послідовно через кілька проміжних шарів (прихованих). Дана мережа, зображена на рис.2б, має n входів. На них надходять сигнали, що йдуть далі по синапсах на 3 нейрона, які утворюють перший шар. Вихідні сигнали першого шару передаються двом нейронам другого шару. Останні, в свою чергу, видають два вихідних сигнали.

У багатошаровому перцептроні кожен нейрон на даному рівні ієрархії приймає і обробляє сигнали від кожного нейрона нижчого рівня. Прихований шар нейронів дозволяє мережі навчатися вирішенню складних завдань, послідовно отримуючи найбільш важливі ознаки з вхідного шару.

3. *Рекурентна мережа* - нейроні мережі, які мають зворотні зв'язки. Кожен крок мережі називається ітерацією. Рекурентна мережа може складатися з єдиного шару нейронів, кожен з яких спрямовує свій вихідний сигнал на входи всіх інших нейронів шару.

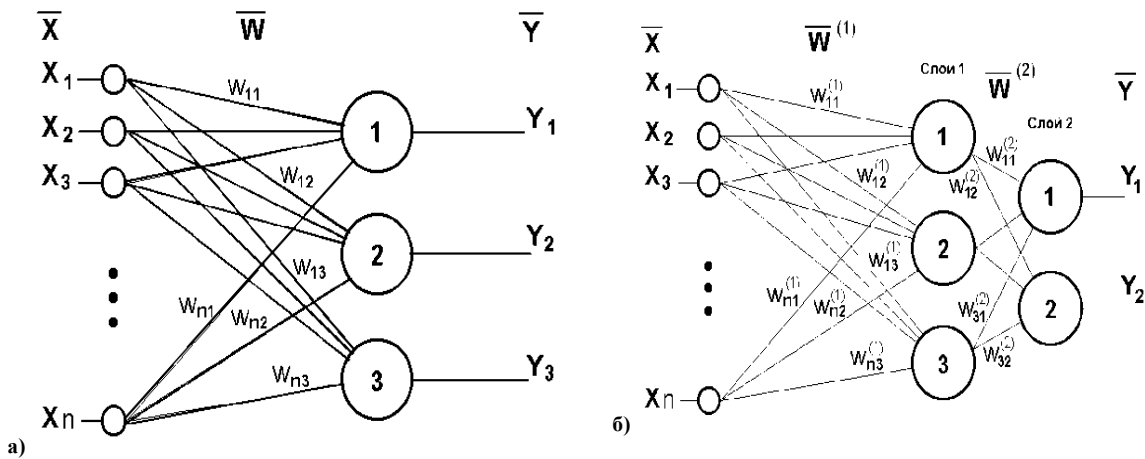


Рис.2. Нейромережіві архітектури:
 а) одношаровий перцептрон; б) багатошаровий перцептрон

Процес навчання нейронних мереж представляє собою налаштування архітектури мережі, а також її вагових коефіцієнтів для ефективного вирішення поставленого завдання.

Мережа повинна налаштувати ваги по навчальним прикладам. Саме ця особливість навчання на прикладах і виділяє нейронні мережі. Існує два класи навчання: *детермінований метод* (параметри мережі змінюються по кроках (ітераціям), ґрунтуючись на поточні параметри входів і бажаних виходів); *стохастический метод* (параметри мережі змінюються випадковим чином. Але зберігаються тільки ті зміни, які привели до поліпшень).

В загальному випадку розрізняють три основних підходи, які в результаті приводять до різноманітних результатів:

1. *Навчання з учителем* - вид навчання мережі, при якому її ваги змінюються так, щоб відповіді мережі мінімально відрізнялися від уже готових правильних відповідей.
2. *Навчання без вчителя* - вид навчання мережі, при якому мережа самостійно класифікує вхідні сигнали. Правильні (еталонні) вихідні сигнали демонструються.
3. *Навчання з підкріпленням* - вид навчання мережі, при якому відбувається навчання моделі, яка не має відомостей про систему, але має можливість здійснювати будь-які дії в ній. Дії переводять систему в новий стан і модель отримує від системи певну винагороду.

При використанні НМ в областях дослідженнях відмінних від тих, які на сьогодні вважаються для них традиційними, виникають певні труднощі на етапах пов'язаних з вибором архітектури, підготовкою вхідних даних, визначення алгоритмів навчання НМ тощо. Тому аналіз класичних принципів прийняття ефективних рішень щодо вибору архітектури, функції активації, відповідних кількісних характеристик НМ є важливим етапом на шляху поширення елементів машинного навчання на задачі реалізації синтезу нових ТР у машинобудуванні.

Висновки. Для вирішення завдання створення нових конструкцій ЗП, які б відповідали рівню розвитку технологій сьогодення, є втілення прогресивних методів пошуку нових ТР на ранніх стадіях технологічної підготовки виробництва. Одним з варіантів реалізації таких методів є використання комбінацій класичних евристичних методів з поєднанням властивостей штучних нейронних мереж.

НМ представляють собою досить нову і перспективну обчислювальну технологію, яка відкриває безліч можливостей і підходів при синтезі та проектуванні нових ТР, у тому числі й в машинобудуванні.

Так, наприклад, у сфері верстатобудування на перший план висуваються завдання розробки нових і модернізації застарілих засобів оснащення токарного верстата. Одним з найбільш важливих елементів якого є ЗП, який забезпечує точне базування і закріплення на верстаті заготовки, деталі або ріжучого інструменту. Завдяки використанню ЗП з різноманіттю розмірів і конструкцій, істотно збільшується функціональність токарного верстата, з'являється можливість обробки важко-профільних деталей на високих швидкостях обертання, забезпечується точність установки і необхідне зусилля затиску.

Інформаційні джерела:

1. Кузнецов Ю.Н., Новоселов Ю.К., Луцив И.В. Теория технических систем. Севастополь: изд-во СевНТУ, 2010, 252 с.
2. Кузнецов Ю. Н. Генетико-морфологический подход к созданию и прогнозированию зажимных механизмов для вращающихся деталей. „*Fundamental Sciences and Applications*”. Bulgaria, 2013. Vol. 19, Book 2, P.7–13.
3. Панкратова Н.Д., Савченко І.Ю. Застосування методу морфологічного аналізу до задач технологічного передбачення. *Наукові праці. Комп'ютерні технології*. Випуск 77. Том 90 с.6-13.
4. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике : Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций : учебное пособие для вузов, - Москва: Либроком, 2013.
5. Гамрекеля М.Н. Метод синтеза оптимальных аппаратурно-функциональных технических комплексов. *Известия вузов. Машиностроение*. 2006, № 9. С.75-84.
6. Васильків В., Генік І., Кочубинська О. До питання синтезу конструкцій механізмів з робочими затискними пружними гвинтовими елементами. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. Житомир: 2006. Вип. 3. С. 171 - 180.
7. В.В. Козляков, Д.Л. Раков. Поиск новых технических решений в машиностроении на ранних этапах проектирования. *Машиностроение и инженерное образование*. №1(14), 2008,С.2-11.
8. Г.М. Тонкачев. Система функціональних модулів будівельної оснастки. *Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва*. Випуск №6(104),2013. С.3-8.
9. Гевко І. Б. Синтез способів навивання гвинтових заготовок. *Вісник ТНТУ*, 2015, Том 80. № 4. С. 156-163
10. Литвин О.В., Кравець О.М., Ящук І.Р. Взаємозв'язок морфології затискного патрона з особливостями конструктивно-функціонального синтезу структур. *Технічні науки та технології*. 2016. № 1(3). С. 54-60 .
11. О.В. Литвин, І.Р. Ящук. Щодо структурно-морфологічного синтезу затискних патронів токарних верстатів. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. №61. С.97-104.
12. И.С. Аленченков, А.Э. Пушкарёв. Функционально-структурный анализ и синтез механизмов роторной линии. *Вестник Иж ГТУ*. 2011. № 2(50) с.7-11.
13. Haykin Simon. *Neural Network sand Learning Machines*, 3rd edition. Prenticehall, 2009, 906p.
14. Уоссермен Ф. *Нейрокомпьютерная техника: теория и практика*. Мир, 1999. С.184.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2018

УДК 621.9.06-529-8

О.В. Литвин, І.Р. Ящук, С.С. Раус

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ПРИВЕДЕННЯ ЖОРСТКОСТІ СИСТЕМИ ПАТРОН –ДЕТАЛЬ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА

Технологічна система верстата представляє собою систему, жорсткість елементів якої в процесі обробки обумовлюють виникнення систематичних та випадкових похибок розмірів і геометричної форми оброблюваних заготовок. Разом з тим, ця технологічна система є замкненою динамічною системою, здатною до збудження та підтримання вібрацій, що породжують похибки форми оброблюваних поверхонь (некруглість, хвилястість) і збільшують їх шорсткість. Жорсткість затискних патронів має великий вплив на точність обробки, на динамічну картину затискних зусиль, згинальних і перекидних моментів та характеризують їх пружні деформації і поведінку під впливом зовнішніх сил і моментів, стійкість до змін їх форми і положення. Розробка методів і процесів, що дозволяють описати і визначити жорсткість затискних патронів, має велике практичне значення. Метою роботи є розробка методики визначення приведеної жорсткості елементів технологічної системи шпиндель –патрон - деталь. Розробка методики досліджень та аналіз результатів складають наукову основу даної роботи. В результаті проведення досліджень визначенні особливості характеристик приведеної жорсткості системи плунжерний патрон - деталь токарного верстату, розроблені рекомендації по зменшенню впливу нелінійних параметрів жорсткості верстата на точність обробки, що використовуються при проектуванні затискних патронів.

Ключові слова: затискний патрон, жорсткість, точність, конструкції, деталь, дослідження, верстат.

А.В. Литвин, І.Р. Ящук, С.С. Раус

Національний технічний університет України

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

ПРИВЕДЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ СИСТЕМЫ ПАТРОН -ДЕТАЛЬ ТОКАРНОГО СТАНКА

Технологическая система станка представляет собой систему, жесткость элементов которой в процессе обработки обуславливающих возникновение систематических и случайных погрешностей размеров и геометрической формы обрабатываемых заготовок. Вместе с тем, эта технологическая система является замкнутой динамической системой, способной к возбуждению и поддержанию вибраций, порождающих ошибки формы обрабатываемых поверхностей (некруглость, волнистость) и увеличивают их шероховатость. Жесткость зажимных патронов имеет большое влияние на точность обработки, на динамическую картину зажимных усилий, изгибающих и перекидных моментов и характеризует их упругие деформации и поведение под воздействием внешних сил и моментов, устойчивость к изменениям их формы и положения. Разработка методов и процессов, позволяющих описать и определить жесткость зажимных патронов, имеет большое практическое значение. Целью работы является разработка методики определения приведенной жесткости элементов технологической системы шпиндель -патрон - деталь. Разработка методики исследований и анализ результатов исследований составляют научную основу данной работы. В результате проведения исследований определены особенности характеристик приведенной жесткости системы патрон - деталь токарного станка. разработаны рекомендации по уменьшению влияния нелинейных параметров жесткости станка на точность обработки, используемых при проектировании станков.

Ключевые слова: патрон, жесткость, точность, конструкции, детали, исследования, станок.

O. Litvin, I. Yashchuk, S. Raus

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

CONSTRUCTION OF THE HARDNESS OF THE PATRON SYSTEM-THE DETAIL OF THE TURNING MACHINE

The technological system of the machine is a system, the stiffness of which elements in the process of processing cause the occurrence of systematic and random errors in the size and geometric shape of the workpieces. At the same time, this technological system is a closed dynamic system capable of excitation and maintenance of vibrations that generate errors in the shape of treated surfaces (non-circularity, wavelength) and increase their roughness. The hardness of clamping cartridges has a great influence on the accuracy of machining, on the dynamic picture of clamping forces, bending and overlapping moments and characterizing their elastic deformation and behavior under the influence of external forces and moments, resistance to changes in their shape and position. The development of methods and processes that allow to describe and determine the tightening of clamping cartridges is of great practical importance. The purpose of the work is to develop a method for determining the reduced rigidity of the elements of the technological system spindle -potron - part. The development of research methods and the analysis of research results constitute the scientific basis of this work. As a result of the research the characteristics of the reduced rigidity of the chuck system are determined - the lathe part. The recommendations for reducing the influence of nonlinear parameters of the machine's rigidity on the accuracy of machining, used in the design of machines.

Key words: clamping chuck, stiffness, precision, design, detail, research, machine tool.

Постановка проблеми. Затискні патрони широко застосовуються для закріплення заготовок при обробці на токарних верстатах. Вимоги до підвищенню точності обробки деталей безперервно підвищуються, і ця тенденція досить важлива для розвитку сучасного виробництва. Підвищення точності обробки на токарному верстаті потребує визначення нелінійних характеристик жорсткості основних елементів пружної системи верстату, в тому числі системи патрон-деталь. На точність обробки, в основному, впливають показники жорсткості та точності шпинделя та затискного патрона верстата. Параметри жорсткості визначаються, як правило, експериментальним методом при навантаженні шпинделя і затискного патрона. Жорсткість системи патрон – деталь має великий вплив на точність обробки, на динамічну картину затискних зусиль, згинальних і перекидних моментів. Жорсткість затискного патрона, його складальних одиниць або складових частин характеризують їх пружні деформації і поведінку під впливом зовнішніх сил і моментів, стійкість до змін їх форми і положення. Кожний затискний патрон також являє собою складну динамічну систему із пружно-дисипативними зв'язками. Розробка методів і процесів, що дозволяють описати і визначити жорсткість затискних патронів, має велике практичне значення. Актуальним питанням є визначення приведеної жорсткості системи патрон-деталь до осі або діаметру затиску, визначення матриці радіальної жорсткості системи патрон-деталь, яка безпосередньо визначає пружні деформації в зоні обробки і впливає на точність обробки на верстаті.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Дослідження різних типів затискних патронів показали, що сумарна деформація системи патрон -деталь при дії на неї сили різання в більшій мірі залежить від деформації поверхні в стиках кінематичних пар, ніж від власних деформацій деталей патрона [1, 2]. В [3] досліджувалося напружений стан патрону через зміну умов тертя, сил і нелінійних характеристик стиків і спряжень в умовах складної деформації. Вченими [4] вводиться поняття диференціальної жорсткості заготовки. При розрахунку необхідного мінімального зусилля затиску все навантаження при затиску заготовки враховуються одночасно. Точність нової моделі розрахунку затискних сил явно перевищує точність попередніх підходів до розрахунку. В роботі [5] досліджується параметрична нестійкість в процесі роботи затискного патрона. Дається аналітичний критерій стійкості і виконане експериментальне підтвердження. Параметричне коливання генерується спрямованою орієнтацією жорсткості системи патрон -деталь. В роботі [6] описується методика, яка компенсує похибки обробки, що виникають в результаті затиску кулачками з урахуванням їх жорсткості і зміни радіальної жорсткості системи затискного патрона. В дослідженні [7] було проаналізовано процес різання в різних умовах затиску і розроблено узагальнену математичну модель для прогнозування форми обробленої деталі в залежності від типу і жорсткості затискного патрона. Експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними викладками. В роботі [8] виконані випробування на радіальну і згинальну жорсткість системи патрон - деталь для різних співвідношень діаметрів кулачка і деталі, положень сили різання щодо кулачків і кутів їх розточування. В статті [9] всі основні фактори, що впливають на точність обробки деталі в патроні були визначені шляхом складання бюджету помилок і систематичних вимірювань. З результатів була розроблена карта помилок, яка підсумовує зв'язок між цими факторами і їх вплив на похибку обробки деталі. В [10] розроблений патрон, яка вимірює під час різання зусилля затиску на заготовці. Розроблено спеціальній кулачок із застосуванням методу скінченних елементів. Це дозволило знайти кореляцію між відхиленнями заготовки і зусиллям і жорсткістю затиску. В роботі [11] досліджується критична сила згину та радіальна жорсткість затиску патрона і способи її поліпшити. В літературних джерелах не виявлено надійних методик приведення параметрів жорсткості технологічної системи патрон - деталь.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Поряд з ними існує та поки що не отримав досить широкого поширення інший тип визначення жорсткості системи патрон -деталь, який можна здійснювати теоретичними розрахунками, зокрема шляхом визначення приведеної жорсткості системи до конкретної точки чи елемента. Розробка методики та аналіз результатів досліджень складають наукову основу даної роботи. Метою роботи є розробка методик визначення приведеної жорсткості технологічної системи патрон-деталь.

Викладення основного матеріалу. На кафедрі "Конструювання верстатів та машин" НТУУ "КПІ" розроблена спеціальна методика визначення приведеної жорсткості системи патрон -деталь токарних верстатів, які дозволяють визначити параметри їх жорсткості: радіальну та поворотну. Дана методика використана під час виконання досліджень приведених характеристик

жорсткості технологічної системи плунжерний патрон – деталь токарного верстату ТАК-102, що серійно випускається Київським ВАТ «Веркон» (рис.1).

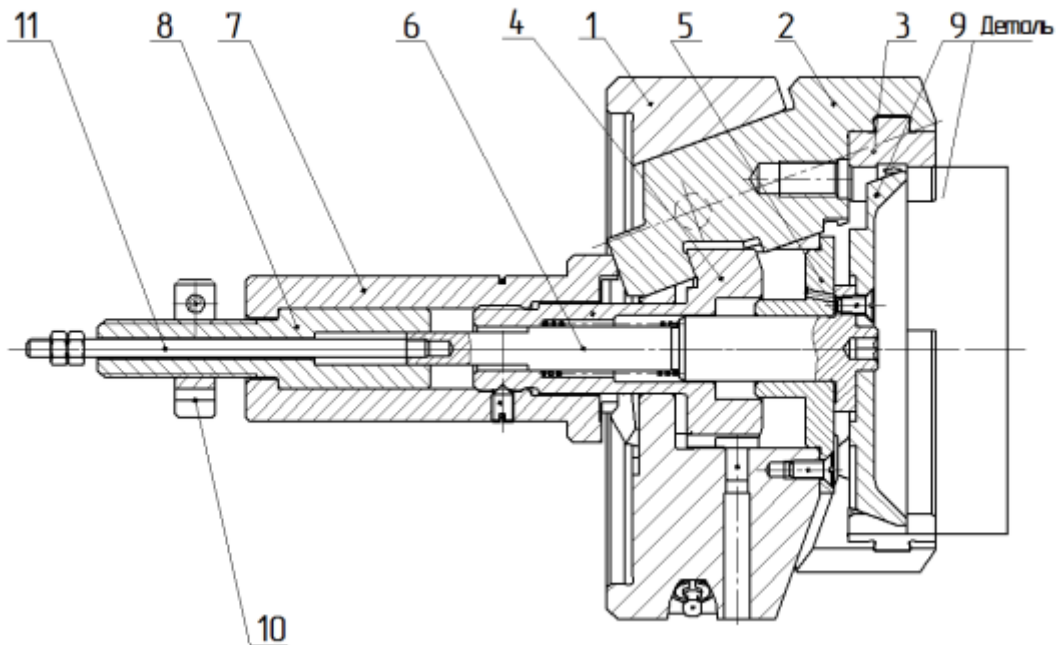


Рис. 1. Конструктивна схема плунжерного затискного патрона

Матрицю просторової жорсткості системи патрон-деталь можна визначити, розглядаючи ланки передавально – підсилюючого механізму, які працюють на стискання та розтискування, або як поступальні елементи. Матриця загальної жорсткості системи плунжерний патрон – деталь встановлює взаємозв'язок між пружним переміщенням в системі координат патрона під дією статичного навантаження та власне навантаженням. Розмірність такої матриці просторової жорсткості 9×9 [4]. Матриця просторової жорсткості дорівнює сумі матриць жорсткості окремих ланок. Серед цих жорсткостей радіальна та кутова при радіальному навантаженні мають найбільший вплив на динамічну зміну зусилля затиску. У точці прикладання зусилля затиску воно викликає переміщення затискного кулачка, що складається з окремих переміщень всіх елементів, що беруть участь в передачі енергії від приводу, таких як затискний кулачок (змінний), основний кулачок (підкулачник), передавально - підсилюючий механізм і корпус патрона, а також переміщення в самих елементах. В дослідженні розглядається лінійна залежність, яка справедлива лише для малих величин пружних переміщень та у випадку статичного навантаження. На основі отриманих даних будують математичні моделі, які є підставою для аналізу і визначення необхідних заходів для розробки рекомендацій щодо підвищення жорсткості затискного патрона і точності обробки. Цей підхід доволі складний та трудомісткий.

Для інженерних розрахунків можна використовувати поняття приведеної жорсткості системи патрон-деталь до осі або діаметру затиску. Методику розрахунку проілюструємо на прикладі плунжерного затискного патрона. Трьохплунжерний патрон складається з корпусу 1, в похилих під кутом 20° отворах якого розміщені три плунжери 2, передні кінці яких споряджені затискними елементами 3. Затискні елементи фіксуються в плунжерах 2 гвинтами. Діаметр затискних елементів 98 мм, діаметр корпусу патрона 150 мм. Плунжери 2 з'єднані між собою та з втулкою 8 привода 11 поршнем 4 та фіксуються в осьовому напрямі втулкою 5. В поршні 4 розміщена тяга 6, яка з'єднана з гвинтом 11. З торця затискний патрон закритий кришкою – упором 9, на який базується деталь в осьовому напрямі. Хід поршня 4 та привода 11 обмежується гайкою 10. При складанні затискного патрона всі рухливі з'єднання змащені пастою НП-232 ГОСТ 14068-79. В процесі експлуатації періодично змащуються плунжери 2 вищевказаної пастою.

При консольному затиску деталі на неї діють сили процесу різання, що викликають в затискному патроні осьові та радіальні відтискання. У процесі затискання заготовки після вибирання кутового зазору між корпусом та плунжером з жорсткістю C_K додається контактна

жорсткість стику C_{1-2} . Сумарна радіальна приведена жорсткість згідно з врахуванням паралельного та послідовного з'єднання жорсткостей в передавально - підсилюючому механізмі, буде:

$$C_p = \frac{1}{E_1}; \text{ де } E_1 = \frac{1}{C'_{23} + C_{23}} + \frac{1}{C_K + (C'_{12} + C_{12})\cos\alpha}.$$

де: C_{23} та C'_{23} – контактна жорсткість системи плунжер - заготовка; C_{12} та C'_{12} – контактна жорсткість стику корпус - плунжер (рис.2).

Для визначення контактної жорсткості стиків C'_{23} та C_{23} ; C_{12} та C'_{12} необхідно визначити реакції у точках контакту 1 та 2 штоку та корпусу. З врахуванням контактних деформацій у стиках плунжер - заготовка відтискання на вильоті ℓ_p буде:

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4;$$

де y_1 – деформація деталі під дією сили різання; y_2 – контактні деформації у стиках плунжер - деталь; y_3 – контактні деформації у стиках корпус патрона - плунжер; y_4 – переміщення за рахунок повороту плунжера в корпусі на кут θ_{12} :

$$y_1 = \frac{P_p(\ell_p + b)}{EI}; \quad y_2 = \theta_{23}(b + \ell_p); \quad y_3 = \theta_{12}(a + b + \ell_p + \ell);$$

$$\theta_{23} = \frac{2(R'_{23} + R_{23})}{C_{23} \cdot b}; \quad \theta_{12} = \frac{2(R'_{12} + R_{12})}{C_{12} \cdot a};$$

де θ_{23} та θ_{12} – кути повороту у стиках плунжер - деталь та корпус – плунжер відповідно (рис.3). З урахуванням повороту кулачка на кут $\Delta\gamma$ до контакту з корпусом відтискання на вильоті ℓ_p буде:

$$y_4 = \Delta\gamma(a + b + \ell + \ell_p);$$

де

$$\Delta\gamma = \frac{R_{12} \cdot \cos\alpha}{C_{12} \cdot h}(a + b + \ell + \ell_p) - \frac{R'_{12} \cdot \cos\alpha}{C'_{12}}.$$

Відстань точки повороту кулачка від торця патрона:

$$h = \frac{R_{12} \cdot a}{R'_{12} + R_{12}}.$$

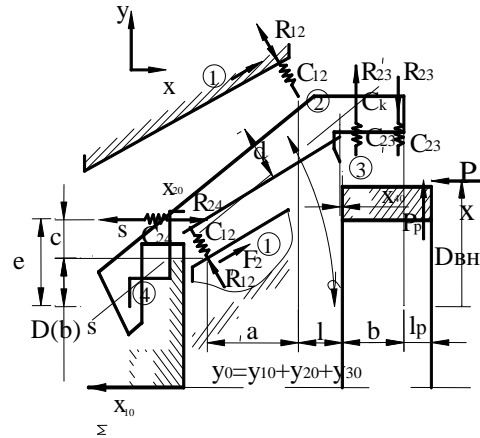
Радіальна приведена жорсткість системи патрон-деталь з урахуванням переносу на лінію дії радіальної сили затиску T_Σ :

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_{12} + C'_{12}} + \frac{1}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C'_{12}}} + \frac{1}{C_K} + \frac{1}{C_{23} + C'_{23}};$$

Оскільки кут $\Delta\gamma$ мізерно малий (спряження корпус-плунжер виконано по $H6/k6$), то складовою y_3 можна знехтувати. Радіальна жорсткість C_p системи патрон-деталь при затисканні нежорсткої кільцевої деталі менша її поворотної жорсткості C_Π , що визначається співвідношенням моменту зовнішніх сил (сил різання M_p) до кута θ повороту деталі навколо точки О. Радіальні відтискання в системі патрон-деталь від повороту деталі значно менші величини радіальних переміщень, викликаних силою затискання та різання.

Скориставшись методикою аналізу пружних відтискань в системі патрон – деталь [2], визначимо сумарний кут θ повороту деталі, затиснутої у плунжерному патроні від сили різання P_p при наступних припущеннях: 1) пружно-фрикційний шарнір утворений трьома шарнірами, причому центри їх не співпадають, як це відбувається у цанговому патроні одинарного затискання; 2) затискний кулачок (елемент) контактує з заготовкою по всій довжині та

розглядається як балка на пружній основі, маючи граничний кут повороту, рівний кутовому зазору між заготовкою та кулачком; 3) кутове переміщення у стику корпус- плунжер в штокових патронах відсутній, через те, що радіуси кривизни спряжених поверхонь рівні та кутовий зазор між ними дорівнює нулю, тому вони контактують по всій поверхні та навантаження від складових сил різання розподіляється по усій поверхні контакту; 4) затискний кулачок розглядається як балка на двох опорах; 5) радіальна, поворотна та осьові жорсткості усіх затискних елементів однакова.



$$X = X_{10} + X_{20} + X_{30} + X_{40}$$

Рис.2. Розрахункова схема плунжерного патрона для визначення приведеної жорсткості

У відповідності з розрахунковою схемою (рис.3) та прийнятими припущеннями визначимо відповідні складові сумарного кута повороту та поворотну жорсткість системи патрон - деталь. Кут повороту заготовки θ_{23} відносно затискних елементів через різницю контактних деформацій у стику заготовка-затискний елемент:

$$\theta_{23} = \frac{2(R_{23} + R'_{23})}{C_{23} \cdot b};$$

де

$$R'_{23} = \frac{1}{b} \left(R_X \frac{D_{BH}}{2} + P_P \ell_P \right); \quad R_{23} = \frac{1}{2} \left[P_X \frac{D_{BH}}{2} + P_P (\ell_P + \ell) \right];$$

R'_{23} і R_{23} - реакції у точках контакту заготовки та затискного елемента;

$$P_P = \sqrt{P_y^2 + R_Z^2};$$

де P_P – радіальна та P_X – осьова складова сили різання. Кут повороту θ_{12} у стику корпус – плунжер дорівнює:

$$\theta_{12} = \frac{2(R_{12} + R'_{12})}{C_{12} \cdot a};$$

де

$$R_{12} = \frac{P_P (a + b + \ell + \ell_P) + P_X (D_{BH} - d)}{a}; \quad R'_{12} = \frac{P_P (b + \ell + \ell_P) + P_X (D_{BH} - d)}{a};$$

Реакції R_1 та R_2 - реакції у точках взаємодії корпусу і кулачка.

Таким чином, отримавши сумарний кут повороту $\theta = \theta_{23} + \theta_{12}$ системи патрон - деталь для плунжерного патрона. Визначимо її поворотну жорсткість:

$$C_{II} = \frac{M_P}{\theta} = \frac{M_P}{\theta_{23} + \theta_{12}};$$

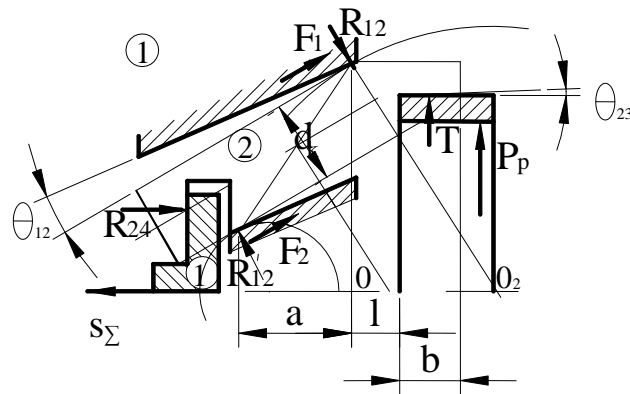


Рис.3. Розрахункова схема плунжерного патрона для визначення силових факторів

Радіальна жорсткість C_p системи патрона при затисканні нежорсткої деталі менша її поворотної жорсткості C_{θ} , що визначається співвідношенням моменту зовнішніх сил (сил різання M_p) до кута θ повороту деталі навколо точки O . Радіальні відтискання від повороту деталі значно менші величини радіальних переміщень, викликаних силою затискання та різання.

Висновки. В результаті проведення досліджень визначенні приведені поворотні та радіальні жорсткості системи плунжерний патрон - деталь токарного верстату. На результатах досліджень розроблені рекомендації по зменшенню впливу нелінійних параметрів жорсткості верстата на точність обробки, що використовуються при проектуванні верстатів ВАТ "Веркон". Представлені спосіб і методика контролю жорсткості системи патрон - деталь металорізальних верстатів показали свою працездатність, ефективність, а також достатню простоту реалізації, що найбільш сприятливо для використання у виробничих умовах.

Інформаційні джерела:

1. Орликов М.Л. Динамика станков.- К.:Вища школа.- 1989. – 272 с.
2. Кузнецов Ю.Н. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: монография (в 2-х частях) / Ю.Н. Кузнецов, В.Н. Волошин, П.М. Неделчева, Ф.В. Эль-Дахаби — К.: ООО «ГНОЗИС». — Ч.1, 2009. — 270 с.; Ч. 2, 2010. — 466 с.
3. Литвин О.В. Вплив характеристик затискного патрону токарного верстата на обробку нежорстких деталей / Захист металургійних машин від поломок. Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. – Маріуполь, випуск 11, 2009, с. 42 -47.
4. E. Usui. (1994). Advancement of Intelligent Production: Seventh International Conference on Production/Precision Engineering, 4th International Conference on High Technology, Chiba, Japan, 15-17 September 1994.
5. Feng P.F. (2003). Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkraeften bei Backenfuttern. Technische Universität Berlin, Berlin.
6. Doi M, Masuko M, Ito Y, Tezuka A (1985) A study on parametric vibration in chuck work. Bull JSME Jpn Soc Mech Eng 28(245):2774–2780
7. Lee J., Lee S. (2004) Chucking compliance compensation with a linear motor-driven tool system [J]. Int J Adv Manuf Technol 23(1–2):102–109
8. Rahman M (1989) A study on the deviation of shape of a turned workpiece clamped by multiple jaws. CIRP Ann Manuf Technol 38(1):385–388
9. Ema S., Marui E. (1994) Chucking performance of wedge-type power chucks. J Eng Ind Trans ASME 116(1):70–77.
10. Byun J, Liu C.R. (2012) Methods for improving chucking accuracy. J Manuf Sci Eng Trans ASME 134(5) (10 pages):051004.
11. Eggebrecht M., Georgiadis A., Wagner T. Strategies for correcting the workpiece deformation during the manufacturing at the milling process. Conferences 2013 - Sensor 2013.
12. Wang J. Zhang J., Feng P., Wu Z., Zhang G.. (2015). Modeling and simulation for the critical bending force of power chucks to guarantee high machining precision. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. July 2015, Volume 79, [Issue 5–8](#), pp 1081–1094.

Стаття надійшла до редакції 03.10.2018

УДК 622.692.4

Й.Й. Лучко, А.О. Кичма
ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТЕНЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ДІЛЯНОК
МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

У статті розглянуто деякі проблеми експлуатації та довговічності потенційно-небезпечних ділянок тривало експлуатованих магістральних трубопроводів. Удосконалений експрес метод оцінки роботоздатності ділянок трубопроводів на основі визначення їх просторового положення та твердості основного металу і зварних швів та розмірів корозійних і тріщино подібних дефектів, безпосередньо у трасових умовах.

Ключові слова: магістральний трубопровід, твердість металу, оцінка роботоздатності, трубна сталь, розрахункові і допустимі напруження, коефіцієнт запасу міцності.

Форм. 8. Табл. 4. Літ. 12.

Й.Й. Лучко, А.О. Кычма
ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО - ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В статье рассмотрено некоторые проблемы эксплуатации и долговечности потенциально опасных участков длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов. Усовершенствован экспресс метод оценки работоспособности участков трубопроводов на основе определения их пространственного положения и твердости основного металла и сварных соединений и размеров коррозионных и трещино подобных дефектов непосредственно в трасовых условиях.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, твердость металла, оценка работоспособности, трубная сталь, расчетные и допустимые напряжения, коэффициент запаса прочности

J.J. Luchko, A.O. Kychma
PROBLEMS OF OPERATION POTENTIALLY UNSAFE OF SEGMENTS OF PIPELINES

The paper presents some problems of operation and durability potentially unsafe of segments of pipelines. Basing on the investigations, recommendations for engineering practice are suggested.

Keywords: pipeline, hardness of metal, assessment of the capacity for work, steel of pipe, calculated and ultimate strength

Постановка проблеми. Магістральні трубопроводи (МТ) відносяться до особливо відповідальних інженерних споруд. Високі робочі тиски, велика протяжність трас, складні гідрогеологічні умови їх проходження, значні економічні збитки при аваріях МТ – все це обумовлює підвищені вимоги до їх міцності і надійності. Досвід тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок трубопровідних систем, таких як магістральні нафтогазопроводи, вказує на важливість урахування специфічних особливостей перерозподілу їх сумарних напружень і деформацій. Сучасні тенденції розвитку інженерних розрахунків стосовно забезпечення надійної і безаварійної експлуатації відповідальних вузлів і конструктивних елементів трубопровідних систем свідчать, що злободенною залишається проблема контролю їх напружено-деформованого стану та оцінки міцності і водночас забезпечення таких умов перебігу експлуатації, за яких унеможливується виникнення критичних (з точки зору руйнування) станів МТ. Тому узагальнення досвіду та розроблення ефективної методики оцінки міцності і формулювання висновків щодо подальшої експлуатації чи способів ремонту тривало експлуатованих ділянок потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів не втрачає своєї актуальності і донині.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи розв'язування задач розрахунку на міцність трубопроводів великих діаметрів, наведено в багаточисленних роботах [1-4]. Багаторічний досвід експлуатації трубопровідних систем засвідчив, що чинні норми з проектування і експлуатації магістральних трубопроводів не повністю забезпечують реальну оцінку величини напружень і деформацій складових технічних систем, коли йдеться про роботу матеріалу труб за границею пружності в умовах експлуатаційних навантажень, зокрема, це стосується тих ділянок, що перебувають у екстремальних умовах, за яких виникають надмірні рівні напружень, які спричиняють утворенню пластично деформованих зон чи руйнування. У працях [5, 6] наведено низку причин перед аварійної експлуатації та фактори, які призводять до цього. Як вказує практика, зусилля спричинені вказаними зовнішніми навантаженнями, діючи сумісно з внутрішнім тиском, можуть викликати появу у стінках труб таких рівнів напружень, які перевищують границю пропорційності для основних марок сталей, з яких виготовлені магістральні трубопровідні системи.

Забезпечення несучої здатності трубопроводів на потенційно-небезпечних ділянках під час їх тривалої експлуатації є дуже важливою задачею. Особливості роботи надземних переходів магістральних нафтопроводів у гірських умовах розглянуті у роботі [7]. У праці [8] наведені результати оцінювання границі текучості та тимчасового опору трубною сталі марки «Ц» за твердістю за Брінелем. Основні положення і методи діагностування стану технічних об'єктів та виявлення їх дефектності неруйнівними методами контролю розглянуто у працях [9,10] і нормативному документі [11]. Сучасні іноземні технології забезпечення тривалої експлуатації і цілісності магістральних трубопроводів описані у працях [12,13]. Визначення залишкового ресурсу труб нафтопроводів з тріщинами і оптимізація параметрів їх експлуатації розглянуті у роботі [14].

Невирішені частини проблеми. Відомі методи [15] експериментального визначення механічних характеристик основного металу трубопроводу і біляшовної зони на спеціально виготовлених зразках, які проводяться на обладнанні у стаціонарних лабораторіях за умов одновісного напруженого стану. Такі роботи вимагають великих матеріальних і часових затрат, але переважно технологічна ситуація на трасі вимагає більш оперативного вирішення цього питання.

Метою дослідження є узагальнення досвіду тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок МТ. Використовуючи неруйнівні методи контролю та діючі нормативні документи, обґрунтувати і розвинути експрес метод оцінки роботоздатності ділянок трубопроводів на основі визначення їх просторового положення та стану основного металу і зварних швів та розмірів корозійних і тріщино подібних дефектів безпосередньо у трасових умовах і проведення розрахунків та формулювання висновків про можливість подальшої експлуатації МТ або способи їх ремонту.

Основні результати досліджень. Починаючи з 1962 року усі споруджені в країнах СНД магістральні трубопроводи розраховувалися на міцність за методом граничних станів [16]. Суть цього методу стосовно магістральних трубопроводів полягає у тому, що розглядають такий його стан, при якому споруда перестає опиратися дії внутрішнього тиску або утворення значних залишкових деформацій унеможливить його подальшу нормальну експлуатацію.

При проектному розрахунку МТ основний геометричний параметр ділянки труби – товщина стінки визначається за відомою величиною робочого тиску, виходячи з першого граничного стану руйнування трубопроводу від внутрішнього тиску. При цьому враховують лише кільцеві нормальні напруження від внутрішнього тиску та поздовжні осьові напруження (пов'язані з поздовжньою силою) від усіх розрахункових навантажень і впливів. Розрахунковий опір встановлюють за нормативним значенням границі міцності матеріалу труб. Жодних дефектів у стінці трубопроводу не допускається.

З метою запобігання утворенню значних поздовжніх деформацій трубопроводу також виконують перевірку за другим граничним станом, записуючи умову через найбільші поздовжні нормальні напруження, що пов'язані як з нормальною силою так і згинальним моментом від усіх нормативних навантажень і впливів. Допустимі поздовжні нормальні напруження встановлюють за мінімальним значенням границі текучості. Розтягальні допустимі напруження визначають без врахування дії внутрішнього тиску, а стискальні – з його врахуванням відповідно до критерію міцності енергії формозміни. Допустимі значення робочих навантажень і впливів визначаються здебільшого розрахунком за другим граничним станом. Обумовлена дефектами тіла труби, концентрація напружень у явному вигляді, також не приймається до уваги.

Методи які використовуються при проектуванні і розрахунку магістральних трубопроводів дозволяють забезпечити достатньо високий рівень надійності в процесі їх експлуатації. Здебільшого, максимальні проектні розтягувальні напруження в металі труб не перевищують $0,7 - 0,8 \sigma_T$ для кільцевого напрямку і $0,9 \sigma_T$ для поздовжнього напрямку.

Проте, враховуючи той факт, що при спорудженні трубопроводу частину найнебезпечніших дефектів тіла труби не вдається виявити, перед введенням його в експлуатацію обов'язково проводять випробовування трубопроводу внутрішнім тиском більшим від робочого.

На магістральних трубопроводах, введених в експлуатацію до 1980 року, на ділянках III і IV категорії випробовувальний тиск не менше як на 10% перевищував робочий, а на ділянках вищих категорій – $P_{вип} \geq 1,25P_{роб}$. Найбільший внутрішній тиск при випробуваннях не перевищував 90% від тиску, що викликає в металі труб напруження, які рівні границі текучості σ_T .

Як показує практика, передпускові випробовування не викривають усіх дефектів в тілі трубопроводу. Після введення його в постійну експлуатацію в ньому залишається певна кількість дефектів і особливо в кільцевих зварних швах, які з одного боку при випробовуваннях внутрішнім

тиском зазнають дії поздовжніх напружень істотно менших від кільцевих, а з другого боку на ділянках III і IV категорії проходять лише 20% контроль фізичними методами.

Небезпека руйнування стінки трубопроводу в дефектних зонах з часом зростає в наслідок дії повторно-змінних навантажень, спричинених змінами режимів експлуатації, як показує діаграма приведена на *рис. 1*. На *рис. 1* наведено діаграму аварійних розривів нафтопроводів «Дружба» за період з 1964 по 1993 роки у місцях дефектів, допущених при виготовленні труб та при виконанні будівельно-монтажних робіт (поздовжні та кільцеві зварні шви, заплати, та ін.). Як видно з діаграми, на початковій стадії експлуатації переважали розриви вздовж твірної здебільшого по поздовжніх зварних швах від дії кільцевих напружень, спричинених внутрішнім тиском. У 80-90 роках поздовжні розриви труб припинилися. Що певною мірою також пояснюється зниженням робочих тисків. Проте розриви по кільцевих зварних швах продовжувалися. На початку 90-х років мали місце декілька серйозних аварій нафтопроводів діаметром 1020 і 1220мм з розривом кільцевих зварних швів, виконаних напівавтоматичним способом.

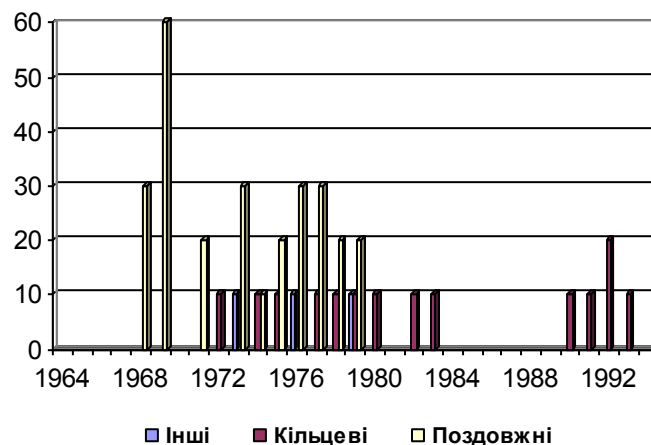


Рис. 1. Кількість аварійних розривів нафтопроводів у дефектних зонах по роках

Відома аварія нафтопроводу з умовним діаметром 1200 мм і товщиною стінки 12мм під час виконання ремонтних робіт із заміною ізоляційного покриття, що проводились методом поступового шурфування та відновлення ділянки трубопроводу у відкритих траншеях [17]. Осередок руйнування кільцевого шва знаходився зверху нафтопроводу (положення 12 години за циферблатом годинника) у зоні непровару максимальною довжиною 370 мм та дії найбільших розтягальних поздовжніх напружень, спричинених згином підкопаної ділянки. Заповнюючий шар довжиною біля 1,5 м виконано без або з частковим оплавленням з'єднувальних труб. Виявлені чисельні непровари шириною до 8 мм і загальною довжиною до 700 мм, були закриті кореневим та облицювальним шарами.

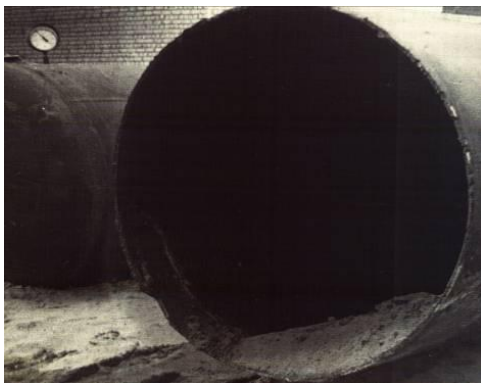
На *рис.2 а* показано поверхню руйнування дефектного зварного шва при стендових випробуваннях ділянки трубопроводу 1220×12 мм довжиною 70 м під тиском 4,2 МПа, $\sigma_{02}=375$ МПа за схемою трьохточкового згину [18]. Під час стендових випробувань ділянки трубопроводу його кільцевий зварний шов знаходився біля проміжної опори в зоні дії згинального моменту, близького за величиною до максимального. Збільшення цього моменту здійснювали за рахунок опускання крайньої опори. Руйнування наступило раптово по всьому периметру перерізу при напруженнях більших за границю текучості матеріалу труби, після опускання опорного перерізу на 2 м. Причиною руйнування послужив непровар кореневого та частково заповнюючого шарів, довжина яких в окремих місцях досягала 708 мм.

Графічні залежності згинального моменту від найбільшої поздовжньої деформації згину показано на *рис.2 б*. Криву 1 побудовано за результатами випробування цієї труби, криву 2 – за результатами розрахунків за методикою роботи [19], що ґрунтується на деформаційній теорії пластичності. Діаграму деформування, одержану при випробуваннях зразків, вирізаних в поздовжньому напрямі, схематизовано при розрахунках лінійно пружною зоною і площиною текучості ($\sigma_T=375$ МПа, $\varepsilon_T=0,00178$).

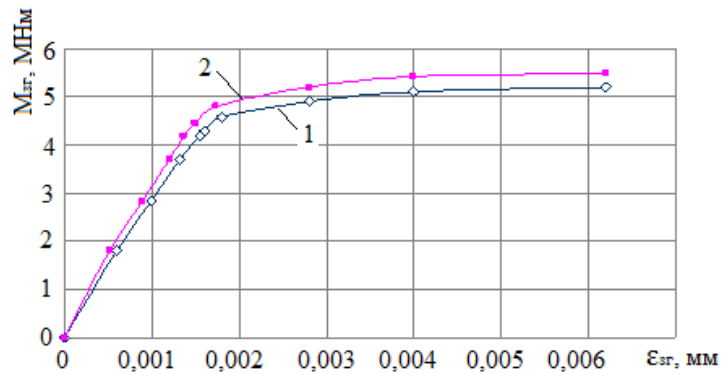
На *рис.3*. показано фотографії зруйнованого зварного шва магістрального газопроводу (МГ) на ділянці Комарно – Дроздовичі Ду 500 мм. Аварійний витік газу відбувся внаслідок розкриття тріщини в кільцевому зварному шві за тиску 4,4 МПа (див. *рис.3а*). МГ Комарно – Дроздовичі

був введений в експлуатацію у 1961 р, змонтований із труб зі сталі марки 14ХГС і призначений для транспортування газу.

Згідно сертифікату №580 Харцизького трубного заводу (ХТЗ) на сталеві електрозварні газопровідні труби розміром 529x8 мм, які виготовлені згідно технічних умов 182-60 зі сталі марки 14ХГС за ТУ №10161-56, матеріал труби має наступні фізико-механічні характеристики: границя міцності $\sigma_b=555,0-575,0$ МПа; границя текучості $\sigma_T = 380,0-400,0$ МПа. Результати металографічних досліджень зразків, вирізаних із труб розглянутої ділянки МГ "Комарно – Дроздовичі" показали, що матеріал проб сталі мав наступні фізико-механічні і технологічні характеристики: границя міцності $\sigma_b=487$ МПа; границя текучості $\sigma_T= 238$ МПа; відносне видовження $\varepsilon= 27$ %; відносне звуження $\psi= 50,9$; ударна вязкість КСУ= 54 Дж/см².



a



b

Рис. 2. Дослідження зварного шва при стендових випробуваннях ділянки трубопроводу: a - руйнування дефектного зварного шва; b - Залежність згинального моменту від параметра кривизни: під час випробовування труби: 1 – за результатами випробувань; 2 – за результатами розрахунку [19]

За результатами обстеження можна відмітити, що у результаті деградації металу тіла труби, циклічних навантажень та недопустимих дефектів у зоні кільцевого шва, під дією напружень утворилась наскрізна тріщина довжиною 1250 мм, і відбулося руйнування зварного кільцевого шва. Стик був заварений з грубим порушенням технології зварювання [20] з непроваром у корені шва. На зварне з'єднання діяли додаткові напруження від пружного згину трубопроводу, що виникли у результаті горбистого рельєфу місцевості. Тріщина у заповненні зварного шва довжиною 520 мм утворилась значно раніше, про що свідчить рис. 3, b. У зоні трубопроводу, що примикає до місця аварії виявлено ще ряд дефектних кільцевих зварних швів.



a



b

Рис.3. Вигляд зруйнованого зварного шва магістрального газопроводу після аварійного витoku газу: a – стан трубопроводу після розкриття тріщини в кільцевому зварному шві; b – фрагмент перерізу труби з суцільною тріщиною в зоні зварного шва

Оскільки руйнування зварного шва МГ "Комарно – Дроздовичі" відбулося у січні місяці у густонаселеному районі, то дану аварію необхідно було ліквідувати дуже оперативно. Виходячи з цього на місці зруйнованого зварного шва було встановлено котушку, що дозволило транспортувати газ при пониженому тиску. Для визначення можливості подальшої безпечної експлуатації ділянки МГ, що безпосередньо прилягає до зони руйнування зварного шва газопроводу були проведені комплексні обстеження. Ділянка газопроводу довжиною 80 м, яка безпосередньо примикає до місця руйнування кільцевого зварного шва була розбита на зони, у які ввійшли місця розташування де відбувся витік газу і чотирьох шурфів. Використовувались технології, що дають можливість визначати просторове положення трубопроводів як з поверхні землі за допомогою електромагнітних трасошукачів, так і безпосереднім контактом з тілом труби у шурфі. Прив'язка визначених точок осі трубопроводу до просторових державних координат проводилась за допомогою GPS-приймачів. Із результатів відхилень осі трубопроводу в горизонтальній і вертикальній площинах видно, що положення у горизонтальній площині суттєво відрізняється від прямолінійного положення і досягає 2 м на відстані 12 м, що обумовило виникнення додаткових напружень в трубопроводі вже на стадії монтажу. У зв'язку з цим враховували додаткові напруження, що виникають в трубопроводі за рахунок відхилення його осі від прямолінійності, використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ), у тому числі і програмний комплекс "Solid Works Simulation".

Місцезнаходження шурфів вибирали на ділянках найменших радіусів пружного вигину труби, за результатами досліджень просторового розташування трубопроводу, стану електрохімічного захисту, а також можливих зсувів і результатів попередніх обстежень. Під час діагностики були проведені обстеження твердості безпосередньо матеріалу шва і біляшовної зони кільцевих зварних з'єднань у шурфі суміжному із зруйнованою ділянкою газопроводу. Схема розміщення точок заміру твердості металу труби, шва і біляшовної зони показана на рис. 4. Результати замірів твердості за шкалою Брюнелля (НВ) у різних зонах заміру у шурфі №1 наведені у таблиці 1.

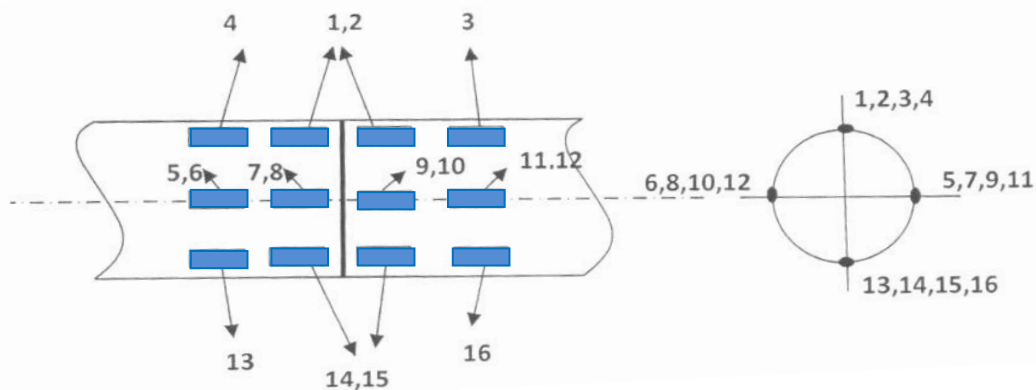


Рис.4. Схема розміщення точок заміру твердості металу труби і шва: 1,2,7,8,9,10,14,15 – біляшовна зона; 3,4,5,6,11,12,13,16 – на віддалі 200 мм від зварного шва

Таблиця 1.

Значення твердості металу труби і зварного шва у різних точках заміру у шурфі №1

№ зони заміру	Значення твердості, НВ Н/мм ²
1,7,8,14	1930,1870,1850,1920
2,9,10,15	1840,1770,1790,1800
4,5,6,13	1680,1530,1560, 1610
3,11,12,16	1490,1470,1480,1440

Аналіз отриманих результатів під час натурних вимірювань показав, що твердість металу зварного шва зліва біляшовної зони лежить у діапазоні 1920-1850 Н/мм², а справа – відповідно 1840-1770 Н/мм². Твердість металу труби на відстані 200 мм зліва від осі шва лежить у діапазоні 1680-1530 Н/мм², а відповідно справа 1490-1480 Н/мм², що указує на деяку різницю механічних характеристик двох суміжних труб. Твердість металу зварного шва у біляшовній зоні досягає значень 1770-1930 Н/мм² і відповідає рекомендованим нормативним значенням [20], яке повинно знаходитись у діапазоні 1600-2000 Н/мм².

Суть удосконаленого експрес-методу визначення НДС і оцінки роботоздатності аварійної ділянки трубопроводу полягає у тому, що більшість робіт і розрахунків оперативно проводиться безпосередньо на основі одержаних даних експериментальних досліджень, проведених у трасових умовах. З цією метою удосконалено методику визначення границі текучості та границі міцності металу труб у польових умовах за результатами вимірювань інформативного параметра твердості портативними твердомірами. Під час удосконалення експрес-методу оцінки роботоздатності МГ були проведені ряд напрацювань. Зокрема було здійснено дослідження твердості на спеціально виготовлених зразках. До проведення випробування їх на розтяг, здійснювались заміри твердості та границі текучості втисканням кульки згідно [21] і за допомогою переносного твердоміра "ТЕМП-3" згідно нормативного документу [11]. Різниця між середніми результатами визначення твердості металу труби за допомогою стаціонарного твердоміра і переносного твердоміра «ТЕМП-3» з врахуванням експериментально встановленого коефіцієнта кореляції не перевищувала 1,7 %.

Використовуючи залежності, які рекомендовані в [11] визначали границю текучості σ_T і границю міцності σ_B на основі значень заміряної приладом «ТЕМП-3» твердості за Брінеллем:

$$\sigma_T = 0,367 \text{ HB} - 240 = 0,367 \times 1610 - 240 = 350,87 \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$\sigma_B = 0,345 \text{ HB} = 0,345 \times 1610 = 555,45 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Заготовлені зразки випробували на розривній машині у результаті чого встановлювали границю текучості σ_T і границю міцності σ_B і порівнювали з аналогічними параметрами отриманими за формулами (1) і (2). Порівняння усереднених результатів вимірювання твердості і механічних характеристик матеріалу плоских зразків на розривній машині і аналогічними параметрами визначеними за допомогою динамічного переносного твердоміра "ТЕМП-3" за формулами (1) - (2) показали задовільну збіжність.

У випадку зменшення товщини стінки ділянки труби, наприклад корозійної виразки, міцність трубопроводів оцінювали за методом граничних станів згідно [16]. Для комплексного розрахунку такої проблемної ділянки МГ застосувати метод скінченних елементів (МСЕ). Використання МСЕ вдало поєднує матричне представлення основних рівнянь рівноваги і руху з застосуванням комп'ютерної техніки для їх розв'язання. При розробці математичної моделі застосовували плоскі або об'ємні елементи типу PIPE, BEAM, TRIANG, SHELL, SOLID та інші. Континуальну суцільну конструкцію замінювали сукупністю скінченних елементів, з'єднаних між собою у вузлах кінцевим числом жорстких зв'язків. Взаємодію трубопроводу з ґрунтом представляли у вигляді моделі пружно-пластичного тіла. Диференціальні рівняння дійсної системи приведені до системи алгебраїчних рівнянь, яка відповідає числу ступенів вільності всієї ідеалізованої системи. Для цього всередині зони кожного дискретного елемента задавали розподіл узагальнених переміщень чи напружень або ж сумісний розподіл переміщень і напружень. Істотним є вибір оптимального числа елементів та кількості вузлів таким чином, щоб забезпечити достатню точність розрахунків, а також виявлення оптимального числа ітерацій. Визначивши вектор переміщень вузлів елементів МТ, використовуючи узагальнений закон Гука, знаходили розрахункові напруження. Сумарні напруження визначали на основі теорії Губера-Мізеса і порівнювали з допустимими напруженнями.

Розрахунок коефіцієнтів запасу міцності трубопроводів з гострокінцевими дефектами за статичного навантаження проводимо на основі діаграми оцінки руйнування (ДОР), яка є граничною кривою, що визначає границю міцності між безпечним та небезпечним станами ділянок трубопроводів. ДОР ґрунтується на двокритеріальному підході і дозволяє одночасно аналізувати два граничні стани – крихкий та в'язкий [22]

$$Y = f(S_r, K_r), \quad (3)$$

де $K_r = K_1 / K_{1c}$ характеризує міру наближення до крихкого руйнування в деякій точці в зоні тріщиноподібного дефекту, K_1 - розрахунковий КІН, K_{1c} - критичне значення КІН, а $S_r = \sigma_{ref} / \sigma_B$ - оцінює міру наближення до в'язкого руйнування, σ_B - границя міцності, σ_{ref} - довідкове напруження. Існують різні подання функції (3), обґрунтовані головним чином на узагальненні експериментальних даних. Зокрема, в нормативному документі [23] рекомендовано ДОР будувати в координатах $K_r - S_r$.

Параметри K_r і S_r – комплексні і включають характеристики напружено-деформованого стану, форми і розміри дефектів, а також властивості матеріалу, що визначають опір матеріалу відповідно крихкому та в'язкому руйнуванню

$$K_1 = K_1^H + K_1^{res}, \quad (4)$$

де K_1^H визначається зовнішнім навантаженням, а K_1^{res} – залишковими напруженнями.

Тоді, відповідно:

$$K_r = K_r^H + K_r^{res}. \quad (5)$$

Згідно настанови [24] залежно від значень коефіцієнта запасу міцності гострокінцеві дефекти віднесено до трьох умовних категорій: незначний, помірний, значний, і критичний.

Розроблені алгоритм і програма для оцінки коефіцієнта запасу міцності ділянок трубопроводу з дефектами з врахуванням зміни параметрів тріщиностійкості ударної в'язкості (KCV) і коефіцієнта інтенсивності напружень (K_{1c}) металу труб. Визначені допустимі розміри тріщиноподібних дефектів і максимальний тиск газу, за яких експлуатація МТ буде безпечною.

Висновки. Аналізуючи вище викладене, можна зробити такі висновки:

1. На основі проведених досліджень зруйнованого зварного шва у шурфі і металографічних робіт у лабораторії встановлено, що стикове з'єднання було виконано з грубими порушеннями технології зварювання з непроваром у корені шва. Тріщина довжиною 520 мм утворилась значно раніше від моменту аварії, розгерметизація якої відбулася при тиску $P=4.4$ МПа.

2. Результати експериментальних досліджень засвідчили, що існує певна закономірність між твердістю тіла труби, визначеною переносними твердомірами у трасових умовах і їх границею міцності і границею плинності. Отримані результати логічно узгоджуються з результатами інших авторів [8] і нормативними документами [11].

3. Оцінку НДС ділянок тривало експлуатованих МТ, що пролягають на горбистій місцевості необхідно проводити з урахуванням деградації металу труб, сумарних навантажень і впливів: з урахуванням залишкових напружень у зоні зварних швів і додаткових напружень пружного згину трубопроводу з використанням методу скінченних елементів і двокритеріального підходу оцінки руйнування для гострокінцевих дефектів..

4. На основі аналізу проблем тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів і проведених експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано методичні засади удосконаленого експрес методу оцінки роботоздатності потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів.

Література

1. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость [Текст] / А. Б. Айнбиндер // – М.: Недра, 1991. – 287 с.
2. Орыняк И.В. Оценка предельного давления трубы с вмятиной / И.В. Орыняк, Л.С. Шлапак // Проблемы прочности. – 2001. – № 5. – С. 101 – 110.
3. Дарчук О. І. Розрахункова схема трубопроводу підсиленого бандажем. / О. І. Дарчук, Й. Й. Лучко, В. А. Зозуляк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів: Каменярь, 1998. – Вип. 3. – С. 584-593.
4. Kuchma A. Estimation of work capacity of pipelines on the bases of results of semimodel testing / A. Kuchma, J. Luchko // Scientific journal of the Ternopil national technical university. – 2018. – №2. (90) – Р. 39-49.
5. Визначення величини розкриття вершини тріщини у пружнопластичних тілах / В. В. Панасюк, О. Є. Андрейків, М. М. Стадник, І. В. Дідух // Физ.-хим. механика материалов. – 1990. – № 6. – С. 53-61.
6. Білобран Б. С. Розрахунок однопрогонового балкового трубопроводу з , допомогою чисельних методів/ Б.С. Білобран, Й.Й. Лучко // Механіка і фізика та руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Львів: Каменярь, 2002. – Вип. 5 – С. 12-20.
7. Білобран Б. С. Особливості роботи надземних переходів магістральних нафтопроводів у гірських умовах / Б.С. Білобран, Й.Й. Лучко, Р.В. Климончук // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. Львів: Каменярь, 2002. – Вип..543 С.443-454.
8. Андрусяк А.В. Оцінювання межі текучості та тимчасового опору трубної сталі «Ц» за твердістю за Брінелем. / А.В. Андрусяк, Б.С. Білобран // Матеріали 11-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів механіків у Львові, 25-27 травня 2011 р.-Львів : КІНПАТРИ ЛТД.-2011.- С.269-271

9. Лобанов Л.М. Влияние пластической деформации на структуру, механические свойства и коэрцитивную силу металла кислородных баллонов / Л.М. Лобанов, В.А. Нехотящий, М.Д. Рабкина, В.А. Костин [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 4. – 2011. – С. 14 – 23.
10. Імбірочич Н.Ю. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів: навч.посібник / Н.Ю. Імбірочич, В.І. Швабюк // – Луцьк: Вежа-Друк, 2015.– 340 с.
11. СОУ 60.3-30019801-007:2004. Стандарт організації України: Магістральні газопроводи. Неруйнівний контроль при капітальному ремонті.– К.: ДК «Укртрансгаз», 2004. – 54 с.
12. Enrique Acuna C. Minimising threats and maximising safety: an integrity management system // Pipelines International.- Issue 34. - 2017. – P. 38 – 40.
13. Alexander Chris, Evaluating damage to on – and offshore pipelines using data acquired using ILL. // Journal of pipeline engineering.-Vol.8, №1 First Quarter.- 2009.- P. 35-46.
14. Банахевич Ю. В. Залишковий ресурс труб нафтопроводів з тріщинами і оптимізація параметрів їх експлуатації / Ю.В. Банахевич, О.С. Андрейків, М.Б. Кіт // У кн.: Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. – Львів, 2009. – С. 853–858.
15. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г.М. Никифорчин, С.Г. Поляков, В.А. Черватюк, І.В. Ориняк, З.В. Слободян, Р.М. Джала. Під ред. Г.М. Никифорчина. – Львів: «Сполом», 2009. – 504 с.
16. СНиП-2.05.06-85. Строительные нормы и правила: Нормы проектирования магистральных трубопроводов. – М.: Стройиздат, 1985. – 62 с.
17. Обыденный А.А., Андреев А.А., Билобран Б.С., Слюсаренко М.И. Проверочные испытания на прочность трубопровода диаметром 1220мм при капитальном ремонте изоляции. – М.ВНИИОЭНГ, РНТС Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1983.–№8.– с, 8-10.
18. Білобран Б. С. Вплив внутрішнього тиску на жорсткість тонкостінної труби під час згину з розтягом (стиском) за границею пропорційності / Б. С. Білобран, О. Б. Кінаш // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. - Львів: Каменяр, – 2000. – Вип.4. – С. 553-560.
19. Білобран Б. С. Пружно-пластичний стан тонкостінної труби при згині з розтягом (стиском)/ Б. С. Білобран, О. Б. Кінаш // Науково-технічний журнал «Проблеми міцності», 1998.– №6. – С. 99-106.
20. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка: ВСН 006-89 – М.: Миннефтегазстрой. 1989.- 216 с.
21. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.-М.: Издательство стандартов, 1978.- 14 с.
22. Осадчук В. А. Оцінка допустимості дефектів типу кільцевих тріщин в зоні зварних монтажних швів магістральних трубопроводів / В.А. Осадчук, Ю.В. Банахевич // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2010. – 53, № 2. – С. 37 – 45.
23. API 579. Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579, First Edition, American Petroleum Institute. – 2000. – 625 p.
24. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. ДСТУ–НБВ.2.3–:2008. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 88 с.

УДК 534.29+539.5

В.А. Мащенко**Одеська державна академія технічного регулювання та якості
ВІДБИВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ВІД МЕЖІ РІДИНИ ТА
АУКСЕТИК-СЕРЕДОВИЩА**

Розглянуто задачу відбивання поздовжніх і поперечних хвиль від межі рідини та однорідного пружного ауксетик-середовища з від'ємним коефіцієнтом Пуассона. Визначені амплітуди потенціалів відбитих та трансформованих акустичних хвиль в пружному ауксетик-середовищі та амплітуди потенціалів збудження акустичної хвилі в рідині. Оговорені умови виникнення критичних кутів в залежності від фізичних параметрів контактуючих середовищ.

Ключові слова: поздовжня та поперечна акустичні хвилі, ауксетик-середовище, коефіцієнти відбивання, трансформації та збудження акустичних хвиль.

В.А. Мащенко**ОТРАЖЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТИ И
АУКСЕТИК-СРЕДЫ**

Рассмотрено задачу продольных и поперечных отражение волн от границы жидкости и однородной упругой ауксетик-среды с отрицательным коэффициентом Пуассона. Определены амплитуды потенциалов отраженных и трансформированных волн в упругой ауксетик-среде и амплитуды потенциалов возбуждения акустической волны в жидкости. Оговорена возможность возникновения критических углов в зависимости от физических параметров контактирующих сред.

Ключевые слова: продольная и поперечная акустические волны, ауксетик-среда, коэффициенты отражения, трансформации и возбуждения акустических волн.

V. Mashchenko**REFLECTION OF ACOUSTIC WAVES FROM THE BORDER OF LIQUID AND
AUXETIC MEDIUM**

The problem of longitudinal and transverse reflection of waves from the boundary of a fluid and a homogeneous elastic auxetic medium with a negative Poisson's ratio is considered. The amplitudes of the potentials of the reflected and transformed waves in an elastic auxetic medium and the amplitudes of the excitation potentials of an acoustic waves in a liquid are determined. The possibility of occurrence of critical angles depending on the physical parameters of the contacting media.

Key words: longitudinal and transverse acoustic waves, auxetic medium, reflection, excitation and reflection of coefficients acoustic waves.

Постановка проблеми. При падінні поздовжньої (l) та поперечної (t) акустичних хвиль на межу рідини і пружного середовища, крім відбитих і трансформованих хвиль в останньому, у рідині збуджується поздовжня акустична хвиля. Розподіл енергії між падаючою, відбитою, трансформованою та збудженою хвилями визначається структурно-механічними параметрами середовищ: густиною (ρ), швидкостями поширення поздовжньої (v_l) та поперечної (v_t) хвиль, відповідно коефіцієнтом Пуассона (ν) пружного середовища і кутом падіння акустичної хвилі із пружного середовища [1].

На сьогодні відомий цілий клас гетерогенних та конструктивних матеріалів, які володіють від'ємним коефіцієнтом Пуассона – „ауксетики”. Теоретичні та експериментальні дослідження процесів поширення різного типу акустичних хвиль в таких матеріалах мають прикладне значення в багатьох областях науки і техніки, зокрема, у механіці деформованого тіла за умови динамічних та імпульсних навантажень [2], метрології та дефектоскопії при розробці приладів та систем для вимірювання механічних та акустичних величин [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Детальні теоретичні дослідження процесів відбивання пружних хвиль від вільної поверхні твердих тіл проведені в роботах [1, 4–6] для всього діапазону можливих значень величини ν ($-1 \leq \nu \leq 0,5$ [7]). Для задачі падіння поздовжньої та поперечної хвиль на межу рідини і твердого тіла, в роботі [8] проведені розрахунки коефіцієнтів відбивання, трансформації хвиль та коефіцієнту збудження поздовжньої хвилі у рідині в залежності від величин v_l та v_t та кутів їх падіння тільки додатних значень коефіцієнта Пуассона пружного середовища.

Постановка завдань. Теоретичні та експериментальні дослідження процесів відбивання та збудження пружних хвиль на межі рідини і твердого тіла проведені в діапазоні додатних значень коефіцієнта Пуассона і не розглядають випадки з $\nu < 0$. Відповідно, метою роботи є аналіз

параметрів задачі і розрахунок коефіцієнтів відбивання та трансформації хвиль і коефіцієнту збудження поздовжньої хвилі в залежності від величини ν пружного ауксетик-середовища.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо задачу падіння плоскої хвилі із пружного середовища з від'ємним коефіцієнтом Пуассона на межу поділу із рідиною. Плоска монохроматична пружна хвиля, хвильовий вектор якої лежить в площині xz , в однорідному пружному середовищі може бути представлена двома скалярними функціями координат без врахування фазового множника $\exp(i(\xi x - \omega t))$, де ξ – горизонтальна компонента відповідного хвильового вектора поздовжньої (k_l) та поперечної (k_t) хвиль, ω – циклічна частота (індекси „1” і „2”, відповідно, будуть визначати параметри хвилі у пружному середовищі та рідині).

$$\begin{aligned}\varphi(x, z) &= \varphi_1 e^{i\alpha_1 z} + \varphi_2 e^{-i\alpha_1 z}, \\ \psi(x, z) &= \psi_1 e^{i\beta_1 z} + \psi_2 e^{-i\beta_1 z},\end{aligned}\quad (1)$$

де $\alpha_1 = \sqrt{k_{l1}^2 - \xi^2}$, $k_{l1} = \omega/\nu_{l1}$, $\text{Im}\alpha_1 \geq 0$; $\beta_1 = \sqrt{k_{t1}^2 - \xi^2}$, $k_{t1} = \omega/\nu_{t1}$, $\text{Im}\beta_1 \geq 0$.

У рідині потенціал хвилі визначимо наступним чином:

$$\tilde{\varphi}(x, z) = \tilde{\varphi}_1 e^{i\alpha_2 z}, \quad (2)$$

де $\alpha_2 = \sqrt{k_2^2 - \xi^2}$, $k_2 = \omega/\nu_2$, $\text{Im}\alpha_2 \geq 0$, k_2 – хвильовий вектор акустичної хвилі в рідині, ν_2 – швидкість поширення.

Величини ξ , α_1 , β_1 , α_2 , визначаються через кути падіння, відповідно, поздовжньої (θ_l) та поперечної (θ_t) хвиль та хвильові числа, причому на межі виконується закон Снеліуса [4] (рис. 1):

$$k_{l1} \sin \theta_l = k_{t1} \sin \theta_t = k_2 \sin \theta, \quad (3)$$

$$\xi = k_{l1} \sin \theta_l = k_{t1} \sin \theta_t, \quad \alpha_1 = k_{l1} \cos \theta_l = \sqrt{k_{l1}^2 - k_{t1}^2 \sin^2 \theta_t}, \quad \beta_1 = k_{t1} \cos \theta_t = \sqrt{k_{t1}^2 - k_{l1}^2 \sin^2 \theta_l},$$

$$\alpha_2 = \sqrt{k_2^2 - k_{l1}^2 \sin^2 \theta_l} = \sqrt{k_2^2 - k_{t1}^2 \sin^2 \theta_t}.$$

Із принципу суперпозиції випливає, що амплітуди $\varphi_1, \psi_1, \tilde{\varphi}_1$ хвиль, які поширюються від межі поділу середовищ, лінійно пов'язані з амплітудами φ_2, ψ_2 падаючих хвиль наступним чином:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \psi_1 \\ \tilde{\varphi}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{V}_{ll} & \tilde{V}_{lt} \\ \tilde{V}_{tl} & \tilde{V}_{tt} \\ \tilde{W}_{ll} & \tilde{W}_{lt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_2 \\ \psi_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

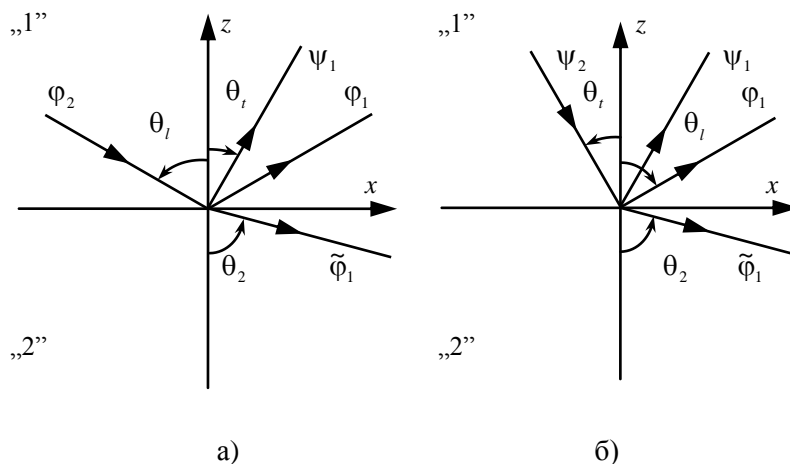


Рис. 1. Схема падіння хвиль поздовжньої хвилі (а) та поперечної хвилі (б) на межу поділу півпросторів.

Величини \tilde{V}_{ll} , \tilde{V}_{lt} , \tilde{W}_{ll} , \tilde{V}_{tl} , \tilde{V}_{tt} , \tilde{W}_{lt} із співвідношення (4) мають наступний фізичний зміст: \tilde{V}_{ll} – коефіцієнт відбивання поздовжньої хвилі у верхньому середовищі при падінні поздовжньої хвилі $\tilde{V}_{ll} = \varphi_1/\varphi_2$ (при $\varphi_2 = 1$, $\psi_2 = 0$); \tilde{V}_{lt} – коефіцієнт трансформації падаючої поздовжньої хвилі у поперечну хвилю у верхньому середовищі $\tilde{V}_{lt} = \psi_1/\varphi_2$ (при $\varphi_2 = 1$, $\psi_2 = 0$); \tilde{W}_{ll} – коефіцієнт збудження поздовжньої хвилі у нижньому середовищі при падаючій поздовжній хвилі із

верхнього середовища $\tilde{W}_{II} = \tilde{\varphi}_1/\varphi_2$ (при $\varphi_2 = 1, \psi_2 = 0$); \tilde{V}_{II} – коефіцієнт відбивання поперечної при падінні поперечної хвилі у верхньому середовищі $\tilde{V}_{II} = \psi_1/\psi_2$ (при $\psi_2 = 1, \varphi_2 = 0$); \tilde{V}_{II} – коефіцієнт трансформації падаючої поперечної хвилі у поздовжню хвилю у верхньому середовищі $\tilde{V}_{II} = \varphi_1/\psi_2$ (при $\psi_2 = 1, \varphi_2 = 0$); \tilde{W}_{II} – коефіцієнт збудження поздовжньої хвилі у нижньому середовищі при падаючій поперечній хвилі із верхнього середовища $\tilde{W}_{II} = \tilde{\varphi}_1/\psi_2$ (при $\psi_2 = 1, \varphi_2 = 0$).

Коефіцієнт відбивання поздовжньої хвилі визначається наступним чином [1]:

$$\tilde{V}_{II} = \frac{Z + Z_l \sin^2 2\theta_l - Z_l \cos^2 2\theta_l}{Z + Z_l \sin^2 2\theta_l + Z_l \cos^2 2\theta_l}, \quad (5)$$

де $Z = \frac{\rho_2 v_2}{\cos \theta}$, $Z_l = \frac{\rho_1 v_{l1}}{\cos \theta_l}$, $Z_t = \frac{\rho_1 v_{t1}}{\cos \theta_l}$.

Відповідно, коефіцієнти трансформації поздовжньої хвилі у поперечну в пружному середовищі та акустичну хвилю рідині рівні:

$$\tilde{V}_{II} = -\frac{2ctg\theta_l \sin^2 \theta_l}{\cos 2\theta_l} (1 - \tilde{V}_{II}), \quad (6)$$

$$\tilde{W}_{II} = \frac{tg\theta_l ctg\theta_l}{\cos 2\theta_l} (1 - \tilde{V}_{II}). \quad (7)$$

Коефіцієнт відбивання поперечної хвилі визначається наступним чином:

$$\tilde{V}_{II} = -\frac{Z + Z_l \cos^2 2\theta_l - Z_l \sin^2 2\theta_l}{Z + Z_l \cos^2 2\theta_l + Z_l \sin^2 2\theta_l}. \quad (8)$$

Враховуючи (8) отримаємо співвідношення для коефіцієнтів трансформації поперечної хвилі в поздовжню у пружному середовищі та збудження акустичної хвилі в рідині:

$$\tilde{V}_{II} = \frac{tg\theta_l \cos 2\theta_l}{2 \sin^2 2\theta_l} (1 + \tilde{V}_{II}), \quad (9)$$

$$\tilde{W}_{II} = \frac{tg\theta_l}{2 \sin^2 2\theta_l} (1 + \tilde{V}_{II}). \quad (10)$$

Результати та обговорення. Теоретичні розрахунки за співвідношеннями (5)–(10) проведені для гетерогенних та конструкційних матеріалів з $\nu < 0$: пісковик Weber, термопластичний поліуретан (ТПУ) і металонаповнені (W, Mo) композиції на його основі (рис. 2–5). Параметри ауксетик-середовищ представлені в табл. 1 [9]. Модельною рідиною слугувало силіконове масло ПФМС–4 ($\rho_2 = 1005,74 \text{ кг/м}^3$, $v_2 = 1395 \text{ м/с}$) [10], що може використовуватися при імерсійному методі вимірювання швидкостей поширення поздовжніх та поперечних хвиль у твердих тілах.

Коефіцієнт Пуассона при відомих швидкостях поширення v_{l2} та v_{t2} визначається за співвідношенням [7]:

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{v_{l1}}{v_{t1}}\right)^2}{2 \left(1 - \frac{v_{l1}^2}{v_{t1}^2}\right)}. \quad (11)$$

Таблиця. 1

Параметри ауксетик-середовищ

Середовище	Матеріал	ν	v_{l1} , м/с	v_{t1} , м/с	ρ_1 , кг/м ³	$\rho_1 v_{l1} \cdot 10^{-6}$, кг/(м ² ·с)	$\rho_1 v_{t1} \cdot 10^{-6}$, кг/(м ² ·с)
1	Пісковик Weber	-0,09	2450	1800	2151	5,27	3,87
2	ТПУ+W	-0,24	1775	1370	9888	17,55	13,55
3	ТПУ+Mo	-0,39	1755	1405	4603	8,08	6,47
4	ТПУ	-1	1635	1415	1107	1,81	1,56

Аналіз залежностей коефіцієнта відбивання $\tilde{V}_{||}$ від кута падіння поздовжньої хвилі для ауксетик-середовищ показує (рис. 2а), що вони мають три основні характеристичні точки – кути обміну поляризацією при $\tilde{V}_{||} = 0$ і точку $(\theta_{l\max})$, при якій величина $\tilde{V}_{||}$ має локальний максимум.

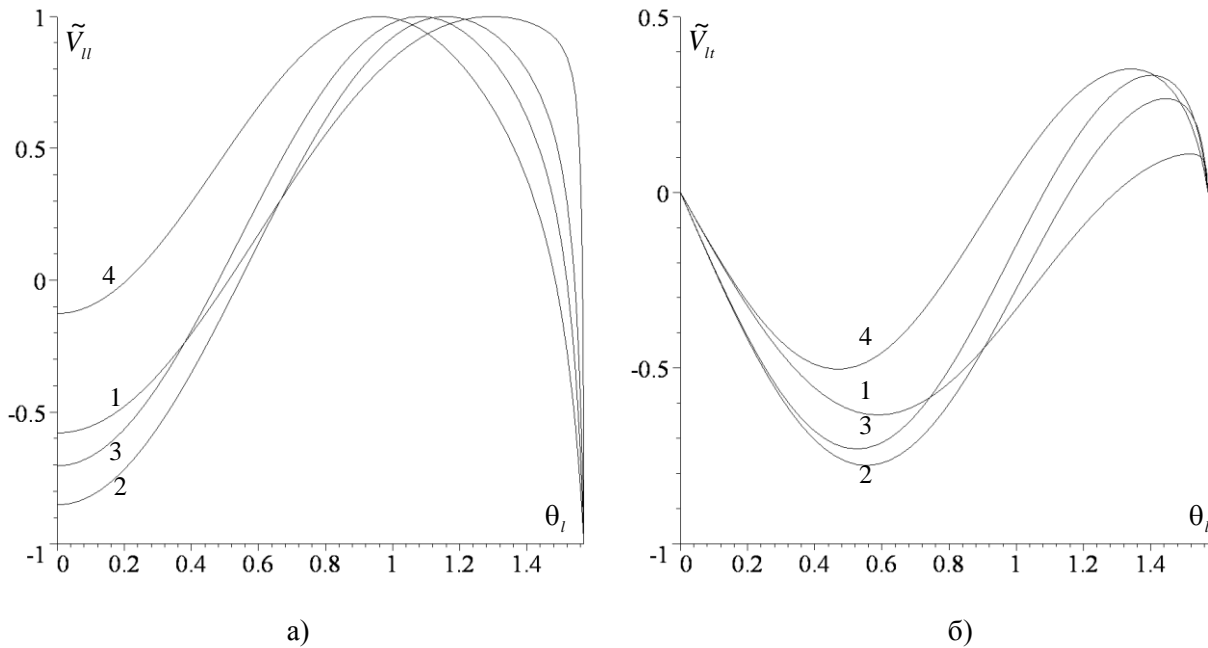


Рис. 2. Залежності коефіцієнту відбивання $\tilde{V}_{||}$ (а) та коефіцієнту трансформації \tilde{V}_{tr} (б) при падінні поздовжньої хвилі із середовищ 1–4 на межу поділу із рідиною.

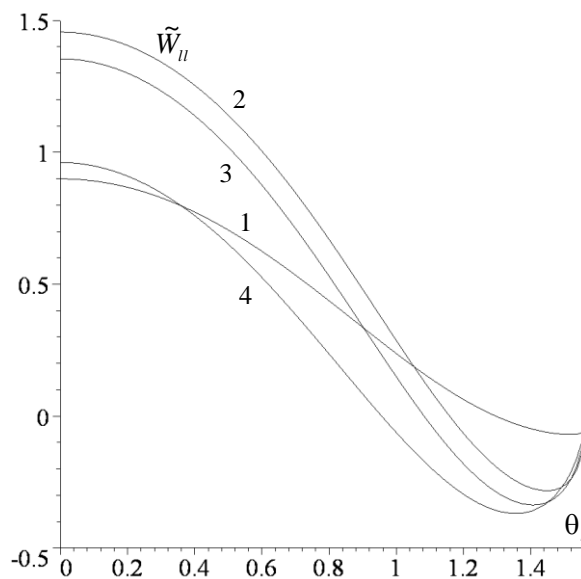


Рис. 3. Залежності коефіцієнту збудження поздовжньої хвилі у рідині $\tilde{W}_{||}$ при падінні поздовжньої хвилі із середовищ 1–4 на межу поділу.

Характерною особливістю функціональних залежностей $\tilde{V}_{||} = f(\theta_l)$ при кутах $\theta_{l\max}$ для ауксетик-середовищ є рівність величини $\tilde{V}_{||}$ одиниці.

Порівняльний аналіз залежностей $\tilde{V}_{||}$ і \tilde{V}_{tr} від величини θ_l показує (рис. 2), що при кутах $\theta_{l\max}$ значення величини $\tilde{V}_{||}$ рівне нулю – трансформація в поперечну хвилю не відбувається, а відбивання поздовжньої проходить в проті фазі без зміни амплітуди. Кути $\theta_{l\max}$ для середовищ з від'ємним коефіцієнтом Пуассона розраховуються за співвідношенням:

$$\theta_{l_{max}} = \arcsin \left[\left(\frac{2\nu - 2}{4\nu - 2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (11)$$

При нормальному падінні поздовжньої хвилі ($\theta_l = 0$) амплітуди коефіцієнта відбивання \tilde{V}_{ll} визначається акустичними жорсткостями ауксетик-середовища для поздовжньої хвилі $\rho_1 v_{ll}$ і зростають в ряді 2, 3, 1, 4, відповідно із зменшення акустичної жорсткості середовища (табл. 1).

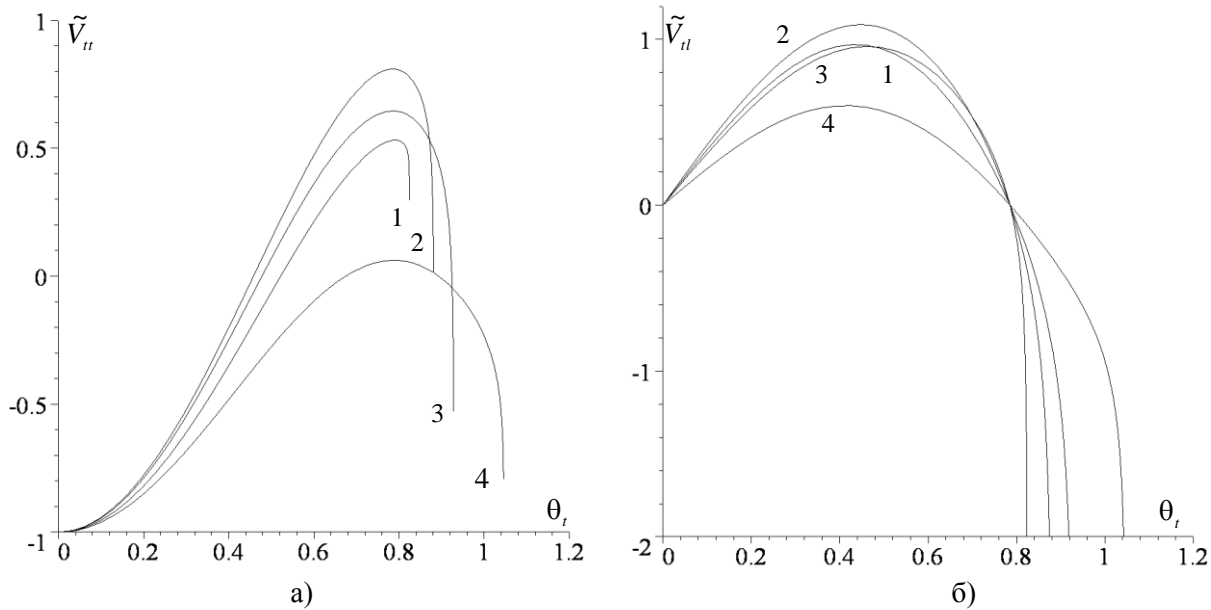


Рис. 4. Залежності коефіцієнту відбивання \tilde{V}_{ll} (а) та коефіцієнту трансформації \tilde{V}_{ll} (б) при падінні поперечної хвилі із середовищ 1–4 на межу поділу із рідиною.

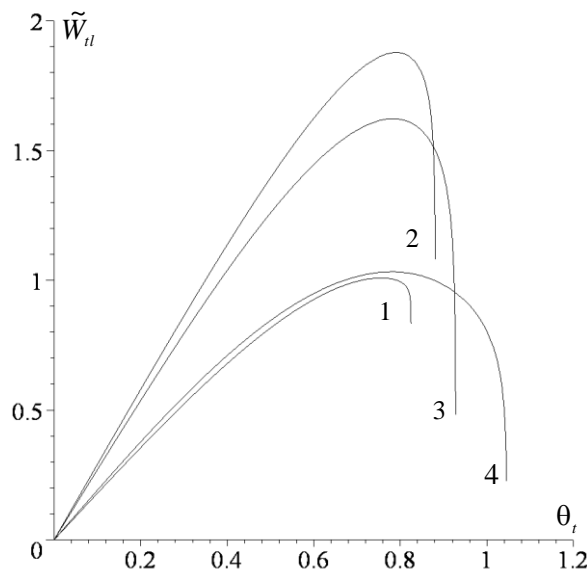


Рис. 5. Залежності коефіцієнту збудження поздовжньої хвилі у рідині \tilde{W}_{ll} при падінні поперечної хвилі із середовищ 1–4 на межу поділу.

Аналіз залежностей величини \tilde{W}_{ll} від кута падіння поздовжньої хвилі (рис. 3) показує, що характер поведінки визначається величиною $\rho_1 v_{ll}$ і коефіцієнтом Пуассона ауксетик-середовища. Криві монотонно спадають до чітко виражених локальних мінімумів при кутах близьких до $\pi/2$, в яких величина \tilde{V}_{ll} має максимум для відповідних середовищ.

Залежності величин відбивання \tilde{V}_{ll} від кута падіння поперечної хвилі представлені на (рис. 4а). Криві $\tilde{V}_{ll} = f(\theta_l)$ двічі перетинають пряму $\tilde{V}_{ll} = 0$, визначаючи кути обміну

поляризаціями, і мають максимуми у точці $\pi/4$. Величина максимуму визначається акустичною жорсткістю для поперечної хвилі $\rho_1 v_{H1}$ ауксетик-середовища і зростає в ряді 4, 1, 3, 2 із відповідним зростанням величини $\rho_1 v_{H1}$ (табл. 1).

Аналіз залежностей \tilde{V}_{H1} від кута θ_t (рис. 4б) для ауксетик-середовищ, показує, що при $\theta_t = \pi/4$ величини \tilde{V}_{H1} рівна нулю – відбувається повне відбивання поперечної хвилі без трансформації у поздовжню.

Залежності коефіцієнтів збудження поздовжньої хвилі у рідині \tilde{W}_{H1} від кута падіння поперечної хвилі θ_t на межу поділу дещо подібні до функціональних залежностей \tilde{V}_{H1} (рис. 5). При цьому слід відмітити, що величина максимум визначається також зміною акустичної жорсткості для поперечної хвилі ауксетик-середовища, за виключенням середовищ 1 та 4, і зростає в ряді 1, 4, 3, 2.

Характерною особливістю функціональних залежностей \tilde{V}_{H1} та \tilde{W}_{H1} є наявність критичного кута $\theta_{кр.}$, при якому спостерігається повне внутрішнє відбивання – відбита хвиля є поверхневою, а їх значення \tilde{V}_{H1} і \tilde{W}_{H1} прямують до нескінченності. Величина кута $\theta_{кр.}$ залежить від коефіцієнта Пуассона ауксетик-середовища (рис. 4, 5) і визначається за співвідношенням:

$$\theta_{од.} = \arcsin \left(\left(\frac{2\nu - 1}{2\nu - 2} \right)^{\frac{1}{2}} \right). \quad (11)$$

Висновки. Характер залежностей коефіцієнтів відбивання, трансформації та збудження при падінні поздовжньої та поперечної хвиль на межу поділу ауксетик-середовища та рідини залежить від коефіцієнта Пуассона та акустичних жорсткостей контактуючих середовищ. Критичні кути, при яких відбувається обмін поляризацією та повне внутрішнє відбивання від межі рідини та ауксетик-середовища, визначається величиною коефіцієнту Пуассона.

Перспективою подальших досліджень є визначення компонентів вектора густини потоку потужностей у відбитих та трансформованих хвилях у пружному ауксетик-середовищі та збудженій хвилі у рідині, що забезпечить повний аналіз процесів збереження і перетворення енергії на межі контактуючих середовищ.

Список використаних джерел:

1. Бреховских Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховских, О. А. Гордин. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
2. Мікуліч О. А. Взаємодія слабких ударних хвиль з тунельними порожнинами у ауксетик-середовищах / О. А. Мікуліч, В. І. Шваб'юк // Наукові нотатки. – 2018. – Вип. 61 – С. 148–153.
3. Mashchenko V. A. Information-measuring system for determination of elastic parameters of composite polymeric and heterogeneous materials / V. A. Mashchenko, V. P. Kvasnikov // The Eighth World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY" [Електронний ресурс]. – National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2018. – Режим доступу: <http://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2018/paper/viewFile/5180/4067>.
4. Физическая акустика / Под. ред. У. Мезон. Т. I. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
5. Arenberg D. L. Ultrasonic solid lines / D. L. Arenberg // J. Acoust. Amer. – 1948. – V. 20. – N. 1. – P. 1–26.
6. Плоскі хвилі на вільній поверхні полімерного пружного тіла з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Машченко, О. М. Волошин, Б. Б. Колупаєв, С. М. Іваніщук // Фізика конденсованих високомолекулярних систем. Наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. – Вип. 9. – Рівне: РДГУ, 2002. – С. 36–38.
7. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1985. – 245 с.
8. Ergin K. Energy ratio the seismic waves reflected and refracted at a rock-water boundary / K. Ergin // Bull. Seismol. Soc. Amer. – 1952. – V. 42. – N. 10. – P. 349–372.
9. Машченко В. А. Відбивання та заломлення акустичних хвиль на межі пружних середовищ з від'ємним коефіцієнтом Пуассона / В. А. Машченко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Частина 2. Технічні науки. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 3 (71). – С. 382–387.
10. Таблицы физических величин. Справочник / Под. ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2018

УДК: 621.67:621.22

О.М. Молошній, М.І. Сотник

Сумський державний університет

ВПЛИВ НЕГЛАДКИХ СТІНОК ОБЕРТОВОГО ОСЬОВОГО ПІДВІДНОГО ПРИСТРОЮ НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Конструкція підвідного пристрою насоса впливає на величину гідравлічних втрат в ньому, розподілення швидкостей і напрям течії рідини на вході в робоче колесо, а отже й на енергоефективність робочого процесу насоса. Робота присвячена визначенню впливу негладких стінок (поздовжні ребра або канавки) осьового підвідного пристрою з обертовими стінками на характеристики насоса, структуру течії в осьовому підвідному пристрої та розподіл швидкостей на вході в робоче колесо. Базовий варіант має гладкі стінки та сформований конусом на вході, циліндричною ділянкою та дифузором перед входом в робоче колесо. Виконано числове моделювання робочого процесу насоса в програмному середовищі ANSYS CFX. Зміна величини напору, ККД та потужності насоса в робочому діапазоні при застосуванні негладких стінок осьовому підвідному пристрої коливаються в межах 2%, 3% та 2% відповідно. За допомогою негладких стінок вдалося впливати на розподіл складових абсолютної швидкості на вході в РК. Закручені ребра на дифузорі підвищують рівномірність розподілення осьової складової абсолютної швидкості, проте це спричиняє зниження напору та ККД. Закручені ребра на прямолінійній ділянці та канавки на дифузорі підвищують напір та ККД насоса.

Ключові слова: підвід, конфузур, вхідний патрубок, робоче колесо, CFD, ребро, канавка.

О.Н. Молошній, Н.И. Сотник**ВЛИЯНИЕ НЕГЛАДКИХ СТЕНОК ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОСЕВОГО ПОДВОДНОГО УСТРОЙСТВА НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА**

Конструкция подводного устройства насоса влияет на величину гидравлических потерь в нем, распределение скоростей и направление течения жидкости на входе в рабочее колесо, а, следовательно, и на энергоэффективность рабочего процесса насоса. Работа посвящена определению влияния негладких стенок (продольные ребра или канавки) осевого подводного устройства с вращающимися стенками на характеристики насоса, структуру течения в осевом подводном устройстве и распределение скоростей на входе в рабочее колесо. Базовый вариант имеет гладкие стенки и сформирован конусом на входе, цилиндрической участком и диффузором перед входом в рабочее колесо. Выполнено численное моделирование рабочего процесса насоса в программной среде ANSYS CFX. Изменение величины напора, КПД и мощности насоса в рабочем диапазоне при применении негладких стенок в осевом подводном устройстве колеблются в пределах 2%, 3% и 2% соответственно. С помощью негладких стенок удалось влиять на распределение составляющих абсолютной скорости на входе в РК. Закрученные ребра на диффузоре повышают равномерность распределения осевой составляющей абсолютной скорости, однако это приводит к снижению напора и КПД. Закрученные ребра на прямолинейном участке и канавки на диффузоре повышают напор и КПД насоса.

Ключевые слова: подвод, конфузур, входной патрубок, рабочее колесо, CFD, ребро, канавка,

O. Moloshnyi, M. Sotnyk**INFLUENCE OF NON FLAT WALLS OF THE AXIAL INLET DEVICE ON THE OPERATING PROCESS OF THE CENTRIFUGAL PUMP**

The construction of the pump inlet device affects the amount of the hydraulic loss, the distribution of the velocity and the flow direction at the impeller inlet, and, therefore, the energy efficiency of the operating process of the pump. The article is devoted to the determination of the effect of the non flat walls (longitudinal ribs or grooves on the walls) of the axial inlet device with rotating walls on the characteristics of the pump, the structure of flow in the axial inlet device and the distribution of velocity at the impeller inlet. The base version of the axial inlet device has flat walls and is formed by a cone at the inlet, a cylindrical section and a diffuser before the impeller inlet. Numerical modeling of the operating process of the pump in the ANSYS CFX software environment is performed. Changing the head, the efficiency, and the power of the pump in the operating range when using non flat walls in the axial inlet device vary within 2%, 3% and 2% respectively. It is possible to influence the distribution of components of absolute velocity at the impeller inlet via using non flat walls. Twisted ribs on the diffuser increase the uneven distribution of the axial component of the absolute velocity at the impeller inlet, but this leads to lower head and efficiency. Twisted ribs on the cylindrical section and the grooves on the diffuser increase the head and efficiency of the pump. Keywords: inlet chamber, inlet nozzle, intake section, suction casing, CFD, rib, groove.

Постановка проблеми. Високу енергоефективність функціонування будь якого обладнання можливо забезпечити високою енергоефективністю кожного його вузла або елемента. Це твердження є справедливим і для відцентрового насоса, елементами проточні частини якого є: підвідний пристрій (ПП), робоче колесо (РК), відвідний пристрій, пазухи та ущільнення. ПП є найбільш недооціненим елементом і майже жодна його конструкція не відповідає всім заявленим вимогам, а саме: рівномірне розподілення поля швидкостей в його поперечному перерізі у широкому діапазоні подач насоса; мінімальні гідравлічні втрати в потоці, що проходить через

ПП; забезпечення необхідних антикавітаційних властивостей, заданої величини закручування потоку та мінімізація інтенсивності зворотної течії на вході в робоче колесо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В періодичних виданнях представлені різні традиційні та не традиційні конструкційні рішення ПП. Наприклад, Перез Флорес та ін. [1] дослідили використання подвійного ПП, який забезпечує зменшення закручування потоку та стабілізацію напірної характеристики осьового насоса. Одним з дієвих методів запобігання виникненню закручування потоку в прямому ПП на вході в РК є застосування ребра [2, 3]. Ліу та ін. [4] відзначили вплив позитивного закручування рідини за допомогою вхідного направляючого апарату на покращення розподілу потоку та підвищення енергоефективності робочого процесу, однак також наявне зниження напору.

Молошній та ін. [5] в ПП з дифузоровим перед РК та стінками, що обертаються, виявили нерівномірність розподілення поля швидкостей на вході в РК. Мураками та ін. [6] експериментальним шляхом виявили зниження гідравлічних втрат в трубі, стінки якої обертаються. Автори також відмітили залежність профілю швидкості в поперечному перерізі від швидкості обертання та відстані в осьовому напрямку від вхідного перерізу. Байцар та ін. [7] відмітили залежність розподілу складових абсолютної швидкості від кутової швидкості обертання стінок дифузору та середньої витратної швидкості. Куркін та ін. [8] при експериментальному дослідженні встановили, що обертання стінок дифузора приводить до підвищення рівномірності розподілення потоку. Для покращення структури потоку в дифузорові з великими кутами розкриття та нерухомими стінками Мигай [9] рекомендує застосовувати поперечні ребра на його стінках, що знижує інтенсивність відривання потоку.

Курокова [10] представив переваги застосування канавок на стінках проточної частини насоса. В тому числі повздовжніх канавок перед входом в РК, що спричинює зменшення величини закручування потоку. Янг та ін. [11] також звернули увагу на зменшення величини закручування потоку та зміну кута натікання рідини на лопатки РК для осьового насоса. Голтз та ін. [12] представили метод усунення нестабільності кривої напірної характеристики насоса за рахунок осьових канавок. Такі стінки з ребрами або канавками можна охарактеризувати як негладкі.

Результати, отримані представленими авторами, свідчать про позитивний вплив ребер та канавок на структуру потоку рідини. Однак, за результатами літературного пошуку не виявлено джерел, що описують структуру потоку в ПП з негладкими стінками, які обертаються, та вплив цих факторів на робочий процес насоса.

Мета роботи. Провести дослідження структури течії в осьовому підвідному пристрої (ОПП) з негладкими обертаними стінками з метою визначення їх впливу на характеристику насоса та зміну структури потоку на вході в РК.

Матеріали та методи. Об'єктом дослідження є відцентровий консольний моноблочний насосний агрегат номінальною подачею ($Q_{ном}$) $16 \text{ м}^3/\text{год}$, з розрахунковим номінальним напором (H) 10 м , швидкістю обертання ротору (n) 1450 об/хв , коефіцієнтом швидкохідності (n_s) 63 . Діаметр вхідної воронки РК насоса (D_0) 63 мм , зовнішній діаметр РК (D_2) 192 мм , кількість лопатей РК – 7.

ОПП розроблений, як ПП насоса двостороннього входу і являє собою порожнистий вал насосного агрегату, який додатково виконує функцію ПП. Конструкція ОПП має нерухомий конус, який є частиною корпусу, прямолінійну та дифузорову ділянки, що обертаються з частотою обертання валу насоса, також обтічник сферичної форми (рис. 1). Діаметр циліндричної ділянки (d) та вхідного патрубку ($D_{вх}$) відповідно становлять 40 мм та 65 мм . Довжина корпусу ОПП (l) 260 мм , а ділянки, що обертається, ($l_{об}$) 207 мм . Довжина конуса ($l_{кон}$) та дифузорової ділянки підводу ($l_{диф}$) відповідно становлять 33 мм та 51 мм . Внутрішній діаметр виходу ($d_{вих}$) з ОПП 20 мм . Кут розкриття дифузора (ϑ) $12,7^\circ$, що перевищує максимально допустиму величину, яка забезпечує рівномірний вихід потоку з дифузора. Вона розраховується за формулою [13]:

$$\vartheta = 16,5 (d/2l_{диф})^{0,5} = 10,8^\circ$$

Габаритні розміри ОПП обмежені габаритами корпусу насосного агрегату. Описана вище конструкція прийнята за базову і має гладкі стінки. Ребра на прямолінійній ділянці ОПП застосовувалися з метою зменшення опору цієї ділянки та покращення картини розподілення векторів абсолютної швидкості на вході в РК. Ребра та канавки на дифузорові ОПП застосовувалися з метою зменшити зону утворення відривного потоку рідини або уникнути її утворення та покращити розподілення векторів абсолютної швидкості на входів РК. На рис. 1 представлено

схематичне розміщення ребер та канавок на стінках ОПП та їх профіль в поперечному перерізі. Довжина ребер на прямолінійній ділянці ОПП становить 140 мм, а на дифузорі 40 мм. Для отримання кращого уявлення про вплив різних параметрів ребер та канавок на характеристику потоку рідини в насосі було здійснено серії експериментів. При цьому змінювалися наступні параметри: висота (h), ширина (a) ребер та канавок варіювалася відповідно 1,2,3 мм та 2,3,4 мм; кількість ребер (N) була 2,4,8,12,16. Вони були виконані прямолінійними або закрученими по спіралі у повздовжньому напрямку. Величина закручування вибиралася з метою забезпечити швидкість руху рідини в міжреберному просторі максимально наближеною до середньої в перерізі при $1,0 Q_{ном}$. Для прямолінійної ділянки величина закручування становить 0,65 та 0,325 оберти, а для дифузора 0,2 та 0,1 оберти.

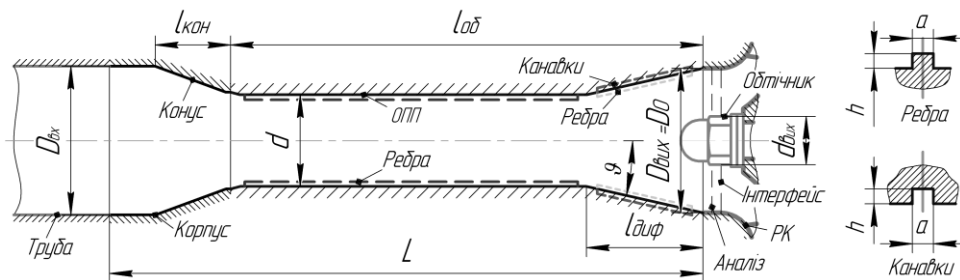


Рис. 1. Схема ОПП насоса з умовним позначенням розташування ребер та канавок

Твердотільна модель розрахункової області рідини відцентрового насоса містить підвідну та відвідну труби, ОПП, РК та спіраль з направляючим апаратом (рис. 2 а). При їх створенні було здійснено спрощення геометрії шляхом припущення щодо відсутності пазух у проточній частині насоса для зменшення складності сітки та підвищення швидкості розрахунку.

Неструктурована розрахункова сітка створена за допомогою програмного продукту ICEM-CFD (рис. 2). Розмір величини комірок вибраний шляхом проведення дослідження на сіткову незалежність. Поблизу ребер, канавок, лопатей сітка додатково згущена. Поблизу твердих стінок в пограничному шарі були створені шари призматичних комірок. Загальна кількість вузлів сітки розрахункової області рідини насоса становить від 3,3 млн до 3,65 млн. ОПП, РК та спіраль з направляючим апаратом містять відповідно від 0,5 млн до 0,85 млн, 1 млн та 1,25 млн елементів.

Числове моделювання течії рідини в проточній частині насоса проведено з використанням програмного комплексу ANSYS CFX за стандартною $k-\epsilon$ моделлю турбулентності [14]. Граничні умови: масова витрата на вході і тиск на виході з розрахункової моделі. Розрахунок проведено для робочого діапазону ($0,7, 1,0$ та $1,3$) $Q_{ном}$. Робоча рідина – вода за температури 25°C . Шорсткість поверхонь ОПП, РК та направляючого апарату прийнята 25 мкм.

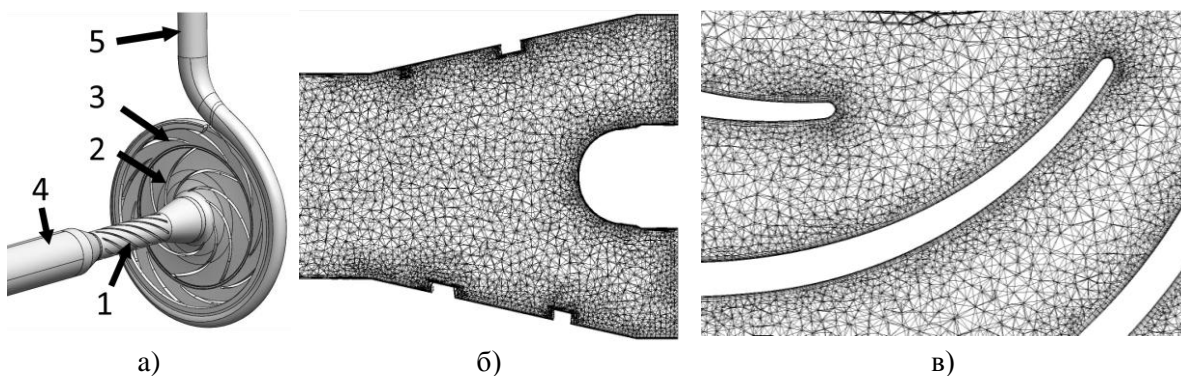


Рис. 2. Досліджувана модель: а) розрахункова область рідини насоса: 1 – ОПП, 2 – РК, 3 – спіраль з направляючим апаратом, 4 - підвідна труба, 5 – відвідна труба; б) сітка дифузornoї ділянки ОПП з ребрами в поздовжньому перерізі; в) сітка міжлопатєвого простору РК в поперечному перерізі

Аналіз результатів. За результатами числового моделювання визначені напірні та енергетичні характеристики насоса для робочого діапазону для різних параметрів ребер та канавок. Найкращі результати для кожного типу елементів та їх місця розміщення представлено на рис. 3, а їх перелік в Табл 1. Слід відмітити, що в представлених результатах зростання

величини напору і ККД лежить в межах 1%, що не дає підстав стверджувати про явний позитивний результат від застосування негладких стінок ОПП. Крім того для багатьох конфігурацій спостерігалось зниження характеристик. Можливі причини цього наступні. Висота ребер була вибрана така, що вони впливають тільки на пристінковий шар рідини, тобто основний потік в ОПП не зазнав суттєвого впливу. Самі ребра або канавки не створюють додаткового напору.

Таблиця 1

Характеристика геометричних параметрів ребер та канавок на стінках ОПП, що детально розглядаються в статті

ОПП	Вид	Кількість	Висота	Ширина	Ділянка ОПП	Форма траєкторії
1	Ребра	8	2	3	пряма	прямі
2	Ребра	4	2	3	пряма	закручені
3	Ребра	8	2	3	дифузор	закручені
4	Ребра	4	2	3	дифузор	прямі
5	Канавки	8	2	2	дифузор	закручені
6	Канавки	8	2	2	дифузор	прямі

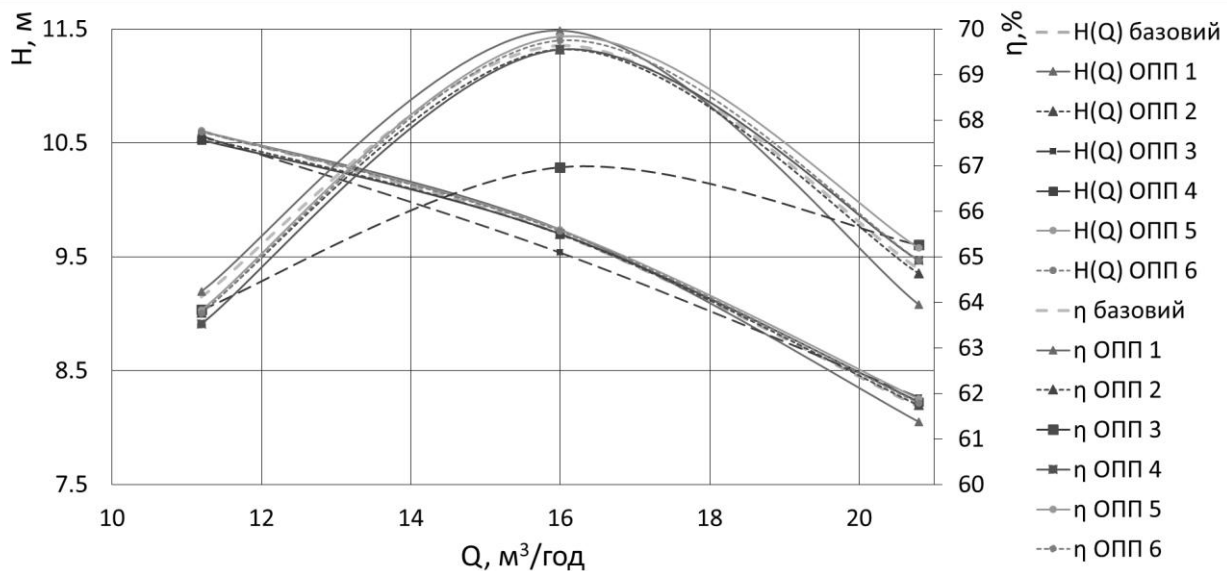


Рис. 3. Характеристики насоса

Характеристики є якісно подібними, хоча незначні відмінності у величині напору між моделями спостерігаються. ОПП 1 має найвищу величину напору за $(0,7-1,0) Q_{nom}$, проте при збільшенні подачі напір суттєво знижується. Для ОПП 3 найнижча величина напору та ККД при номінальній подачі, що спричинено суттєвими змінами структури потоку. При вищих подачах спостерігаються більші відмінності у величинах напору та ККД.

На основі аналізу отриманих результатів можна зробити наступні узагальнення, щодо впливу параметрів ребер та канавок на характеристику насоса: ребра на стінках прямолінійної ділянки та канавки на стінках дифузора призводять до незначного підвищення параметрів насоса за Q_{nom} . Проте ребра на стінках дифузора підвищують параметри тільки за $1,3Q_{nom}$. Однозначно не можна сказати про переваги прямих або закручених ребер. На прямолінійній ділянці ОПП закручені ребра ефективніше покращують структуру течії ніж прямі, а для дифузора навпаки. Оптимальна кількість ребер є 4-8 шт, закручених канавок 8-20 шт, а прямих – 8 шт. Зміна їх кількості від оптимальної призводить до зниження параметрів насоса. Оптимальна висота ребер та канавок 2 мм. Ребра висотою 1 мм призводять до незначних змін параметрів насоса через малу зміну структури потоку, а висотою 3 мм знижують параметри насоса через зміну структури потоку та зменшення площі прохідного перерізу каналу. Для ребер оптимальна ширина є 3 мм, а для канавок 2 мм. Крім того, ребра шириною менше 3 мм технологічно складніше виконати та вони швидше будуть стиратися.

За результатами числового моделювання визначено структуру течії рідини в ОПП насоса. Найнижчий тиск є на периферії на початку та в кінці прямолінійної ділянки, а найвищий тиск

перед обтічником (рис. 4). Такий розподіл спричинений місцевим зниженням або підвищенням швидкості та вихроутворенням. ОПП має нерівномірне розподілення швидкості по всьому повздовжньому перерізі, через зміну площі поперечного перерізу. В дифузорі спостерігаються зони відриву потоку від стінок, що спричинює нерівномірне розподілення векторів абсолютної швидкості на вході в РК.

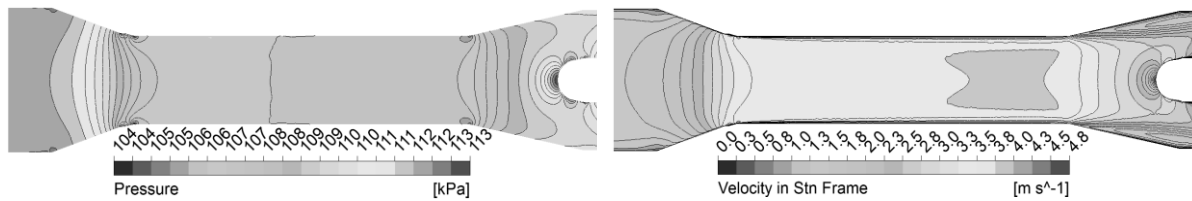


Рис. 4. Розподіл тиску та швидкості в повздовжньому перерізі базового ОПП (з гладкими стінками) за Q_{nom}

Загальне розподілення тиску та швидкості в ОПП з негладкими стінками залишилося подібне. Проте слід вказати відмінності. В ОПП 1 тиск перед дифузором є нижчим, а швидкість в потоці вища (рис. 5). Це спричинено зменшенням площі прохідного каналу. Додаткові зони пониження тиску є біля крамок ребер. В ОПП 3 наявне зростання тиску в дифузорі, особливо на вході в РК. Ребра змінюють структуру пристінкового шару рідини. ОПП 5 не має суттєвих відмінностей в розподілення зон тиску та швидкості. Незначне зменшення застійної зони та пониження в ній швидкості спричинене закручуванням потоку каналами.

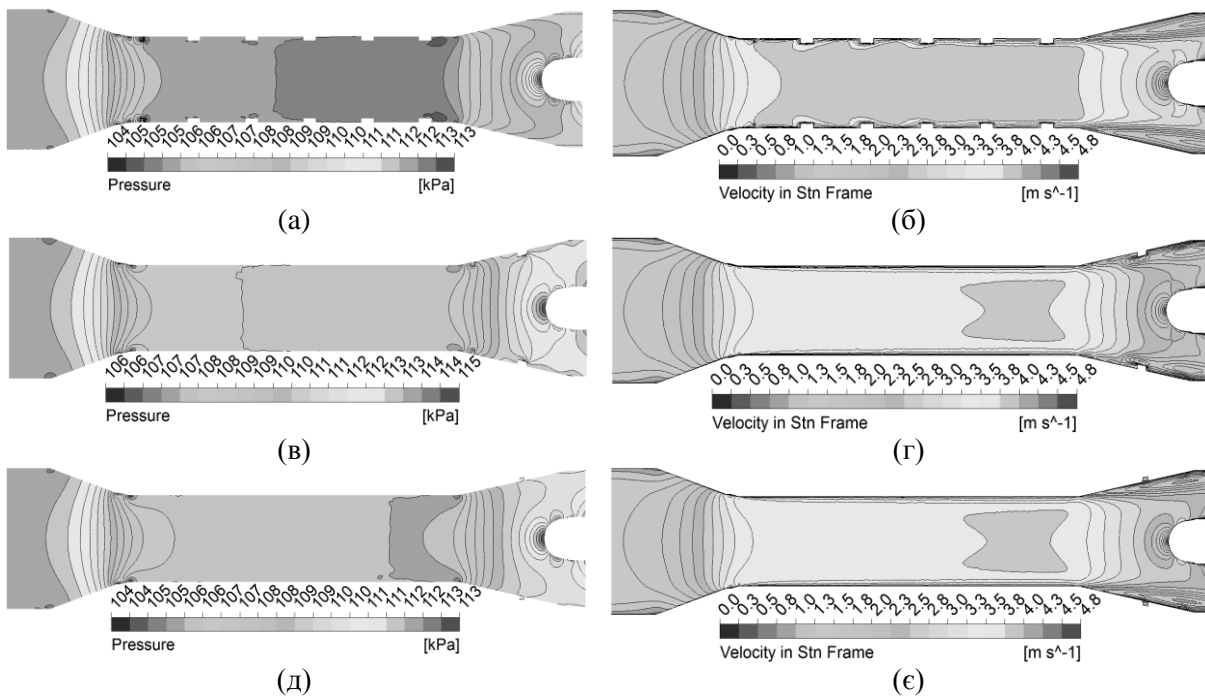


Рис. 5. Розподіл тиску та швидкості в повздовжньому перерізі ОПП з негладкими стінками за Q_{nom} :

(а) Тиск ОПП 1; (б) Швидкість ОПП 1; (в) Тиск ОПП 3; (г) Швидкість ОПП 3;
(д) Тиск ОПП 5; (е) Швидкість ОПП 5

Для базового ОПП притаманне вісесиметричне розподілення поля швидкостей по всій його довжині. Однак, негладкі стінки ОПП вносять дисбаланс в симетрію, тому аналіз поперечного перерізу на вході в РК проведений на відстані 4 мм від дифузору (рис. 1). Поблизу обтічника переважає осьова складова абсолютної швидкості, а на периферії – колова (рис. 6). Крім того, потік має радіальне спрямування поблизу обтічника. Одна з причин такого розподілу це форма підвідного пристрою. По всій довжині дифузornoї ділянки в пристінковій зоні спостерігається закономірне відривання потоку зі зниження абсолютної швидкості. Інша причина – це вхід в зону повороту в РК та обтічник, що розділяє потік по центру та спричинює зростання осьової та радіальної складової абсолютної швидкості. На закручування рідини в периферійній зоні впливає

РК та обертний рух стінок підводу. Основні відмінності спостерігаються в розподілі векторів абсолютної швидкості в зовнішній зоні перерізу.

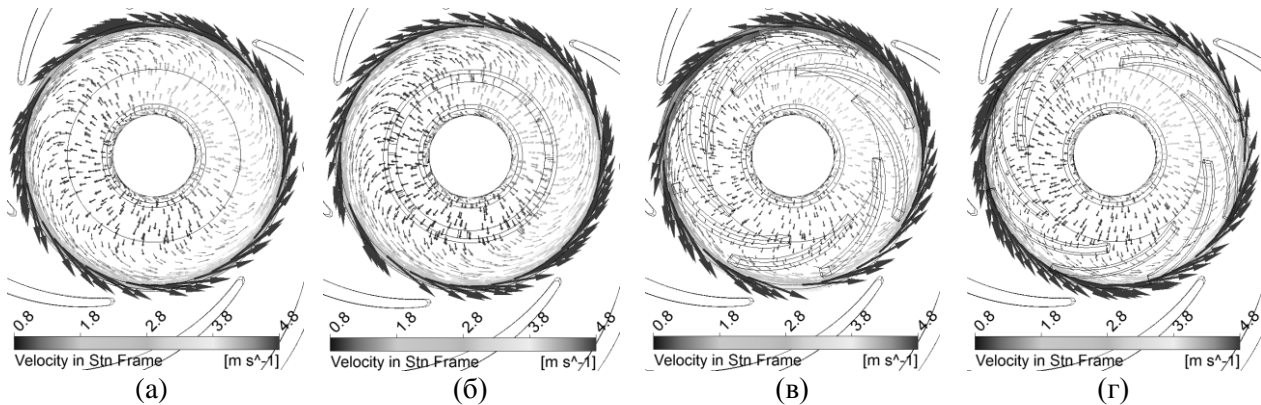


Рис. 6. Розподіл векторів абсолютної швидкості в поперечному перерізі ОПП за Q_{nom} : (а) базовий; (б) ОПП 1; (в) ОПП 3; (г) ОПП 5.

Аналіз зміни величини складових абсолютної швидкості при впровадженні негладких стінок (рис. 7) проводиться вздовж одного вибраного положення радіуса в поперечному перерізі. Для зручності порівняння величини складових швидкостей та радіусів представлені у відносних величинах відповідно до середніх складових абсолютної швидкості ($V_{i(сep)}$) для базового ОПП та до максимального радіуса (R_{max}) в поперечному перерізі.

Загальна картина розподілу колової складової (V_u) швидкості є подібною. В діапазоні $(0,4-0,7) R_{max}$ переважає негативна закрутка, а потім плавно зростає, стає позитивною і досягає приблизно однакового рівня. При цьому, при наявності ребер на прямолінійній ділянці її зростання починається вже при $0,6 R_{max}$.

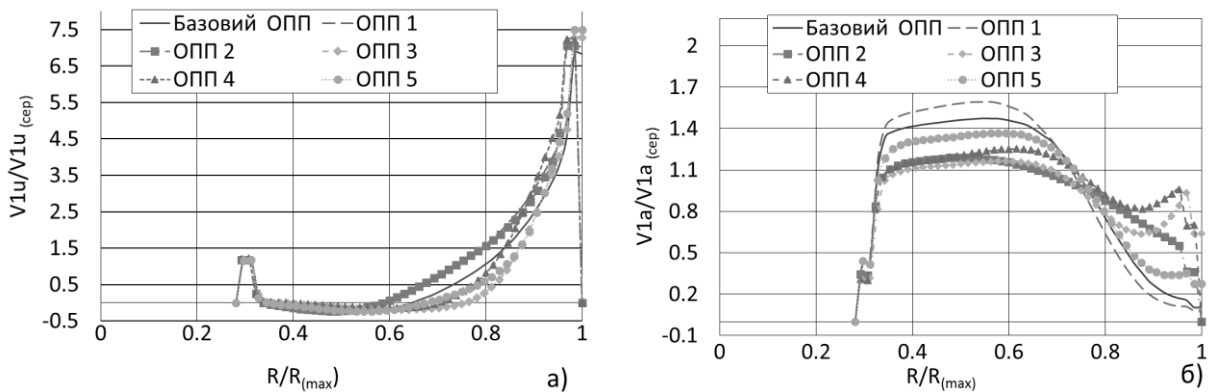


Рис. 7. Порівняння відносних величин складових абсолютної швидкості в поперечному перерізі на вході в РК: (а) Колова складова (V_u), (б) Осьова складова (V_a)

В розподіленні осьової (V_a) складової абсолютної швидкості є значні відмінності. ОПП 3 та ОПП 4 є подібними. Вони та ОПП 2 мають найменші відхилення величин відносної швидкості від середньої, проте це призвело до зниження енергетичних показників насосу. Крім того, ОПП 2 має найплавніший її перехід від максимальних величин при $(0,4-0,6) R_{max}$ до мінімальних на периферії. Інші варіанти мають подібний розподіл до базового і відрізняються за величиною. ОПП 5 та ОПП 6 є аналогічними. В діапазоні $(0,33-0,75) R_{max}$ переважає швидкість вище середньої, а в $(0,7-1,0) R_{max}$ – нижче середньої. Такий розподіл спричинено відриванням потоку від стінки дифузора, а, як наслідок, спостерігається зниження осьової складової абсолютної швидкості в пристінковій зоні. Слід зауважити, що нерівномірному розподіленню осьової складової абсолютної швидкості притаманні вищі величини напору та ККД. Це можна пояснити тим, що в цих випадках обтікання основним потоком відривної зони та входної воронки відбувається плавно. В свою чергу це призводить до більш плавного входу потоку на лопатки.

В діапазоні $(0,25-0,33) R_{max}$ для обох складових швидкості спостерігається значна їх зміна, яка спричинена впливом форми обтічника на пристінковий потік рідини.

Для детального аналізу впливу негладких стінок на потік рідини розглянемо його структуру поблизу ребра або канавки в поперечних перерізах за 4 мм до кінця елемента (рис. 8). Для гладкої стінки притаманний характерний розподіл швидкості. Біля стінки, що рухається, спостерігається максимальна величина колової складової абсолютної швидкості. При віддаленні від стінки її величина зменшується. Для ОПП 1 та ОПП 2 спостерігається збільшення величини осьової та колової складових абсолютної швидкості. В ОПП 2 за ребром утворюється незначний вихор, що спричиняє додаткове зростання колової складової абсолютної швидкості. Зростання осьової складової абсолютної швидкості спричинене зменшенням площі поперечного перерізу.

В дифузорі колова складова абсолютної швидкості для аналізованого перерізу має більші значення (стінка розташована на більшому радіусі). Зниження напору та ККД для ОПП 3 та ОПП 4 спричинені наявними вихорами на ребрах, що є наслідком місцевого зниження тиску на вершині ребра. Канавки на стінках дифузора майже не впливають на осьову складову і знижують колову складову абсолютної швидкості. Під дією відцентрової сили в канавках, особливо в кінці дифузора, створюється зона підвищеного тиску, яка підвищує тиск в усій пристінковій зоні. Також, з'являється напрямлений рух рідини поблизу канавки. Все це провокує зменшення відривної зони дифузора.

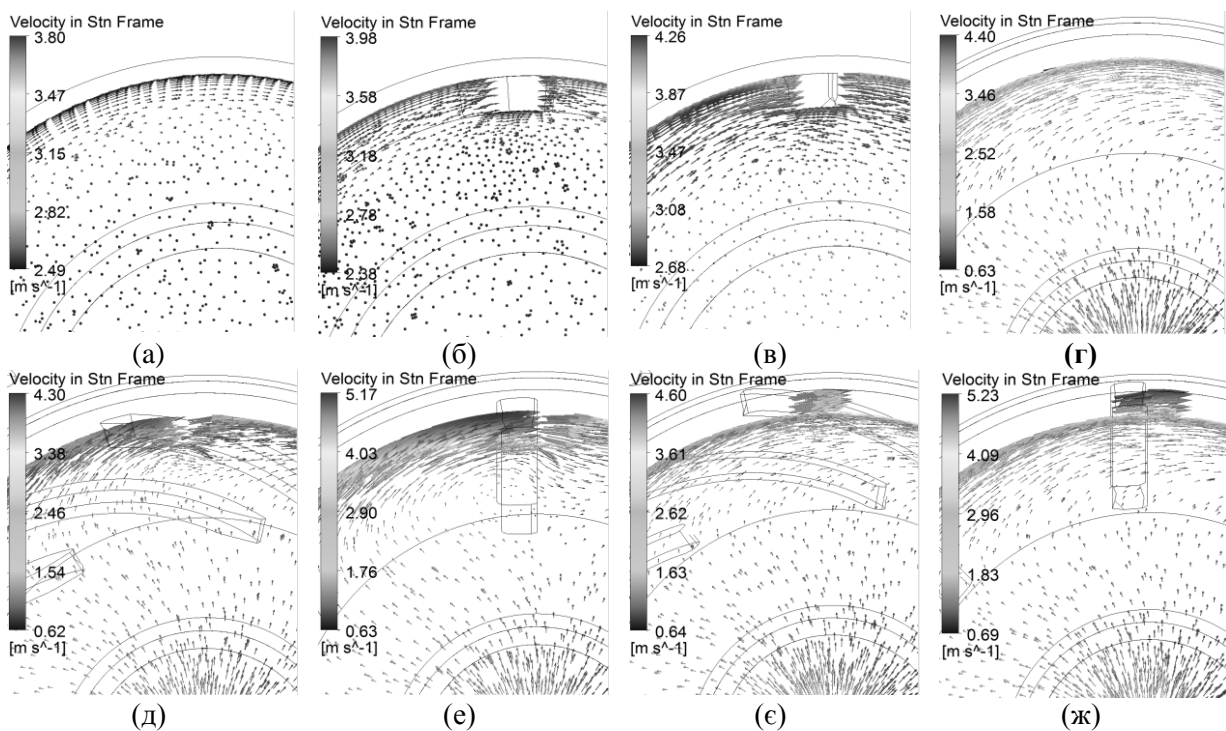


Рис. 8. Структура течії навколо ребер та канавок за Q_{nom} :
 прямолінійна ділянка: (а) базовий (б) ОПП 1; (в) ОПП 2;
 дифузор: (г) базовий; (д) ОПП 3; (е) ОПП 4; (є) ОПП 5; (ж) ОПП 6.

Важливими критеріями для порівняння гідравлічних якостей ПП є коефіцієнт закрутки потоку та коефіцієнт його опору. Коефіцієнт закрутки потоку [15]:

$$\mu_\tau = \frac{\bar{V}_{lu} \bar{r}}{Q} \cdot D_q$$

де, $\bar{V}_{lu} \bar{r}$ – осереднений момент швидкості в поперечному перерізі, m^2/c ; Q – подача, m^3/c ; D_q – еквівалентний діаметр, m :

$$D_q = \sqrt{D_0^2 - d_{eux}^2}$$

Коефіцієнт опору ПП [14]:

$$\xi_0 = \frac{2\bar{h}}{\rho \cdot \bar{V}_0^2}$$

де, \bar{h} – середня величина втрат тиску в підвідному пристрої, Па; \bar{V}_0 – середня величина швидкості на вході в робоче колесо, м/с.

Основні аналітичні характеристики ОПП представлені таблиці 2. В порівнянні з базовим ОПП колова складова абсолютної швидкості знизилася тільки в ОПП 3 та ОПП 5, які мають закручені ребра та канавки. Для всіх ОПП осьова складова абсолютної швидкості є незмінна, так як на її величину впливає площа поперечного перерізу або величина подачі. Радіальна складова абсолютної швидкості майже не змінюється. Зміна абсолютної швидкості в більшій мірі залежить від зміни її колової складової. Коефіцієнт закрутки найвищий в ОПП 4, що можливо спричинено сильними вихорами біля ребер. Крім того, в усіх запропонованих варіантах ОПП з негладкими стінками величина коефіцієнта закрутки є більшою, ніж в базового. В ОПП 2 та ОПП 3 вдалося отримати дуже низький коефіцієнт опору. В ОПП 4, навіть, відбувається додаткове перекачування рідини. Із запропонованих ОПП найкращі гідравлічні характеристики має ОПП 1 та ОПП 3. Проте, зміна коефіцієнтів закрутки та опору не є пропорційна зміні величин напору та ККД.

Таблиця 2

Аналітичні характеристики ОПП

Характеристика \ ОПП	Базовий	ОПП 1	ОПП 2	ОПП 3	ОПП 4	ОПП 5	ОПП 6
Колова складова абсолютної швидкості (V_u), м/с	0,57	0,75	0,70	0,46	0,70	0,52	0,61
Осьова складова абсолютної швидкості (V_a), м/с	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
Радіальна складова абсолютної швидкості (V_r), м/с	0,295	0,30	0,31	0,30	0,32	0,292	0,30
Абсолютна швидкість, м/с	2	2,16	1,97	1,85	2,07	1,953	2,03
Коефіцієнт закрутки (μ_r)	0,061	0,078	0,169	0,132	0,171	0,073	0,081
Коефіцієнт опору (ξ_0)	0,275	0,260	0,067	0,017	-0,095	0,237	0,230

Висновки. Аналіз результатів числового моделювання робочого процесу у відцентровому насосі з негладкими обертковими стінками ОПП проведеного з метою визначення їх впливу на характеристику насоса та зміну структури потоку на вході в РК показує:

1) Зміна величини напору, ККД та механічної потужності насоса в його робочому діапазоні при застосуванні негладких стінок осьового підвідного пристрою коливаються в межах 2%, 3% та 2% відповідно. Зміна параметрів насоса є не значною, тому що вхідні кромки лопатей РК достатньо віддалені від вхідного перерізу РК і потік нормалізується (вирівнюється) при обох варіантах. При моделюванні висота ребер була вибрана така, що вони впливають тільки на пристінковий шар рідини, тобто основний потік в ОПП не зазнав суттєвого впливу.

2) Негладкі стінки впливають на розподіл складових абсолютної швидкості на вході в РК та величину відривної зони в дифузорі. Закручені ребра на дифузорі підвищують рівномірність розподілення осьової складової абсолютної швидкості, проте це спричиняє зниження напору та ККД. Закручені ребра на прямолінійній ділянці та канавки на дифузорі підвищують напір та ККД насоса.

3) Загальне розподілення тиску та швидкості в ОПП з негладкими стінками залишилися незмінними. Проте відмінності спостерігаються в пристінковому шарі, що призводить до незначних змін напору та ККД насоса.

4) Рівномірний розподіл осьової складової абсолютної швидкості спричинив зниження напору та ККД насоса, через порушення плавного обтікання основним потоком відривної зони та вхідної воронки.

5) Найбільшу зміну течії пристінкового шару спричинили прямі ребра на дифузорі. Біля них утворилася вихрова зона.

6) Величини складових абсолютної швидкості, як і вона сама, майже не змінюються. Це пояснюється відсутністю суттєвих змін геометрії проточної частини насоса.

7) Результати досліджень показують, що зміна коефіцієнтів закрутки та опору і відповідна зміна напору та ККД не мають прямо пропорційної залежності.

Для більш детального вивчення робочого процесу ОПП з негладкими обертковими стінками та встановлення більш точних залежностей впливу на нього інших факторів, які не розглянуто у

статті, в тому числі для відносних величин, доцільно провести додаткові дослідження, що будуть спрямовані на аналіз факторів, що не були враховані: швидкість обертання ротора, діаметр ОПП, кут розкриття дифузору, довжина ОПП, величина коефіцієнту швидкохідності.

Список літератури

1. Perez Flores P. Suppression of Performance Curve Instability of an Axial-Flow Pump by Using a Double-Inlet-Nozzle / P. Perez Flores, G. Kosyna, and D. Wulff // Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Rotating Machinery. – 2008. – Vol. 2008.
2. Cheah K. W. Numerical Study of Inlet and Impeller Flow Structures in Centrifugal Pump at Design and Off-design Points / K. W. Cheah, T. S. Lee and S.H. Winoto // International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2011. – Vol. 4(1), pp 25-32.
3. Varchola M. Interakcia obeneho kola a statora odstrediveho cerpadla / M. Varchola. – Bratislava: Slovenska technicka univerzita v Bratislave, 2017. – 190 p.
4. Liu Y. Influence of Prewhirl Angle and Axial Distance on Energy Performance and Pressure Fluctuation for a Centrifugal Pump with Inlet Guide Vanes / Yabin Liu, Lei Tan, Ming Liu, Yue Hao and Yun Xu // Energies. – 2017. – Vol. 10 (695).
5. Moloshnyi O. Influence of Rotational Wall of Axial Inlet Device on Velocity Distribution at Impeller Inlet / O. Moloshnyi, M. Sotnyk and S. Lugova // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 62(3). – P. 179-186
6. Murakami M. Turbulent Flow in Axially Rotating Pipes / M. Murakami, K. Kikuyama // Journal of Fluids Engineering/ – 1980. – Vol 102. – P. 97-103.
7. Bajcar T. Flow kinematics in a rotating axial diffuser / T. Bajcar, B. Sirok, F. Trenc // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2003. – Vol. 27. – P. 769–780.
8. Куркин Е. И. Экспериментальное исследование течения на выходе из осесимметричного диффузора с вращающейся стенкой / Е. И. Куркин, А. В. Ивченко // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 5(36). – С32-37.
9. Мигай В.К. Диффузор с поперечными ребрами / Мигай В.К. // Энергомашиностроению. – 1960. – №4. – С4.
10. Kurokawa J. J-Groove Technique for Suppressing Various Anomalous Flow Phenomena in Turbomachines / J. Kurokawa // International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2010. – Vol. 4(1).
11. Yang K. F. Study on improvement of hump characteristic of an axial flow pump by grooving inlet wall / K. F. Yang, J. J. Feng, G. J. Zhu, J. L. Lu and X. Q. Luo // Asian Working Group- IAHR's Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 163.
12. Goltz I. Eliminating the head instability of an axial-flow pump using axial grooves / I. Goltz, G. Kosyna and A. Delgado // Proc IMechE Part A: J Power and Energy. – 2012. – Vol. 227(2). – P. 206–215.
13. Gülich J. F. Centrifugal Pumps, 3rd Edition / Gülich J. F. – Springer: Berlin, Heidelberg, New York, 2014. – 1146 c.
14. ANSYS CFX Reference Guide, Release 15.0. 2013. <http://www.ansys.com>
15. Karapuzova M. Flow Structure Investigation in the Lateral Inlet Branches of Hydraulic Machines and Some Recommendations on Their Designing / M. Karapuzova, S. Lugova and I. Tverdokhlebl // XIIIth International Scientific and Engineering Conference "HERVICON-2011" Procedia Engineering. – Sumy, September 6–9, 2011. – Vol. 39. – P. 140–147.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2018

УДК 621.391

Мухи Алдин Хассан Мохамед*Одесский национальный политехнический университет***МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ
КЛАССИФИКАЦИЯ СЕТЕВОГО ТРАФИКА**

В рамках данной работы были выявлены недостатки методов классификации сетевого трафика и предложена собственная схема классификации на основе корреляционного анализа. В основу математического аппарата корреляционного анализа сетевого трафика были положены понятия набора пакетов, классов элементов и величины расхождения. Разработан алгоритм построения NN-классификатора, который включал в себя три группы классификации, которые показали высокую точность при обучении на минимальном наборе образцов.

Ключевые слова: сетевой трафик, корреляционный анализ, методы классификации, величина расхождения, «VG-NN, MIN-NN, MVT-NN».

Мухі Алдін Хассан Мохамед*Одеський національний політехнічний університет***МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ КОРЕЛЯЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ КЛАСИФІКАЦІЯ
МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ**

В рамках даної роботи були виявлені недоліки методів класифікації мережевого трафіку і запропонована власна схема класифікації на основі кореляційного аналізу. В основу математичного апарату кореляційного аналізу мережевого трафіку були покладені поняття набору пакетів, класів елементів і величини розбіжності. Розроблено алгоритм побудови NN-класифікатора, який включав в себе три групи класифікації, які показали високу точність при навчанні на мінімальному наборі зразків.

Ключові слова: мережевий трафік, кореляційний аналіз, методи класифікації, величина розбіжності, «VG-NN, MINNN, MVT-NN».

Hassan Mohamed Muhi-Aldeen*Odessa National Polytechnic University***METHODOLOGY OF BUILDING CORRELATION ALGORITHMS OF THE NETWORK
TRAFFIC CLASSIFICATION**

The problems of modern classification methods are identified and the methodology for constructing of algorithms for classifying network traffic based on a correlation analysis of network traffic flows is proposed. The proposed scheme for classifying network traffic based on correlation analysis includes IP packet preprocessing unit, data flow characteristics extraction unit, and data flow correlation analysis unit. The mathematical apparatus of the correlation analysis of network traffic was based on the concepts of bag of packets, query, classes of elements, prior probability, class-conditional probability density and the distance divergence. An algorithm for constructing the NN classifier was developed. It included such classification groups as "AVG-NN", "MIN-NN" and "MVT-NN". These groups showed high accuracy of classification in terms of training on a minimum set of training samples.

Keywords: network traffic, correlation analysis, classification methods, magnitude of discrepancy, "VG-NN, MIN NN, MVT-NN".

Введение

Анализ научных публикаций последних лет показывает, что методология классификации сетевого трафика [1-7] играет важную роль в управления компьютерными сетями, в частности позволяет прогнозировать уровень контроля качества обслуживания (QoS: Quality of Service), а также дает возможность построить эффективную стратегию защиты сетевых сервисов от внешних угроз и обеспечить сохранность конфиденциальных данных (DLP: Data Leak Prevention). Исследования показывают, что стандартные методы классификации сетевого трафика [1-3, 7], такие как методы прогнозирования на основе использования портов (port-based prediction) и методы глубокой проверки на основе полезной нагрузки (payload-based deep inspection) утратили свою эффективность в условиях применения активных портов и шифрования программного кода приложений. На сегодняшний день предпочтение отдается методам машинного обучения для классификации трафика на основе статистических характеристик потока данных [2-4, 8], что базируется на автоматическом поиске характерных паттернов, однако не обладает достаточной точностью классификации.

Таким образом, в рамках данной работы были **рассмотрены современные научные публикации** посвященные классификация сетевого трафика на основе статистических характеристик потока [2-4, 6-8] с использованием алгоритмов классификации с обучением (supervised classification algorithms) и без обучения (unsupervised classification algorithms). Был

проведен анализ работ посвященных классификации сетевого трафика с использованием методов кластеризации, которые не включают предварительно подготовленный набор данных о классах трафика [9, 10]. Среди классификаторов, которые работают с предварительно подготовленным набором данных, что используется для обучения, были выделены две категории: параметрические классификаторы [3, 11, 12] и непараметрические классификаторы [13]. Из параметрических классификаторов были выделены:

- алгоритм C4.5 для построения деревьев решений (C4.5 decision tree algorithm);
- метод опорных векторов (SVM: Support Vector Machines);
- байесовская сеть;
- нейронные сети.

В свою очередь, из параметрических классификаторов был выделен метод k-ближайших соседей (k-NN: k-nearest neighbors). Показано, что использование параметрических классификаторов включает в себя этап интенсивного обучения необходимый для определения параметров классификатора, в то время как непараметрические классификаторы (в т.ч. NN-классификатор для $k=1$) принимают классификационное решение на основе доступных паттернов из множества, предоставленного сетевым трафиком [3, 14].

В результате проведенного анализа актуальных исследований в данной области были определены недостатки, которые характеризуют отдельные методы. Так, было отмечено, что эффективность непараметрических классификатора в значительной степени зависит от объема данных, которые используются при его обучении, и в случае недостаточного объема в условиях ограниченного времени подготовки системы и ее ресурсоемкости не представляется возможным определить на основе данного классификатора все классы сетевого трафика. В то же время методы классификации с предварительным обучением в значительной степени зависят от уровня учебного набора данных, что приводит к необходимости подготовки высококвалифицированного персонала, который мог бы вручную выделить пригодные паттерны и маркировать их. Таким образом, *остаётся нерешенной задачей* построения алгоритмов классификация сетевого трафика, которые способны эффективно обучаться на небольшом очень наборе тренировочных паттернов, подготовленных вручную.

Целью данной работы является разработка методологии классификации сетевого трафика с использованием корреляционных методов, которая обеспечивает эффективное обучение классификатора на минимальном наборе учебных образцов. *Для решения поставленной задачи* было предложено использовать непараметрический подход, который включает корреляцию потоков сетевого трафика, а также провести анализ предложенного подхода на основе математической модели и рассчитать параметры, характеризующие его эффективность.

Классификация сетевого трафика на основе корреляционного анализа

Схема классификации сетевого трафика на основе корреляционного анализа включает в себя такие функциональные элементы как (рис. 1):

- первичная обработка IP-пакета;
- выделение и сопоставление характеристик потока данных;
- корреляционный анализ потока данных;
- набор для обучения.

На этапе первичной обработки система перехватывает IP-пакеты в среде сетевого ресурса информационной системы (СРИС) и строит на основе их заголовков потоки данных (рис. 1).

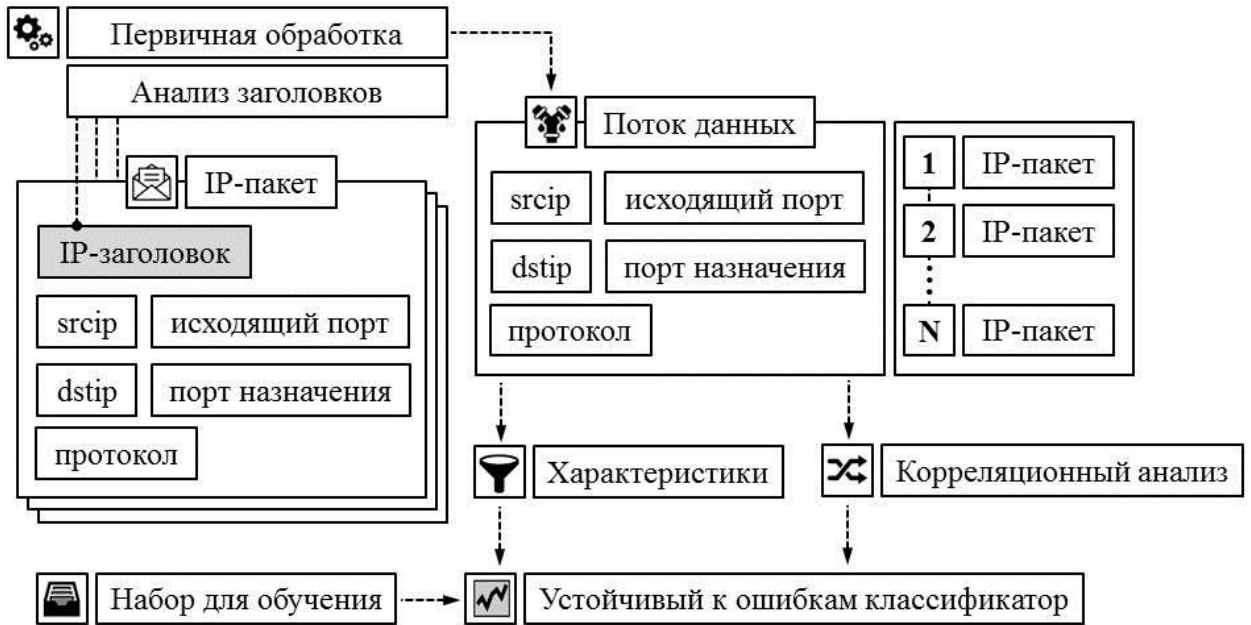


Рис. 1. Схема классификация сетевого трафика на основе корреляционного анализа

Потоки данных при этом состоят из последовательностей IP-пакетов, включающих такие пять элементов как:

- srcip;
- srcport (исходящий порт);
- dstip;
- dstport (порт назначения);
- протокол.

Для представления каждого отдельного потока данных извлекаются соответствующие наборы статистических характеристик. Данный этап необходим для формирования подмножества характеристик IP-пакетов, которые могут быть использованы для построения надежных моделей классификации. В свою очередь корреляционный анализ потока данных основывается на применении в отношении информационных элементов IP-пакетов корреляционной функции. Предлагается анализ корреляции потока для корреляции информации в потоках трафика. В качестве последнего этапа данные узла извлечения наборов статистических характеристик и данные корреляционного анализа потоков данных объединяются, и на их основе строится устойчивый к ошибкам классификатор, который способен эффективно обучаться при помощи минимальных наборов для обучения.

Новизна данного методологического подхода, таким образом, заключается в выделении данных о корреляции элементов потоков данных и их дальнейшем использовании в процессе классификации. В рамках стандартного подхода потоки данных рассматриваются как отдельные и независимые группы элементов, в то время как корреляционная информация может значительно улучшить показатели классификации, особенно когда размер набора для обучения в значительной мере ограничен. В предложенной модели анализ корреляции потока данных можно рассматривать как принципиально новый компонент классификации сетевого трафика, который может быть использован для увеличения эффективности современных и наиболее эффективных алгоритмов в данной области. Тем не менее, следует отдельно отметить, что математический аппарат, который будет использоваться в рамках такого подхода, может быть чрезмерно ресурсоемким для аппаратно-программной платформы классификации и, следовательно, данную проблему необходимо рассмотреть отдельно.

Математическая модель корреляционного анализа сетевого трафика

В основе математического аппарата корреляционного анализа сетевого трафика лежит понятие набора пакетов x_1, x_2, \dots, x_n , состоящего из n элементов, который определяется через

запрос Q, x_1, x_2, \dots, x_n . Каждый набор пакетов включает в себя IP-пакеты сгенерированные одним приложением, коэффициент корреляции которых должен быть отличным от нуля.

Согласно теореме Байеса классификатор построенный в соответствии с принципом вычисления апостериорного максимума (MAP: maximum-a-posteriori) позволяет наиболее эффективно минимизировать среднюю ошибку классификации [14]. Таким образом, для построения оптимального классификатора максимального подобия (ML: Maximum-Likelihood) элемента запроса Q можно использовать следующее выражение:

$$w_{opt} = \arg \max_w (P(w|Q)) \quad (1)$$

что эквивалентно:

$$w_{opt} = \arg \max_w (p(Q|w)) \quad (2)$$

где через w определяются классы элементов набора пакетов, P — априорная вероятность, p — условное распределение случайной величины. Величину $p(Q|w)$, переходя от запроса Q к набору пакетов x_1, x_2, \dots, x_n , с учетом наивного байесовского допущения (Naive-Bayes assumption) можно записать как:

$$p(Q|w) = \prod_{x \in Q} p(x|w), \quad (2)$$

что позволяет упростить выражение (2) до вида:

$$w_{opt} = \arg \max_w \left(\frac{\sum_{x \in Q} p(x|w)}{\|Q\|} \right). \quad (4)$$

На практике большую эффективность показывает классификатор на основе логарифмической вероятности, что определяется подобным выражению (4) образом:

$$w_{opt}^{\log} = \arg \max_w \left(\frac{\sum_{x \in Q} \log(p(x|w))}{\|Q\|} \right). \quad (5)$$

В итоге, NN-классификатор $p_{NN}(x|w)$ может быть построен через определения подобия на основе функции ядерной оценки плотности распределения, в качестве которой можно использовать функцию Гаусса:

$$\begin{cases} p_{NN}(x|w) = \frac{\sum_{x_i \in w} K(\Delta x)}{\|w\|} \\ K(\Delta x) = \exp\left(-\frac{\|\Delta x\|}{2\sigma^2}\right) \\ \Delta x = x - x_i \end{cases} \quad (6)$$

где x_i — тренировочный образец из набора «обучения с учителем». Аналогично (5) логарифмическая вероятность для выражения (6) может быть определена как:

$$\log(p_{NN}(x|w)) = \frac{\min_{x_i \in w} \|\Delta x\|}{2\sigma^2 \|w\|}. \quad (7)$$

Поскольку $2\sigma^2 \|w\|$ является константой для любых x_i набора пакетов, эта величина никак не влияет на процесс квалификации и классификатор может быть определен как:

$$w_{opt}^{log} = \arg \min_w \left(\frac{\sum_{x_t \in w} \min_{x_t \in w} \|\Delta x\|}{\|Q\|} \right). \tag{8}$$

Наиболее просто показать применение данного подхода на примере бинарной классификации, т.е. различения двух классов w_1 и w_2 (рис. 2).

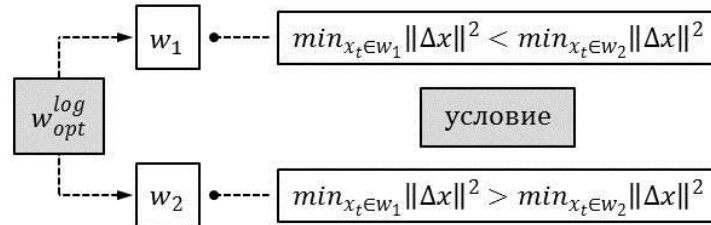


Рис. 2. Базовая схема различения классов при классификации сетевого трафика

Таким образом, через расстояния $\min_{x_t \in w_i} \|\Delta x\|^2$ можно определить величину расхождения (distance divergence) между классами w_1 и w_2 :

$$\delta_x = \min_{x_t \in w_1} \|\Delta x\|^2 - \min_{x_t \in w_2} \|\Delta x\|^2 \tag{9}$$

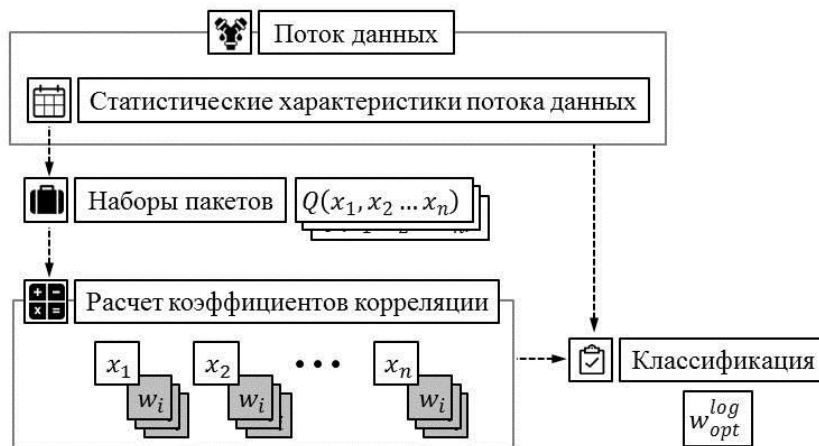


Рис. 3. Базовый алгоритм построения NN-классификатора на основе корреляционного анализа

Данный математический аппарат позволяет определить базовый алгоритм построения NN-классификатора на основе корреляционного анализа (рис. 3), а также выделить основные группы классификации, которые можно разработать на основе данного алгоритма и определить их эффективность. Основные группы NN-классификатора при этом включают в себя [15]:

- группа «AVG-NN», которая для принятия решения по набору пакетов комбинирует все значения расстояний потока данных;
- группа «MIN-NN», которая для принятия решения по набору пакетов выбирает минимальное расстояние потока данных;
- группа «MVT-NN», которая для принятия решения по набору пакетов комбинирует все решения о потоках.

На основе полученных математических выражений можно точно описать каждую из групп и определить зависимость ее эффективности от размера набора для обучения.

Результаты применения корреляционного анализа сетевого трафика

Как было показано в предыдущем разделе в рамках рассмотренного подхода NN-классификатор агрегирует предсказанные значения потоков данных. При этом значение элемента x пакета, определяется через использование его минимального расстояния до обучающих выборок класса w :

$$d_x = \min_{x \in w} \|\Delta x\|^2 \tag{10}$$

На основе этого можно построить выражения для расстояний для трех групп принятия решения по классификации набора пакетов, рассмотренных в предыдущем разделе. Так для группы «AVG-NN» рассматривается минимальное значение по Q :

$$d_Q^{AVG} = \frac{\sum_{x \in Q} \min_{x \in w} \|\Delta x\|^2}{\|Q\|} \tag{11}$$

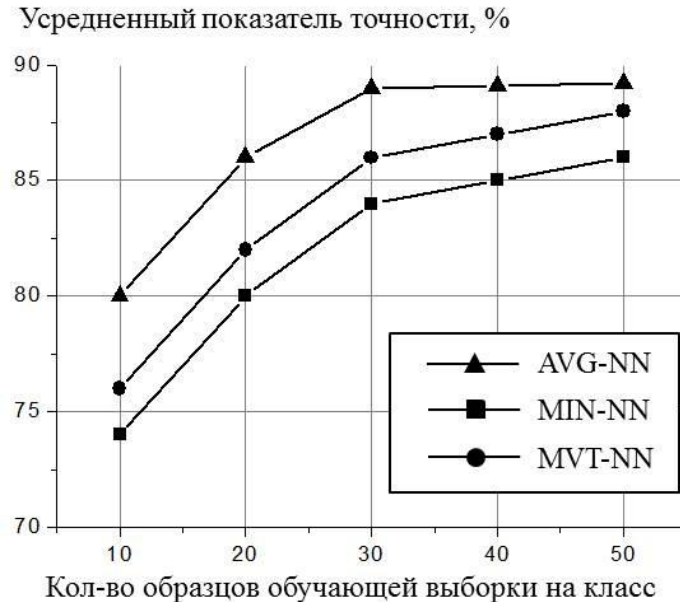


Рис. 4. Зависимость точности корреляционного анализа от размера набора для обучения

В свою очередь группа «MIN-NN» описывается через математическое выражение:

$$d_Q^{MIN} = \min_{x \in Q} (\min_{x \in w} \|\Delta x\|^2) \tag{12}$$

т.е. через минимально расстояние между Q и w . Существенно более сложный подход существует для определения группа «MVT-NN» [15]:

$$\begin{cases} w_{opt} = \arg \max_w (\sum_{x \in Q} v_w(x)) \\ v_w(x) = \begin{cases} 1 \text{ для } w = w_{opt}^x \\ 0 \text{ для } w \neq w_{opt}^x \end{cases} \\ w_{opt}^x = \arg \max_w (\min_{x \in w} \|\Delta x\|^2) \end{cases} \tag{13}$$

Для каждой из групп был проведен анализ точности в зависимости от размера набора для обучения (10, 20...50 образцов). Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

Все три группы показали высокую эффективность работы в условиях обучения на минимальном наборе. Точность разработанных алгоритмов превышает точность безкорреляционного анализа в 1,5-2 раза. Наилучшие показатели точности были получены для группа «AVG-NN».

Выводы

Проведенный в рамках данной работы анализ позволил выявить недостаткисовременных методы классификации и предложить методологию построения алгоритмов классификация

сетевого трафіка на основі кореляційного аналізу потоків мережевого трафіка. В основу математического апарату кореляційного аналізу мережевого трафіка були положені поняття набору пакетів, запроса, класов елементів, вероятности определения классов и величины расхождения между классами. Был разработан алгоритм построения NN классификатора, который включал в себя такие группы классификации как «AVG-NN», «MIN-NN» и «MVT-NN». Данные группы показали высокую точность классификации в условиях обучения на минимальном наборе учебных образцов.

Список использованных источников:

1. Alizadeh, H., & Zúquete, A. (2016). Traffic classification for managing Applications' networking profiles. *Security and Communication Networks*, 9(14), 2557-2575.
2. T.T. Nguyen and G. Armitage, "A Survey Of Techniques for Internet Traffic Classification Using Machine Learning," *IEEE Comm. Surveys Tutorials*, vol. 10, no. 4, pp. 56-76, Oct.-Dec. 2008.
3. H. Kim, K. Claffy, M. Fomenkov, D. Barman, M. Faloutsos, and K. Lee, "Internet Traffic Classification Demystified: Myths, Caveats, and the Best Practices," *Proc. ACM CoNEXTConf.*, pp. 1-12, 2008.
4. Sharifi, H., Akbari, M. K., & Javadi, B. (2014). Performance modelling of adaptive routing communication networks in multi-cluster systems under bit-reversal traffic. *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 12(4), 442.
5. Goldman, A. (n.d.). Scalable Algorithms for Complete Exchange on Multi-Cluster Networks. 2nd IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGRID02).
6. Y. Xiang, W. Zhou, and M. Guo, "Flexible Deterministic Packet Marking: An IP Traceback System to Find the Real Source of Attacks," *IEEE Trans. Parallel Distributed Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 567-580, Apr. 2009.
7. Ghofrani, F., Jamshidi, A., & Keshavarz-Haddad, A. (2015). Internet traffic classification using Hidden Naive Bayes model. 2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering.
8. Tae, P. H., & Lee, B. (2016). Automated Construction Cost Estimation System Using DB Modeling of a TBM Construction Classification System. *International Journal of Database Theory and Application*, 9(7), 107-120.
9. L. Bernaille, R. Teixeira, I. Akodkenou, A. Soule, and K. Salamatian, "Traffic Classification on the Fly," *Proc ACM SIGCOMM*, vol. 36, pp. 23-26, Apr. 2006.
10. J. Erman, A. Mahanti, M. Arlitt, I. Cohen, and C. Williamson, "Offline/Realtime Traffic Classification Using Semi-Supervised Learning," *Performance Evaluation*, vol. 64, nos. 9-12, pp. 1194-1213, Oct. 2007.
11. N. Williams, S. Zander, and G. Armitage, "A Preliminary Performance Comparison of Five Machine Learning Algorithms for Practical IP Traffic Flow Classification," *Proc ACM SIGCOMM*, vol. 36, pp. 5-16, Oct. 2006.
12. T. Auld, A.W. Moore, and S.F. Gull, "Bayesian Neural Networks for Internet Traffic Classification," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 18, no. 1, pp. 223-239, Jan. 2007.
13. Zhao, S., Zhang, Y., & Chang, P. (2017). Network Traffic Classification Using Tri-training Based on Statistical Flow Characteristics. 2017 IEEE Trustcom/BigDataSE/ICSS.
14. Casas, P., & Fiadino, P. (2013). Mini-IPC: A minimalist approach for HTTP traffic classification using IP addresses. 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)..
15. Wang, W., Zhu, M., Zeng, X., Ye, X., & Sheng, Y. (2017). Malware traffic classification using convolutional neural network for representation learning. 2017 International Conference on Information Networking (ICOIN).

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018

УДК 656.073:004.934

І.М. Найдъонов*Київський національний університет імені Тараса Шевченка***ФОРМАЛІЗАЦІЯ ГОЛОСОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КОНТРОЛЮ ЗА РУХОМ АВТОТРАНСПОРТУ**

У роботі запропоновано метод формалізації голосової інформації в системах диспетчерського контролю за рухом автотранспорту. При цьому запропоновано використання системи, що складається з двох основних модулів: автоматичного фонетичного стенографа і ядра рефлекторної системи голосового управління, поточна реалізація яких визначає умови їх використання в моделі голосової взаємодії. Також для формалізації голосової інформації в моделі голосової взаємодії водія при диспетчерському контролі за рухом автотранспорту запропоновано використовувати згорткові нейронні мережі. При використанні такої системи непотрібно створювати ніяких словників, виконувати морфологічний, синтаксичний, семантичний аналіз тексту, а також виділяти слова і команди; виникнення реакції відбувається на звуковий потік, з якого система, як і людина сама «вміє виділяти» інформативну частину за максимальною визначеністю.

Ключові слова: голосова інформація, диспетчерський контроль, дистрибуція, метод, формалізація, згорткові нейронні мережі

И.М. Найдёнов*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко***ФОРМАЛИЗАЦИЯ ГОЛОСОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ АВТОТРАНСПОРТА**

В работе предложен метод формализации голосовой информации в системах диспетчерского контроля за движением автотранспорта. При этом предложено использование системы, состоящей из двух основных модулей: автоматического фонетического стенографа и ядра рефлекторной системы голосового управления, текущая реализация которых определяет условия их использования в модели голосового взаимодействия. Также для формализации голосовой информации в модели голосового взаимодействия водителя при диспетчерском контроле за движением автотранспорта предложено использовать сверточные нейронные сети. При использовании такой системы не нужно создавать никаких словарей, выполнять морфологический, синтаксический, семантический анализ текста, а также выделять слова и команды; возникновение реакции происходит на звуковой поток, из которого система, как и человек сама «умеет выделять» информативную часть по максимальной определенности.

Ключевые слова: голосовая информация, диспетчерский контроль, дистрибуция, метод, формализация, сверточные нейронные сети.

I. Naydonov*Taras Shevchenko National University of Kyiv***FORMALIZATION OF VOICE INFORMATION IN THE SYSTEMS OF DISPATCHING CONTROL OVER THE MOVEMENT OF VEHICLES**

In the work proposes a method of formalizing voice information in the systems of dispatching control over the movement of vehicles. It was proposed to use a system consisting of two main modules: an automatic phonetic stenographer and a core of a voice control reflex system, the current implementation of which determines the conditions for their use in the voice interaction model. It is also proposed to use convolution neural networks to formalize voice information in the driver's voice interaction model during traffic control. When using such a system, there is no need to create any dictionaries, perform morphological, syntactic, semantic analysis of the text, as well as highlight words and commands; the occurrence of the reaction occurs on the audio stream, from which the system, like the person, "can isolate" the informative part by the maximum certainty.

Key words: voice information, dispatch control, distribution, method, formalization, convolution neural networks.

Постановка проблеми. Виробники автомобілів, електроніки та телекомунікаційні компанії налаштовані на створення комп'ютерних інформаційних систем на всіх транспортних засобах. Більшість автомобілів сьогодні оснащені інтерактивними інформаційними системами, включаючи високоякісні аудіо / відео системи, супутникові навігаційні системи, гарнітури телефонії та контроль над кліматом та технічним станом автомобіля [1-3].

Незважаючи на те, що більшість систем в автомобілі є дисплеєм, голосова взаємодія стає все більш широко використовуватися в автомобільних системах. Використання голосової технології в автомобілі допомагає збільшити кількість контрольованих функцій і систем, кнопки яких не можуть бути встановлені на рульовому колесі та приладовій панелі, оскільки обмежено простір. Голосова технологія також дозволяє водіям триматися руками за кермо, а очі не відривати від дороги під час взаємодії з системою [1-3].

У зв'язку з дедалі активнішим використанням природного інтерфейсу і зокрема голосу для спілкування водія з технікою зросло і значення систем голосового управління в самому автомобілі як носія інформації у системах диспетчерського контролю за рухом автотранспорту при здійсненні етапів дистрибуції «склад – дорога – точка доставки» [1].

Саме голосова інформація в системах диспетчерського контролю за рухом автотранспорту при взаємодії із водієм потребує формалізації у випадку проведення автоматизації таких систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для сучасних систем голосового управління існують проблеми, пов'язані з наявністю багатьох різних розмовних мов, притаманних їм діалектів та окремих формулювань, а також з індивідуальними особливостями вимови людини і її швидкістю мови. Для цього в системах голосового управління використовують різні фільтри шумів, які прибирають зайві звуки з підвищенням якості в процесі розпізнавання команд тощо [2-4].

Слід зазначити, що для випадку наявності достатньо потужної системи, голосову взаємодію з водієм можна використовувати для підтримання діалогу під час руху вночі, аби не дати водію заснути [5].

Підхід, який існує для голосового управління, заснований на теорії несилової взаємодії [6] – рефлекторна система голосового управління [7, 8]. Ідея, покладена в основу цього підходу, полягає в тому, щоб замість переведення голосової інформації в текстову репрезентацію, аналізувати безпосередньо інформаційну складову сказаного, визначаючи, яку з відомих реакцій потрібно виконати.

Використання таких часткових функцій голосового управління, які підвищують комфорт водія, також повинно мати певний позитивний ефект. Проте ці функції не забезпечують оптимізації саме процесів дистрибуції.

Для формалізації голосової інформації можна використати систему з двох основних модулів: автоматичного фонетичного стенографа і ядра рефлекторної системи голосового управління (РСГУ), поточна реалізація яких визначає умови їх використання в моделі голосової взаємодії водія при диспетчерському контролі за рухом автотранспорту (рис. 1) [9, 10].

Застосування алгоритму фонетичного стенографа дозволяє будувати послідовність контекстів для мовного сигналу без використання будь-якого словника. Для цієї мети будується деяка генеративна граматики, яка може синтезувати всі можливі модельні сигнали безперервної мови для будь-якої послідовності фонем. В рамках побудованої моделі будується алгоритм пофонемного розпізнавання для невідомого сигналу з використанням контекстів та можливих реакцій на них.

Постановка завдання. У даній статті необхідно запропонувати метод формалізації голосової інформації в системах диспетчерського контролю за рухом автотранспорту.

Виклад основного матеріалу.

У розглядаємі системі формалізації голосової інформації (рис. 1) вхідною інформацією виступає голосова команда, яка може бути представлена звуковою хвиллю; вихідною ж інформацією буде виступати процес керуючого впливу на об'єкт управління, тобто відбуватиметься виконання розпізнаної команди відповідно до попередньо заданих голосом параметрам.

Виконання фонетичного стенографу [9, 10] здійснено у вигляді бінарного додатку, набору бібліотек і конфігураційних файлів для платформи Windows, а саме ядро РСГУ виконує реалізацію інтроформаційного методу вироблення рефлексів, яке розроблено і виконане в середовищі MS Access на всіх операційних системах сімейства Windows.

Сама система формалізації голосової інформації в процесі роботи буде генерувати потрібні візуальні і голосові інформаційні повідомлення водію, це, в свою чергу, надає можливість відслідковувати процес розпізнавання команд, реакції на них і, крім того, дозволяє в реальному масштабі часу змінювати поведінку системи в разі потреби.

Докладніше ядро РСГУ описано в статті [11]. Як альтернативу можна спробувати замінити ядро РСГУ на згорткову нейронну мережу (ЗНМ), зберігаючи загальну структуру системи. Тобто для формалізації голосової інформації в моделі голосової взаємодії водія при диспетчерському контролі за рухом автотранспорту запропоновано використовувати згорткові нейронні мережі. У даному випадку система формалізації голосової інформації аналогічно до попередньо наведеної, складається з двох частин: фонемний стенограф та сама згорткова нейронна мережа (ЗНМ), яка працює з фонемами.

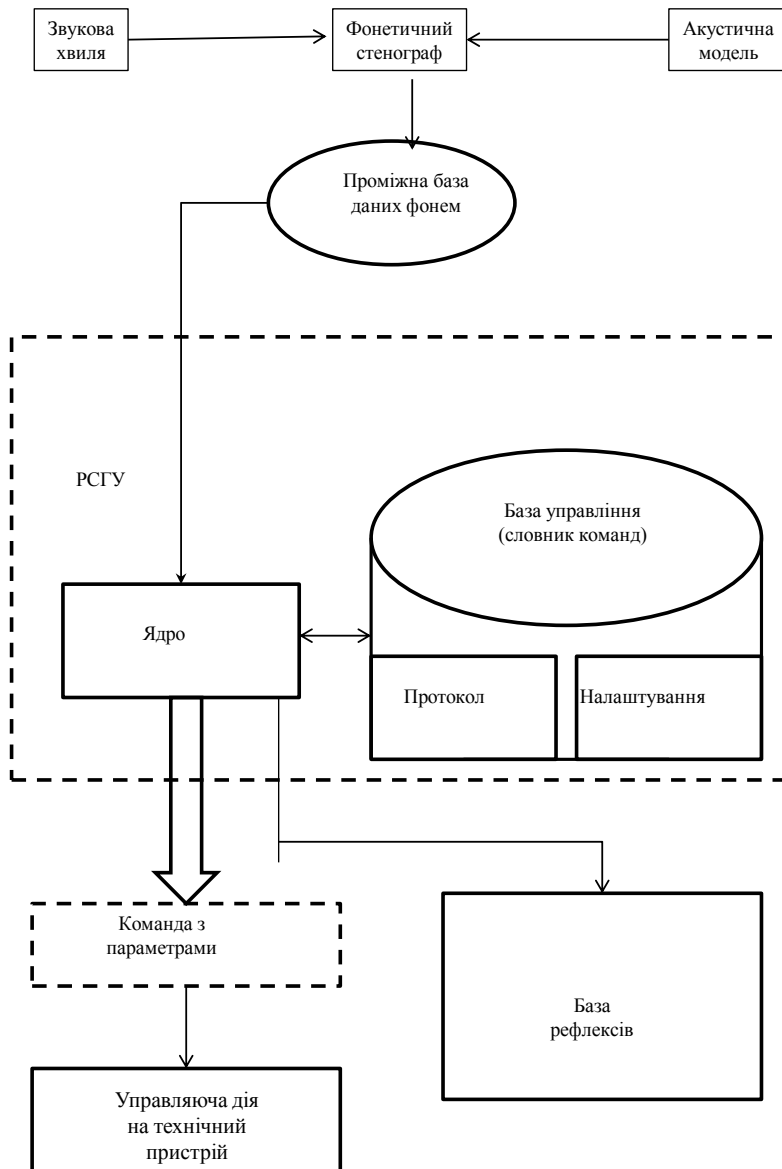


Рис. 1 Структура системи формалізації голосової інформації в моделі голосової взаємодії водія при диспетчерському контролі за рухом автотранспорту

ЗНМ для роботи з фонемами найбільше нагадує ЗНМ в задачі класифікації текстів [12], але оперує з «текстом» не по словах, а по фонемно, що схоже на роботу з текстом посимвольно [13].

ЗНМ дуже схожі на звичайні нейронні мережі: вони також побудовані на основі нейронів, які володіють постійно змінюваною вагою і зсувами. Кожен нейрон отримує деякі вхідні дані, виконує скалярне перетворення інформації і, в окремих ситуаціях, супроводжується нелінійністю. Як і у випадку зі звичайними нейронними мережами, вся ЗНМ висловлює одну диференційовану функцію внеску (ефективний внесок): з одного боку це необроблені фонемні, з іншого – висновок класу або групи ймовірних класів, які характеризують фонему. Також присутня функція втрати на останньому (повністю підключеному) шарі ЗНМ.

Архітектура ЗНМ робить явне припущення виду «вхідні дані є фонемні», що дозволяє закодувати певні властивості під архітектуру. Як відомо, нейронні мережі отримують вхідні дані (один вектор), після чого трансформують інформацію, проводячи її через ряд прихованих шарів [12, 13]. Кожен прихований шар складається з безлічі нейронів, де всякий нейрон має стійкий зв'язок з усіма нейронами в попередньому шарі і де нейрони в функції одного шару повністю

незалежні один від одного і не мають спільних з'єднань. Останній повнозв'язний шар називається вихідним шаром, і в настройках класифікації він демонструє число класів.

ЗНМ користуються тим, що вхідні дані складаються з фонем, і вони обмежують побудову мережі більш розумним шляхом. На відміну від звичайної нейронної мережі, шари ЗНМ складаються з нейронів, розташованих в декількох вимірах.

У роботі, за основу реалізації було взято реалізацію з відкритим вихідним кодом [14] на мові Python з використанням TensorFlow.

Структура нейронної мережі може бути представлена наступним чином.

Фонемі представлені у вигляді one-hot вектору. Фрази нормалізовані за максимальною довжиною, з використанням вектора з всіма нулями в якості заповнювача.

На відміну від роботи по словам, вкладений шар (embedding layer) відсутній, оскільки потужність множини фонем набагато нижчий ніж потужність множини слів, і такий шар не є необхідним. З іншого боку, деякі фонемі схожі на інші, а деякі ні, тому використання вкладень може бути доцільним для передачі цієї схожості, а не тільки для зниження розмірності. Навчання вкладеного шару потребує великого об'єму вхідних даних, тому в даній роботі не буде розглянуто.

Використовується комбінований згортковий шар (convolution layer), який складається з декількох паралельних одновимірних шарів з різними варіантами кроку фільтра.

Для агрегації кожного зі згорткових шарів використовується агрегаційний шар (pooling layer) з вибором одного максимального значення (1-max-pooling).

Виходи агрегаційних підшарів різного розміру кроку згортки комбінуються в один вектор значень.

У якості повнозв'язного шару використовується класичний перцептрон, який може мати активаційну функцію у вигляді неспадаючих диференційованих функцій, що діють на множині дійсних чисел. У нашому випадку для функції активації використаємо ReLU:

$$h(a) = \max(0, a), \quad (1)$$

де $a = WX + b$.

Застосування у якості функції активації ReLU дозволяє забезпечити головні переваги, які надають можливість здійснити пришвидшення навчання нейронної мережі через розрідженість та меншу величину ймовірності розмиття градієнту в порівнянні з іншими активаційними функціями. Виникнення розрідженості відбувається при значеннях $a < 0$. Для більшої кількості нейронів з ReLU-активацією в шарі характерна більша розрідженість отриманого результату.

Для зниження ефекту перенавчання використовується Dropout шар.

Традиційно для задач класифікації в якості функції втрат використовується кросс-ентропія. Інакше кажучи, робимо мінімізацію різниці між виходом нейронної мережі і відповідною фонемою (контекстом). Різницею, якраз і буде величина кросс-ентропії, яка визначається за наступною формулою:

$$D(\hat{y}, y) = -\sum_j y_j \ln \hat{y}_j. \quad (2)$$

Для навчання використовується Adam-алгоритм зворотного розповсюдження помилки із стохастичним градієнтним спуском, який дозволяє регулювати величину швидкості навчання в залежності від параметрів з виконанням більших оновлень для 32-х або 16-ти рідких параметрів і маленьких оновлень для більш частих параметрів. У даному методі використовуються накопичені значення градієнтів, що отримані на попередніх кроках, і накопичені значення квадратів градієнтів. Сам процес накопичення протікає на основі експоненціального розпаду середніх значень (EMAverage). Самі значення, що отримані на останньому кроці мають найбільший внесок для сумарного вихідного значення в порівнянні із значеннями градієнтів, що отримані на перших кроках:

$$\bar{m}_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t; \quad (3)$$

$$\bar{v}_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2, \quad (4)$$

де \bar{m}_t – середня оцінка першого моменту;

\bar{v}_t – середня оцінка другого моменту.

Оскільки у вищеприведених формулах констатація величин \bar{m}_t і \bar{v}_t може бути ініціалізована нулями, то виходить, що вони мають тяжіння до нулів. Таке тяжіння сильно проявляється на початкових кроках і, коли величина коефіцієнтів розпаду приймає мале значення (β_1 і $\beta_2 \sim 1$). Для вирішення цієї проблеми на значення моментів накладається штраф:

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t}; \quad (5)$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t}; \quad (6)$$

Величини отриманих значень використовуються в процесі оновлення нових параметрів на основі формули:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_t} + \varepsilon} + \hat{m}_t. \quad (7)$$

Висновки. У роботі запропоновано метод формалізації голосової інформації в системах диспетчерського контролю за рухом автотранспорту. Для формалізації голосової інформації запропоновано використання системи, що складається з двох основних модулів: автоматичного фонетичного стенографа і ядра рефлекторної системи голосового управління, поточна реалізація яких визначає умови їх використання в моделі голосової взаємодії. При використанні такої системи непотрібно створювати ніяких словників, виконувати морфологічний, синтаксичний, семантичний аналіз тексту, а також виділяти слова і команди; виникнення реакції відбувається на звуковий потік, з якого система формалізації голосової інформації в моделі голосової взаємодії водія при диспетчерському контролі за рухом автотранспорту, як і людина сама «вміє виділяти» інформативну частину за максимальною визначеністю. Також для формалізації голосової інформації запропоновано використовувати згорткові нейронні мережі. У даному випадку система формалізації голосової інформації в моделі голосової взаємодії водія при диспетчерському контролі за рухом автотранспорту містить фонемний стенограф та згорткову нейронну мережу, яка працює з фонемами. Реалізація ЗНМ виконана на мові Python з використанням TensorFlow. Нейронна мережа містить паралельні одновимірні шари з різними варіантами кроку фільтра з активаційною неспадаючою диференційованою функцією ReLU; фонемні представляються у вигляді one-hot вектору, фрази нормалізовані за максимальною довжиною, з використанням вектора з всіма нулями в якості заповнювача. Для навчання використано Adam-алгоритм зворотного розповсюдження помилки із стохастичним градієнтним спуском, який дозволяє регулювати величину швидкості навчання в залежності від параметрів. Для зниження ефекту перенавчання ЗНМ використано Dropout шар. Також побудовано алгоритм зворотного поширення помилки ЗНМ.

Список використаних джерел:

1. Найдъонов І. М. Топологічна евристика в розв'язанні проблеми маршрутизації транспортних засобів (VRP) / І. М. Найдъонов // ScienceRise. – 2015. – Т. 6, № 2(11). – С. 52–58.
2. Кравченко А. П. Автоматизированная компьютерная система голосового управления автомобилем / А. П. Кравченко, Н. М. Крамарь, И. В. Морозов // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 44–47.
3. Heisterkamp P. Linguatronic Product-level Speech System for Mercedes-Benz Cars / P. Heisterkamp // Proceedings of the First International Conference on Human Language Technology Research. – San Diego : Association for Computational Linguistics, 2001. – P. 1–2.
4. Jonsson I.-M. Social and Emotional Characteristics of Speech-based InVehicle Information Systems : Impact on Attitude and Driving Behaviour / I.-M. Jonsson. – Linköping : Linköping University Electronic Press, 2009. – 193 p.
5. Кравченко А. П. Автоматизированная компьютерная система для интерактивного общения с водителем / А. П. Кравченко, Т. М. Терещенко, И. В. Морозов // Автомобильный транспорт. – 2012. – № 30. – С. 54–58.

6. Экспериментальное исследование влияния акустических помех разных видов на результаты автоматического распознавания речевых команд / О. Н. Корсун, А. А. Яцко, И. М. Финаев, В. Я. Чучупал // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – Т. 01. – С. 12.
7. Тесля Ю. М. Введення в інформатику природи / Ю. М. Тесля. – К.: Маклаут, 2010. – 255 с.
8. Егорченков А. В. Прикладное применение рефлекторной системы голосового управления / А. В. Егорченков // Управління розвитком складних систем. – К., 2016. – № 25. – С. 103–107.
9. Пилипенко В. В. Автоматизированный стенограф украинской речи / В. В. Пилипенко, В. В. Робейко // Штучний інтелект. – 2008. – № 4. – С. 768–775.
10. The Non-Force Interaction Theory for Reflex System Creation with Application to TV Voice Control / I. Teslia, N. Popovych, V. Pylypenko, O. Chorny // Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – 2014. – P. 288–296. – DOI: [10.5220/0004754702880296](https://doi.org/10.5220/0004754702880296).
11. Тесля Ю. Н. Рефлекторная система голосового управления техническими устройствами (PCГУ) / Ю. Н. Тесля, А. Ю. Чёрный // Управління розвитком складних систем. – 2013. – № 15. – С. 105-110.
12. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification / Y. Kim // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2014). – 2014. – P. 1746–1751. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/1408.5882>.
13. Zhang X. Character-level Convolutional Networks for Text Classification / X. Zhang, J. J. Zhao, Y. LeCun // CoRR. – 2015. – Vol. abs/1509.01626. – Mode of access: <http://arxiv.org/abs/1509.01626>.
14. Britz D. Understanding Convolutional Neural Networks for NLP [Electronic resource] / D. Britz ; WILDML – Artificial Intelligence, Deep Learning, and NLP. – 2015. – Mode of access: <http://www.wildml.com/2015/11/understanding-convolutional-neural-networks-for-nlp/>

Стаття надійшла до редакції 30.10.2018

УДК 621.869

О.О. Налобіна¹, О.П. Герасимчук², В.С. Пуць², В.Л. Мартинюк², О.В. Шовкомуд²
 Національний університет водного господарства та природокористування¹
 Луцький національний технічний університет²

ДОСЛІДЖЕННЯ КОТКА ДОРОЖНЬОГО ЗІ ЗМІННИМ КОНТАКТНИМ ВПЛИВОМ НА РОБОЧУ ПОВЕРХНЮ

У статті викладено результати експериментального дослідження розробленої та виготовленої конструкції робочого обладнання ручного дорожнього котка. На підставі виконаних експериментальних досліджень обрано раціональну схему його виготовлення.

Ключові слова: коток, тиск, поверхня, робоче обладнання, експеримент

А.О. Налобина, А.П. Герасимчук, В.С. Пуць, В.Л. Мартинюк, А.В. Шовкомуд
 ИССЛЕДОВАНИЕ КАТКА ДОРОЖНОГО С ПЕРЕМЕННЫМ КОНТАКТНЫМ
 ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА РАБОЧУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

В статье изложены результаты экспериментального исследования разработанной и изготовленной конструкции рабочего оборудования ручного дорожнего катка. На основании выполненных экспериментальных исследований избрано рациональную схему его изготовления.

Ключевые слова: каток, давление, поверхность, рабочее оборудование, эксперимент

A. Nalobina, A. Gerasimchuk, V. Puts', V. Martyniuk, A. Shovkomud
 INVESTIGATION OF THE ROAD WITH A CHANGING CONTACT EFFECT ON THE
 WORKING SURFACE

During the analysis of the existing means of sealing of asphalt concrete mixtures it is found that they are ineffective in terms of productivity and cost of rolling, which necessitates the creation of new rollers, the construction of which makes it possible to change contact pressures on the layer of mixtures or other surfaces that are to be touched (for example sand) This will allow the commissioning of several different machines with different power parameters, depending on the temperature range, the type of coating and the stroke stage.

In order to provide a change of force influence on the surface to be treated, working equipment has been developed and manufactured - a roll with a width of equal to 4 ribs welded equally. The swath consists of a shell, a hub, ribs, which are welded to the inner surface of the shell on one end and the other to the hub. The design consists of four ribs arranged at an angle of 90 ° to each other. Thanks to the ribs in the inner cavity of the roller, four cells are formed for placing additional cargoes.

Cargoes were located in different variants in order to identify their most rational location. In the course of experimental studies, the values of pressure that arises on the contact surface of the roll and bearing surface are obtained. On the basis of experimental data, graphs of dependencies of pressure on the contact surface from the angle of rotation of the roller were constructed. In this case, rolls with different location of additional cargoes in its cavity were investigated. Equations are obtained that reveal the dependence of the pressure on the contact surface on the angle of rotation of the roll.

The use of a roller with the proposed design of the working equipment will allow the commissioning of several different machines with different power parameters, depending on the temperature range, the type of coating and the stages of its rolling.

Keywords: roller, pressure, surface, working equipment, experiment

Постановка проблеми. Протяжність автомобільних доріг в Україні постійно зростає, що призводить до збільшення обсягів робіт з укладання та ремонту дорожнього покриття.

Застосовані в даний час дорожні котки не можуть виконувати укочування суміші протягом усього процесу ущільнення внаслідок їхньої не універсальності, вузького діапазону регулювання силових впливів.

Враховуючи вище зазначене, є потреба у використанні котків із різними контактними тисками на ущільнювальний матеріал, який характеризується постійною зміною фізико-механічних властивостей.

Існуючі засоби ущільнення асфальтобетонних сумішей є неефективними з точки зору продуктивності та собівартості укатки, що обумовлює потребу в створенні нових котків, конструктивне виконання яких дозволяє змінювати контактні тиски на шар сумішей. Це дозволить вводити в роботу декількох різних машин із різними силовими параметрами залежно від температурного діапазону, виду покриття та стадії укатки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням проектування, дослідження та оптимізації параметрів дорожніх котків і статичного та вібраційного ущільнення ґрунту, присвячені наукові роботи Захарченка А.В.[1], Іванчури В.І., Прокоп`єва А.П., Клевцової О.Г. [2],

Головнина А.А.[3], Беляєва К. В.[4], Алексікова С.В., Єрмілова А.А.[5], Серебренников В.С.[6], Поднішев А.А.[7], Кондрашов Н.А.[8], Угай С.М.[9], Дубков В.В.[10].

Автор [1] теоретично та експериментально встановив закономірності зміни в процесі ущільнення характеристик застосовуваних матеріалів, розробив класифікацію напрямків модернізації конструкцій ущільнюючих засобів, теоретично обґрунтував і використав нетрадиційні для дорожньо-будівельних матеріалів фізичні ефекти (текучість матеріалу під дією нормальних і дотичних напруг), теоретично обґрунтував конструкцію приладу контролю ущільнення, що дозволяє оцінити напружено-деформуючий стан матеріалу і дослідити його характеристики, запропонував конструкції перспективних котків і методики розрахунку її параметрів, а також удосконалив існуючі, з врахуванням при ущільненні характеристик матеріалу.

Автори [2] сформувавши імітаційну модель ущільненої суміші із застосуванням програми MATLAB / Simulink, системи комп'ютерного моделювання робочого процесу вібраційного котка. Обґрунтували залежності для визначення контактної тиску валка, абсолютної деформації суміші, прискорення зміни деформації суміші від часу контакту валка котка з ущільнюваною сумішшю. Отримали графічні залежності результатів обробки даних імітаційного моделювання на основі регресійного аналізу засобами MS Excel. Результати роботи можуть використовуватися при ідентифікації параметрів асфальтобетонної суміші і параметрів вібрації для цілей автоматизації процесу ущільнення і відповідного вибору датчиків інформації про стан ущільнюваної суміші.

У роботі [3] викладено результати порівняльного аналізу напружено-деформованих станів обичайки гнучкого і жорсткого валків дорожнього катка при обпиранні гнучкого валка на дві опори своїми краями - як найбільш важкий можливий випадок. Встановив, що деформації в обичайці гнучкого валка плавно розподілені по всій поверхні обичайки. Лінії рівних переміщень розташовані переважно вздовж утворюючих обичайки, яка приймає форму еліпса. Для обичайки жорсткого валка характерні малі переміщення на всій її поверхні, за винятком ділянки програми навантаження в точці її опори. Є ділянка з великим градієнтом переміщень, на якому можлива втрата стійкості внаслідок надмірної деформації.

Беляєв К.В. [4] розробив реологічну модель процесу ущільнення асфальтобетонної суміші котками статичного дії. Дослідив вплив температурно-технологічних факторів на інтенсивність процесу ущільнення асфальтобетонних сумішей, вплив величини контактних тисків і режимів ущільнення на утворення залишкових деформацій в ущільнюваному середовищі, вплив режимів роботи котків на продуктивність і енергоємність процесу ущільнення асфальтобетонних сумішей. Підтвердив адекватність реологічної моделі натурними процесами взаємодії валка котка з ущільнюваним середовищем. Розробив методику розрахунку на ЕОМ раціональних параметрів котків і ефективних режимів їх роботи.

Алексіков С.В. і Єрмілов А.А. [5] виконали порівняльний аналіз ущільнюючої здатності котків статичного і динамічного впливу та їх впливу на якість ущільнення гарячих асфальтобетонних сумішей. Дослідив динаміку зміни коефіцієнта ущільнення дорожнього покриття в процесі його укатки статичними і вібраційними котками. Встановив показники ущільнюючої здатності застосовуваних котків та їх вплив на якість ущільнення.

У роботі [6] розроблено математичну модель ущільнення асфальтобетонних сумішей вібраційними котками, що описує зміну напружено-деформованого стану ущільнюваного середовища. Отримав реологічні рівняння, що зв'язують величину контактної тиску з утворенням в суміші залишкових деформацій з урахуванням параметрів вібраційних котків і режимів їх роботи. Розвинув теоретичні положення щодо регулювання в технологічному процесі накопичення залишкових деформацій, з урахуванням мінливих параметрів середовища. Розробив: інженерну методику визначення раціональних параметрів вібраційних котків при ущільненні асфальтобетонних сумішей; методику визначення товщини шару асфальтобетонної суміші, опрацьованою вібраційним котком; методику розрахунку на ЕОМ параметрів вібраційних котків і режимів їх роботи.

Позднішев А.А. [7] математично описав процеси взаємодії вакуумної камери пристрою з конструктивними шарами дорожнього одягу. Вивів: раціональні співвідношення конструктивних параметрів вакуумної камери пристрою; аналітичні та експериментальні залежності фільтраційних характеристик асфальтобетону від його щільності і температури, ступеня розрідження у вакуумній камері і типу суміші; алгоритм визначення щільності асфальтобетону в процесі його ущільнення по фільтраційному витраті; методику розрахунку і проектування пристрою оперативного контролю щільності асфальтобетону для дорожнього котка.

Аналіз чинних досліджень виявив, що не розкритими є проблеми експлуатації привода котків, причиною яких є реверс енергетичних потоків та інші особливі умови експлуатації.

Також встановлено, що не достатньо досліджено питання розробки та експлуатації котків із змінним контактним впливом на робочу поверхню.

Постановка завдань. Метою роботи є розробка та дослідження котка, застосування якого забезпечує створення змінного контактного тиску на робочу поверхню.

Викладення основного матеріалу статті. Ущільнення асфальтобетонної суміші є завершальною технологічною операцією, яка визначає в подальшому надійність і довговічність покриття. Вартість ущільнення становить 2-4% від вартості будівництва, але недоущільнення всього на 1-2% зменшує міцність покриття на 12-16%, а довговічність на 14-20%.

Питання інтенсифікації процесу ущільнення є основними для підвищення продуктивності. Загальним напрямком є збільшення маси, розмірів робочих органів ущільнюючих машин, вдосконалення їх конструктивних особливостей і застосування засобів автоматизації.

До початку 80-х років дослідницькі роботи, спрямовані на підвищення продуктивності, зменшення металоємності і енергоємності процесів ущільнення, велися саме в цьому напрямку.

В даний час потрібен перехід від традиційних рішень до більш ефективних, але, як правило, і більш складних, так як подальша оптимізація традиційних конструктивних і кінематичних параметрів робочих органів майже неможлива. Необхідні принципово нові способи впливу на асфальтобетонну суміш як на ущільнюючий матеріал.

З метою дослідження впливу розташування внутрішніх навантажень у валку міні-котка на величину тиску на контактній поверхні, а також на динамічний показник щільності по ходу руху міні-котка було створено модель валка із можливістю його додатково навантажувати.

У ході проведення досліджень було використане наступне обладнання:

- 1) міні-коток Wacker Neuson W65.
- 2) запропонована конструкція робочого органу - валка.

Даний міні-коток приводиться в рух за допомогою привода, який включає в себе двигун, пасову передачу, черв'ячний редуктор та коробку передач. Керування котком здійснюється за допомогою дишла, на якому розташовані важелі переднього/заднього ходу, гальма, подачі рідини на валки. Допоміжним обладнанням міні-котка є бак для зберігання рідини та акумулятор, який використовують при пуску двигуна за допомогою електричного стартера.

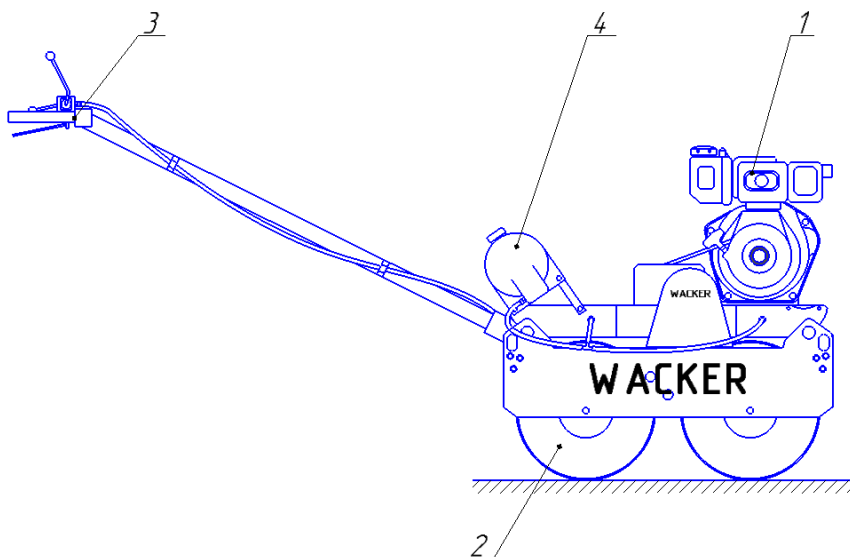


Рис. 1. Коток Wacker Neuson W65: 1 - привод; 2 - робоче обладнання; 3 - механізм керування; 4 – бак для зберігання рідини

З метою створення змінного силового впливу на поверхню, яка підлягає обробці, нами запропоновано конструкцію робочого обладнання - валка по ширині якого на рівній відстані приварено 4 ребра. Валок складається із обичайки, маточини, ребер, які приварені до внутрішньої поверхні обичайки одним торцем, а іншим – до маточини. Конструкція містить чотири ребра, розташованих під кутом 90° одне до одного. Завдяки ребрам у внутрішній порожнині котка

утворюється чотири комірки для розташування додаткових вантажів (рис. 2). Вантажі розташовували за різними варіантами (рис. 3).



Рис.2. Валок у розрізі із додатковим навантаженням: 1 – обичайка; 2 – маточина; 3 – ребро; 4 – додаткове навантаження

З метою дослідження динаміки зміни тисків на поверхні контакту валка з додатковим навантаженням нами виконано ряд експериментів.

Перед початком експерименту була здійснена підготовка обладнання та облаштування місця проведення експерименту, а саме: під'єднання тензодатчика до вагового індикатора ІЕ-03, що відображав величину навантажень, які фіксувались тензодатчиком ManuYear MLC649D, встановлення гнучкої поверхні, по якій здійснювали прокочування валка, закріплення тензодатчика на опорі, висота якої задовольняла щільний контакт тензодатчика із гнучкою поверхнею. Для плавного переміщення тензодатчика, на нижній поверхні опори був встановлений ролик.

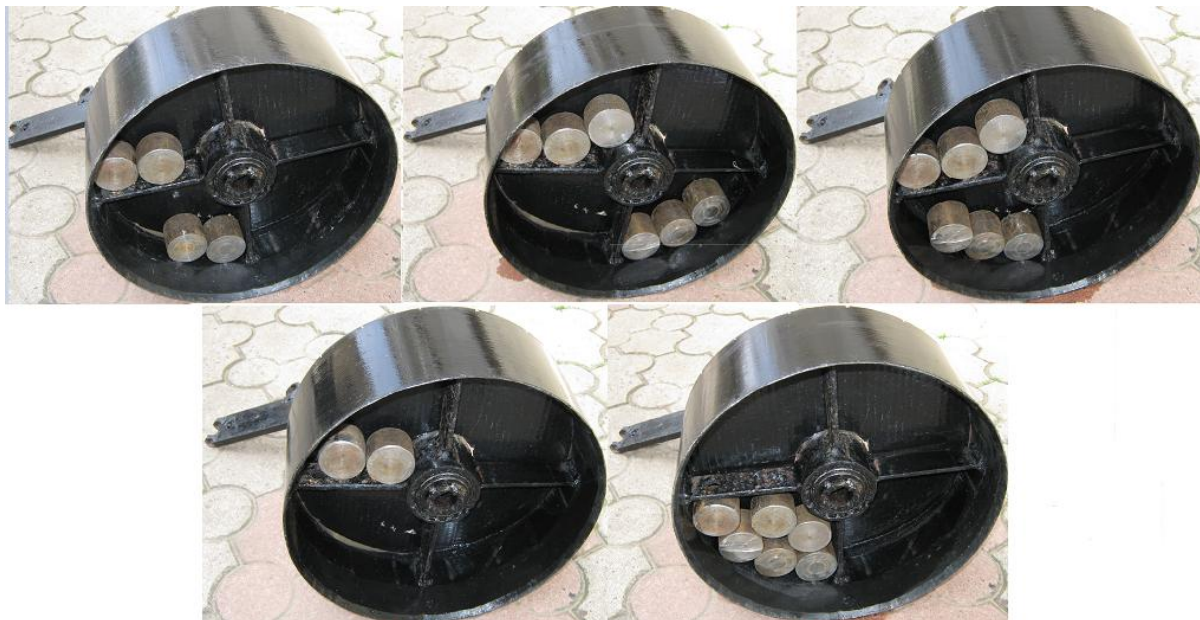


Рис.3. Способи розташування додаткового обладнання

Після заміру, визначали тиск на поверхні контакту за відомою залежністю:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

де F – сила на поверхні контакту, Н; S – площа контактної поверхні, мм².

Схематично варіанти розташування додаткових вантажів у внутрішній порожнині котка представлено на рис. 4.

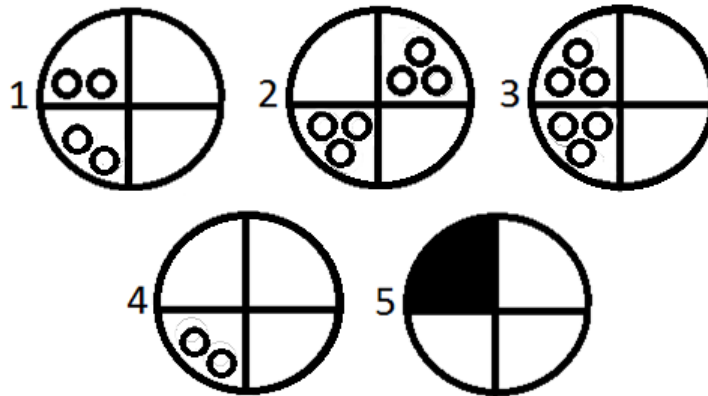


Рис. 4. Способи встановлення вантажу

Результати визначення величини тиску на контактній поверхні подано нижче в табл. 1.

Таблиця 1.

Результати визначення величини тиску на контактній поверхні

Кут повороту валка, град	Тиск на контактній поверхні для відповідного способу навантаження, МПа (рис. 3)				
	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
0°	0,05886	0,06393	0,06295	0,05592	0,0605
20°	0,05878	0,06377	0,06311	0,05518	0,06107
40°	0,05874	0,06385	0,06319	0,0551	0,06131
60°	0,05876	0,0636	0,06327	0,05461	0,06213
80°	0,0587	0,06336	0,06327	0,05461	0,06246
100°	0,05874	0,06344	0,06336	0,05477	0,06254
120°	0,05868	0,06327	0,06327	0,05436	0,06229
140°	0,05866	0,06295	0,06336	0,05453	0,0627
160°	0,05869	0,06311	0,0634	0,05428	0,06254
180°	0,05868	0,06303	0,06344	0,05412	0,06254
200°	0,0587	0,06295	0,06336	0,0542	0,06229
220°	0,05866	0,06315	0,06336	0,05461	0,06197
240°	0,0587	0,06303	0,0634	0,05436	0,06229
260°	0,05873	0,06311	0,06336	0,05469	0,06205
280°	0,05873	0,06327	0,06336	0,05477	0,06148
300°	0,05877	0,06323	0,06327	0,05526	0,06139
320°	0,05878	0,06352	0,06315	0,05559	0,0605
340°	0,05886	0,06368	0,06315	0,05559	0,06033
360°	0,05886	0,06393	0,06295	0,05592	0,0605

За отриманими дослідними середніми значеннями побудовано графіки залежностей величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка.

На рис.5. – 9 зображено графіки залежності величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка.

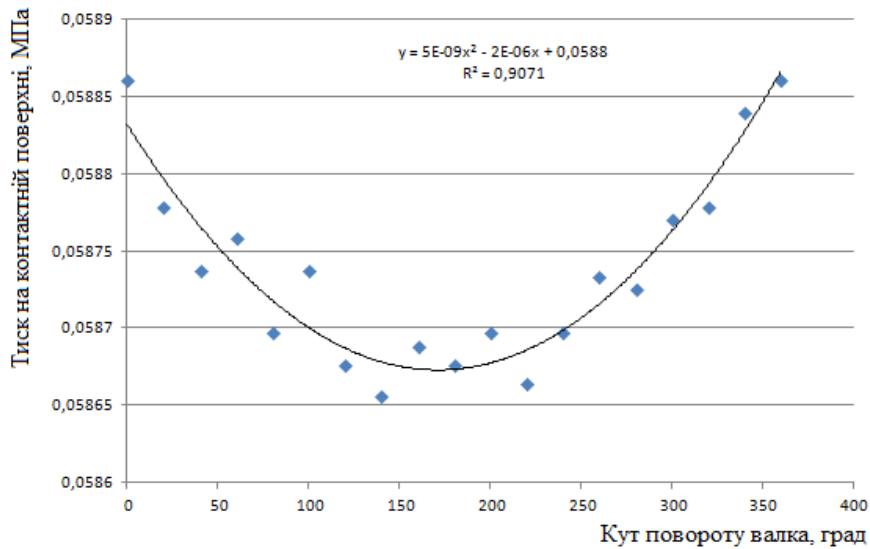


Рис. 5. Графік залежності величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка для першого способу навантаження

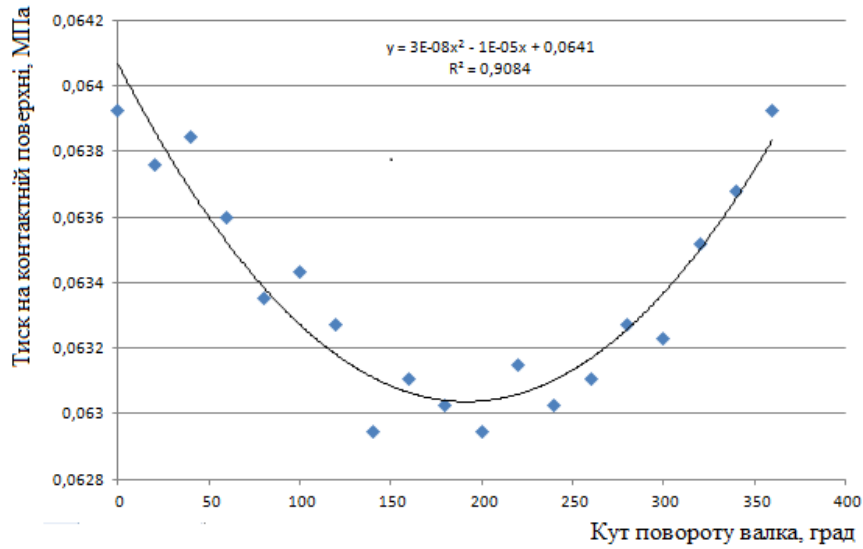


Рис. 6. Графік залежності величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка для другого способу навантаження

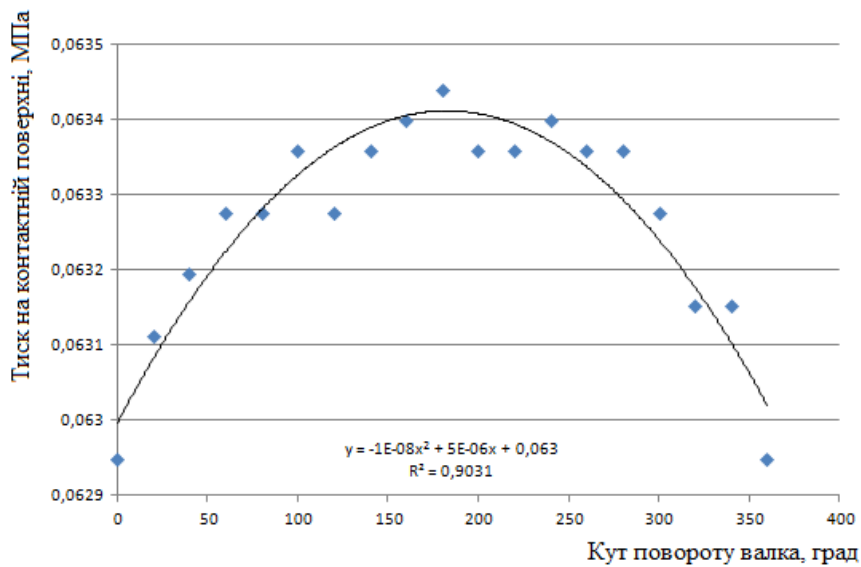


Рис. 7. Графік залежності величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка для третього способу навантаження

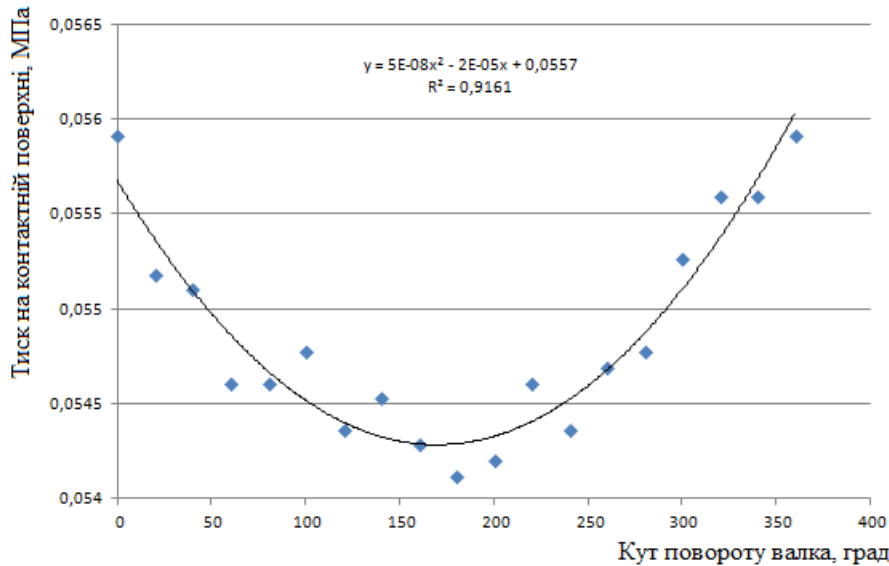


Рис. 8. Графік залежності величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка для четвертого способу навантаження

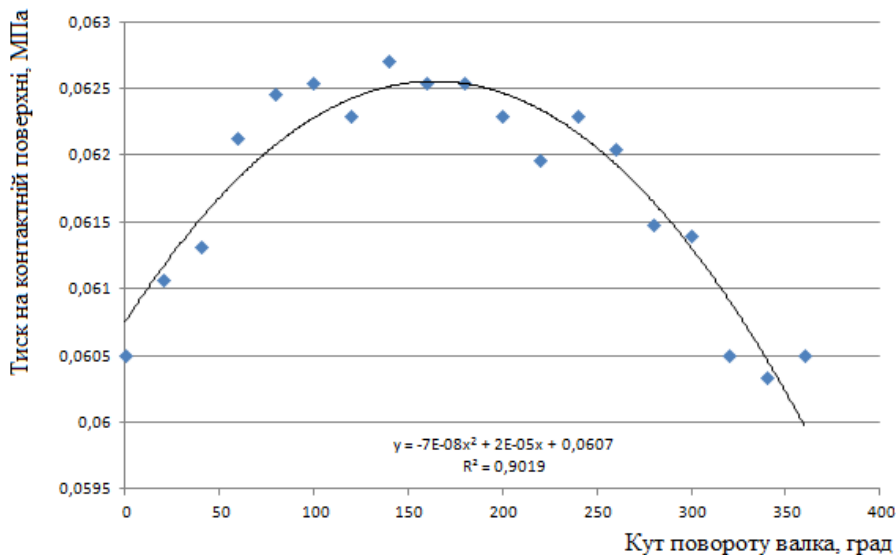


Рис. 9. Графік залежності величини тиску на контактній поверхні від кута повороту валка для п'ятого способу навантаження.

Під час експериментальних досліджень встановлено:

1. За період часу, що відповідає повному оберту валка тиск на контактній поверхні змінюється за поліномінальним законом.

2. Максимальні значення контактного тиску досягаються за умови використання котка, навантаженого способом №2 (рис.3), найменші значення тиску отримаємо за умови застосування способу №5.

Висновки. Запропоновано конструкцію валка, який забезпечує змінний вплив на прикочувану поверхню. Застосування котка дозволить вводити в роботу декількох різних машин із різними силовими параметрами залежно від температурного діапазону, виду покриття та стадії його укатки.

Література.

1. Захарченко А.В. Обоснование конструктивной схемы и выбор основных параметров катка с прерывистой рабочей поверхностью для уплотнения асфальтобетона. Дис....канд. техн. Наук. Омск, 1989. – 136 с.

2. Иванчура, В.И. Идентификация динамической системы процесса уплотнения асфальтобетонной смеси дорожными катками / В.И. Иванчура, А.П. Прокопьев, О.Г. Клевцова // Журнал Сибирского федерального университета. – 2011.– № 4. – С. 557-566.

3. Головнин А.А. Виброволновые дорожные катки: Конструкция. Теория и расчет. Опыт применения: монография. Тверь: Изд – во ТГТУ, 2002. – 76 с.
4. Беляев К.В. Разработка энергоэффективных режимов работы машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: Дис. канд. техн. наук./ К.В. Беляев; СибАДИ/ -Омск,- 2004.
5. Алексиков С. В. Сравнительная оценка однородности уплотнения асфальтобетонных покрытий городских дорог при различных режимах работы виброкатка/ С. В. Алексиков, А. А. Ермилов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. № 1(33), 2014. – С. 45 – 53.
6. Серебренников, В.С. Обоснование режимных параметров вибрационных катков для уплотнения асфальтобетонных смесей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / В.С. Серебренников. – Омск, 2008. – 170с.
7. Позднышев А.А. . Методика определения параметров устройства для оперативного контроля плотности асфальтобетона/ А.А. Позднышев // Строительные и дорожные машины, №3, 1992. С. 13-14.
8. Кондрашов, Н.А. Исследование закономерности изменения свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей в процессе уплотнения / Н.А. Кондрашов, А.А. Шестопапов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 1(48). – С. 139–144.
9. Угай, С.М. Интенсификация процессов уплотнения асфальтобетонных смесей катками с перфорированными рабочими органами [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / С.М. Угай. – Владивосток, 2008. – 117 с.
10. Дубков В.В. К вопросу об эффективности уплотнения асфальтобетонных смесей вибрационными катками/ В.В. Дубков, В.С. Серебренников // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. 2007. вып.4 ч. 1. – С.85-90.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2018

УДК: 539.4

О.С. Поліщук*Хмельницький національний університет***РУЙНУВАННЯ ВЗУТТЄВИХ ТА ШВЕЙНИХ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ***Розглянуто питання руйнування взуттєвих та швейних матеріалів ударом.**Ключові слова: ударник, робочий інструмент, матеріал, удар, операції легкої промисловості.***О.С. Полищук****РАЗРУШЕНИЕ ОБУВНЫХ И ШВЕЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ УДАРОМ***Рассмотрены вопросы разрушения обувных и швейных материалов ударом**Ключевые слова: ударник, рабочий инструмент, материал, удар, операции легкой промышленности.***O. Polishchuk****DESTRUCTION OF FOOTWEAR AND SEWING MATERIALS BY IMPACT***The issue destruction of footwear and sewing materials by impact is considered.**Keywords: drummer, working tool, material, kick, of light industry operations.***Постановка проблеми.**

Руйнування матеріалів легкої промисловості ударом обумовлене можливістю трансформувати кількість руху ударника в імпульс великої сили [1]. Це пояснює широке використання ударних машин в різних галузях промисловості. В теперішній час явище удару використовується в ударно-механічному устаткуванні для виконання різноманітних операцій.

Швейна, взуттєва і шкіряно-галантерейна галузі легкої промисловості мають специфічні технологічні операції, що відрізняють одну галузь від іншої, але широко використовуються операції, аналогічні для всіх галузей і виконуються вони на обладнанні (пресах) зі зворотним - поступальним рухом робочих органів. До таких операцій можна віднести: вирубання деталей для взуття, одягу та шкір-галантерейних виробів; виконання перфорації на деталях; пробивання отворів під металеву фурнітуру. Дані операції припускають взаємодію робочих органів пресів з матеріалами, що мають різні фізико - механічні властивості. Взаємодія носить ударний характер. В даному випадку виконавчий орган преса повинен розрізати матеріал або зробити в ньому отвори. В більшості випадків процес руйнування матеріалу здійснюється одиничним ударом ударника по робочому інструменту. Робочий інструмент (різак, пробійник) занурюється в матеріал під дією хвилі напруження після удару по ньому робочого органу преси.

Ударний ефект при виконанні даних операцій в основному досягається на устаткуванні, що використовує пневматичний, гідравлічний та електромеханічний приводи. Актуальним питанням є руйнування матеріалів при ударному виконанні вище зазначених операцій на пресовому обладнанні з лінійними електричними двигунами (ЛЕД) в якості приводу. Робочий орган устаткування з ЛЕД переміщується зі швидкістю на порядок більшою порівняно з обладнанням з іншими приводами [2]. Тому питання ударного руйнування матеріалів легкої промисловості при виконанні розглянутих операцій є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Явище удару широко використовується при виконанні технологічних операцій в різних галузях промисловості. Цим пояснюється велика кількість наукових праць, присвячених дослідженням різних аспектів цього питання, починаючи від сутності процесу зіткнення твердих тіл і закінчуючи теорією взаємодії робочих інструментів з матеріалами і їх ударного руйнування.

Вивчення ударних процесів відноситься до числа найбільш актуальних проблем механіки, пов'язаних з оцінкою поведінки робочих інструментів і матеріалів в умовах дії імпульсних навантажень. Руйнуванню матеріалів ударною дією та вивченню поздовжніх коливань в машинах ударної дії присвячені роботи Алабужева П.М., Александрова Є.В., Манжосова В.К., Саруєва Л.А., Тагасва Б.Т., Шапошнікова І.Д., Саймона Р. та інших [3].

Постановка завдань. В останні роки з'явилося багато нової інформації, що розширює межі пізнання процесів зіткнення, передачі енергії через проміжні елементи, ударного руйнування матеріалів завдяки створенню більш досконалого експериментального обладнання. Розроблені методики розрахунку ударних систем, що складаються із декількох елементів різних конфігурацій, і способи їх експериментальної перевірки. Все це значно просунуло вперед теорію ударного

руйнування різних матеріалів і дозволило вирішити ряд важливих практичних задач, що стосуються, зокрема, конструювання ударних машин і робочих інструментів [1].

Тому постає задача узагальнення накопиченого досвіду, використовуючи і власний, з метою створення єдиної прикладної теорії розрахунку ударних систем для виконання операцій легкої промисловості, так як в технічній літературі відсутні відомості стосовно їх виконання в ударному режимі.

Необхідно розглянути питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа (вирубна плита) та дослідити як впливають геометричні розміри робочих інструментів, властивості матеріалів на к.к.д. передачі енергії удару полімерному матеріалу при їх ударному руйнуванні і що є параметром оптимізації даного процесу.

Викладення основного матеріалу. Процес руйнування взуттєвих, швейних та шкіргалантерейних матеріалів одиничним ударом, що передається через проміжну ланку на робочий інструмент може використовуватися при ударному виконанні вищезазначених технологічних операцій легкої промисловості. Для їх виконання робочий інструмент (різак, пробійник) занурюється в матеріал під дією хвилі напруження після удару по ньому ударником (або разом із ударником) пресу з гідравлічним, електромеханічним чи електромагнітним приводом. Виходячи з цього можна виділити три початкових положення робочого інструменту (рис.1).

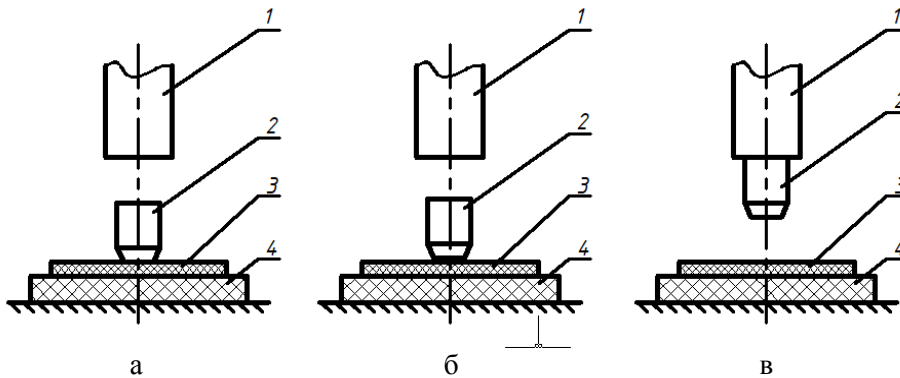


Рис.1. Схема передачі енергії від ударника пресу через робочий інструмент матеріалу: 1-ударник; 2-робочий інструмент; 3-матеріал; 4-основа (вирубна плита)

1. В момент надходження хвилі напруження робочий інструмент дотикається до матеріалу (рис.1, а).

2. В момент надходження хвилі напруження робочий інструмент знаходиться на невеликій відстані від матеріалу, тобто не щільно до нього прилягає (рис.1, б).

3. Робочий інструмент закріплений на ударнику, тобто відсутня проміжна ланка (рис.1, в).

В першому випадку, хвиля напруження стискання, що досягла контактної поверхні, починає переміщати цю поверхню з масовою швидкістю частин у хвилі u і з середньою силою:

$$F = \frac{mv}{t}, \quad (1)$$

де m - маса ударника; v - передударна швидкість; t - час удару.

Зробимо припущення, що поперечний переріз ударника і робочого інструменту однаковий, матеріал має однакові властивості, а сила F залишається постійною на протязі всього періоду удару (прямокутна форма хвилі напруження).

Очевидно, що дійсне напруження залежить від міцнісних властивостей матеріалу і величини контактної площадки леза робочого інструменту. Таким чином, хвиля напруження стискання викликає при переміщенні контактної поверхні леза інструменту зусилля, що перевищує опір матеріалу зануренню, в результаті чого проходить його руйнування з утворенням випереджаючої тріщини.

В другому випадку хвиля напруження стискання, що досягла вільної поверхні, відбивається від неї у вигляді хвилі розтягу, переміщуючи кінець леза з подвоєною масовою швидкістю частин у хвилі u . При цьому переміщення кінця леза буде в два рази більше, чим контактної поверхні кінця ударника.

Дійшовши до кінця ударника, хвиля розтягу відбивається у вигляді хвилі стискання і знову доходить до робочого інструменту, переміщуючи його в тому ж напрямку, що і в першому випадку. Так буде продовжуватися до тих пір, поки поверхня леза щільно не приляже до матеріалу. Потім занурення проходить таким же чином, як в першому випадку. Досліди показують, що втрати енергії у хвилі напруження, що проходять по робочих інструментах, незначні [1].

В третьому випадку хвиля напруження стискання йде на деформацію матеріалу, практично без втрат енергії.

Однією з основних умов правильної технології виконання операції вирубування, перфорування, пробивання слід вважати компенсацію відскоку, тобто створення такого зусилля подачі робочого інструменту до матеріалу, яке б забезпечило постійне відновлення контакту леза робочого інструменту з матеріалом перед кожним наступним ударом.

Відскок робочого інструменту з ударником відбувається, коли опір матеріалу зануренню леза зростає в період удару настільки, що стає більшим (будучи віднесеним до площі контакту) за значення напруження у хвилі, що проходить вздовж ударника. В такому випадку від контактної поверхні починає відбиватися хвиля стискання, що викликає відскок. Найбільше значення напруження у відбитій хвилі в граничному випадку може бути рівним напруженню в початковому імпульсі. Це відбувається в тому випадку, коли лезо робочого інструменту перестає занурюватися, а матеріал веде себе як нерухома границя, не деформується при дії подвоєної сили F .

Розглянемо процес взаємодії рухомого робочого інструменту (різака, пробійника) з матеріалом для випадку 3, як ідеального випадку передачі енергії. При такій взаємодії практично відсутні втрати енергії, і вся запасена енергія йде на виконання технологічної операції.

Матеріал руйнується безпосередньо при ударі ударником із прикріпленим робочим інструментом різак (рис.2). В подальшому лезо різика занурюється в матеріал, долаючи опір матеріалу, що збільшується. Очевидно, опір зануренню зростає тим скоріше, чим вища волокнистість матеріалу і більша контактна площадка леза різика. В пластичних матеріалах вся енергія робочого інструменту витрачається на пластичну деформацію.

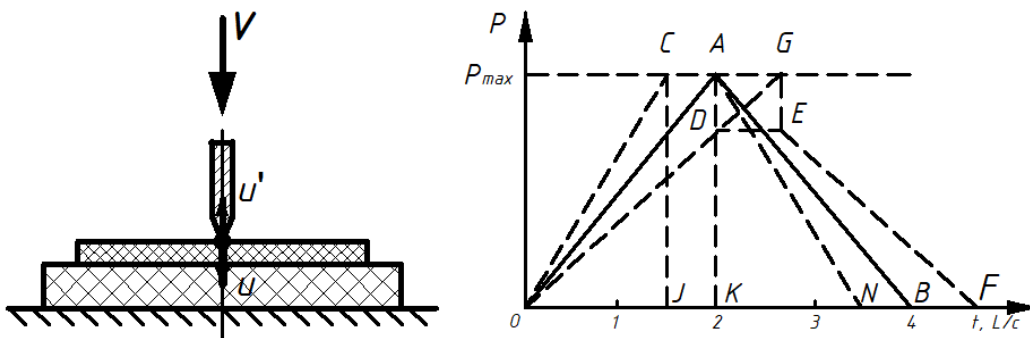


Рис.2. Схема рухомого робочого органу (різака) і графік імпульсу сили $P(t)$ на контактній площадці леза різика: c -постійна швидкість; L - довжина ударника

Процес руйнування матеріалів легкої промисловості рухомих робочим інструментом (різаком) досліджувався багатьма вченими, серед яких Ю.П. Зибін, В.П. Зибін, В.Н. Гарбарук, М.М. Майзель, В.С. Лебедев, І.І. Архіпов, І.А. Плевако, В.І. Толочко, А.І. Комісаров, В.П. Корнілов, А.Р. Молгачов, Д.Р. Амірханов, К.П. Василев, В.Є.Марголін, М.І. Чобітько, Г.П. Базюк [4]. При цьому взаємодія леза різика з матеріалом розглядалася з позиції статички, тобто не враховувався характер зміни діючої сили (сили удару) від часу і хвилюві явища, що супроводжують удар ударника із робочим інструментом по матеріалу. Основною теоретичною передумовою є умова рівності кінетичної енергії робочого інструменту роботі руйнування матеріалу і деформації ударної частини інструменту.

Із рівняння, що виражає цю умову, було отримано ряд формул, що зв'язують глибину занурення леза різика з найбільшою силою удару ударника об матеріал, що послужило теоретичним обґрунтуванням розрахунку ударного вирубування деталей з різних матеріалів. Величина найбільшої сили за допомогою цих формул визначається приблизно, виходячи із значення імпульсу, рівного кількості руху ударника в момент дотику ним поверхні матеріалу. Справжню силу удару об матеріал визначити неможливо, так як по формулах класичної механіки

(без залучення хвильової теорії) неможливо вирахувати час, на протязі якого триває удар. Його можна встановити експериментальним шляхом, але це досить складно при малих товщинам взуттєвих та швейних матеріалів, що використовуються для виготовлення взуття та одягу. Такі об'єктивні неточності вносять відомі припущення, які знижують цінність вищезгаданих формул. Зокрема, ці формули недостатньо розкривають механізм взаємодії лека різачка з матеріалом в період занурення і тому не можуть використовуватися для теоретичного обґрунтування оптимізації процесу вирубування.

Розглянемо процес взаємодії лека рухомого різачка і матеріалу з позиції елементарної хвильової теорії. В початковий момент занурення лека різачка не відчуває великого опору матеріалу і швидкість його мало відрізняється від передударної швидкості. По мірі заглиблення опір матеріалу зануренню зростає, а швидкість переміщення лека зменшується. Ця зміна швидкості нижньої частини ударника не може розповсюдитися миттєво на його довжину, вона переміщується у вигляді пружної хвилі напруження стискання. Досягнувши верхнього кінця ударника хвиля стискання відбивається і починає розповсюджуватися назад до різачка як хвиля розтягу, зменшуючи при цьому швидкість руху ударника на величину, рівну подвоєному значенню масової швидкості часток у хвилі.

Так як хвиля напруження стискання виникає безперервно при зануренні лека різачка, безперервно проходить і її відбивання від протилежного кінця ударника, все більше зменшуючи швидкість його руху. Лека рухомого різачка занурюється в матеріал зі швидкістю, що зменшується внаслідок зростання опору матеріалу. При цьому руйнування матеріалу проходить шляхом його стискання і прорізання. При достатньо пружному матеріалі в ньому виникають хвилі напруження стискання, енергія яких витрачається на руйнування. Напруження на лезі рухомого різачка рівне напруженню у хвилі стискання, що розповсюджується від контакту догори.

Занурення рухомого різачка проходить до тих пір, поки хвиля стискання, що відбивається від верхнього кінця ударника не погасить швидкості падіння. Коли масова швидкість частинок у хвилі напруження стискання u досягне $\frac{1}{2}$ значення передударної швидкості v , то першим зупиниться верхній кінець ударника. Дійсно, при відбитті хвилі стискання від вільної поверхні і виникнення хвилі розтягу, що переміщується донизу, масова швидкість частинок подвоюється. Таким чином, верхній (вільний) кінець отримує швидкість рівну по значенню передударній, але протилежно направлену:

$$v_1 = -2u - 2\left(\frac{1}{2}\right)v = -v. \quad (2)$$

Складення швидкостей дає нульову швидкість, відповідно верхній кінець ударника зупиняється. Напруження у хвилі в цей момент дорівнює:

$$\sigma = \frac{\rho cv}{2} \quad (3)$$

Але удар ще продовжується деякий час, необхідний для того, щоб повністю зняти відбиті хвилею розтяги тиску на контактні леза різачка з матеріалом.

Знайдемо на основі елементарної хвильової теорії якісні співвідношення між початковими умовами зіткнення: передударною швидкістю; розмірами ударної частини ударника; характеристикою матеріалу і характеристиками удару. До останнього відносяться глибина занурення лека різачка, час удару, найбільша сила удару. При цьому ставиться задача використати енергію рухомого ударника оптимальним чином.

Нехай рухомий ударник з різачком вдаряє по матеріалу зі швидкістю v (рис.2). Найбільша сила, з якою контактна площадка лека може діяти на матеріал, виражається формулою:

$$P_{\max} = A\rho cv \quad (4)$$

де A - площа поперечного перерізу ударника; ρ - густина матеріалу ударника; c - швидкість звуку в ударнику.

Очевидно, що такого ж значення може досягнути і опір матеріалу зануренню лека різачка.

Будемо вважати, що залежність опору матеріалу зануренню від часу і глибини заглиблення лека різачка прямолінійна.

В момент дотику лезом різачка матеріалу вверх по ударнику починає розповсюджуватися хвиля напруження стискання з лінійно зростаючою масовою швидкістю частинок u . При цьому різак занурюється з швидкістю u' . Значення цих швидкостей зв'язані з передударною швидкістю v співвідношенням:

$$v = u + u'. \quad (5)$$

При ударній взаємодії різачка з матеріалом можуть мати місце три принципово різних випадки.

1. Опір зануренню P наростає з такою інтенсивністю, що досягає значення P_{\max} по закінченню часу $< 2L/c$ (рис.2, пряма ОС). За цей період відбита хвиля розтягу ще не встигає дійти до контактної площадки леза і сила дії на неї зберігається деякий час рівною P_{\max} (відрізок СА), занурення при цьому не проходить. З моменту приходу до контакту відбитої хвилі розтягу (точка А) починається зменшення сили P_{\max} , яке закінчується в момент приходу хвилі з амплітудою швидкості рівною v (точка N). Так як хвиля розтягу є дзеркальним відображенням хвилі стискання, то $\angle ANK = \angle COJ$.

2. Опір зануренню досяг максимального значення P_{\max} в момент часу $2L/c$ (точка А). В цей же момент контактної площадки леза досягла відбита хвиля розтягу.

В послідовний період проходить зменшення діючої на контакті сили P по лінії АВ, що є дзеркальним відображенням лінії ОА. Очевидно, що з моменту зменшення сили P (точка А) занурення леза закінчується, а точка В відповідає закінченню удару.

3. Опір зануренню P не досяг свого максимального значення P_{\max} за період часу $2L/c$. Заглиблення леза могло б продовжуватися далі (відрізок DG), але відбита хвиля розтягу, що з'явилася з наростаючою амплітудою такої ж інтенсивності, що і у хвилі стискання, в кожний новий момент часу зменшує діючу на контакті силу рівно на стільки, на скільки вона збільшується. Таким чином, з моменту часу $2L/c$ (точка D) занурення леза закінчується. Опір зануренню P залишається деякий час постійним до моменту можливого досягнення ним значення P_{\max} (точка Е), а потім зменшується по прямій EF, що є дзеркальним відображенням OD.

Аналізуючи описані випадки взаємодії рухомого різачка з матеріалом, можна побачити, що оптимальним із них є другий. Дійсно, робота, що виконується різачком при зануренні леза різачка в матеріал, рівна енергії хвилі напруження, що утворюється в ударнику в період зростання сили P , тобто при заглибленні леза. Для другого випадку вона визначається площею трикутника ОАК:

$$W_0 \approx \int_0^{2L/c} P^2(t) dt \quad (6)$$

де W_0 - робота різачка при зануренні в матеріал.

Для першого і третього випадків робота різачка при зануренні в матеріал визначається відповідно площами трикутників ОСJ і ОDK, які при визначенні енергії хвилі дають менші порівняно із другим випадком значення. Таким чином, найбільша робота руйнування матеріалу може бути виконана в другому випадку. Як буде показано нижче, нахил прямої $P(t)$ до осі часу t залежить від зміни приведеної контактної площі S з глибиною занурення h (рис.3), тобто від кута загострення леза α :

$$S = 2lhtg\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (7)$$

де l - довжина леза.

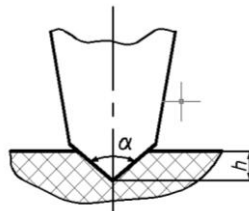


Рис.3. Профіль леза різачка

В оптимальному випадку половина всієї енергії може бути витрачена на корисну роботу (рис.2). Друга половина, що відповідає трикутнику АВК, витрачається на пружну деформацію ударника і відскокування. Відразу можна відмітити, що в інших випадках енергія, що затрачується на ці процеси, більше тої, що корисно використовується (трапеція CANJ і KDEF).

Глибина занурення леза різачка:

$$h = \frac{P_{\max}}{2[\sigma_{\text{дин}}] \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (8)$$

де $\sigma_{\text{дин}}$ - динамічна твердість матеріалу, що визначається дослідним шляхом.

Підставивши у формулу (8) вираз P_{\max} (4), отримаємо:

$$h = \frac{A\rho cv}{2[\sigma_{\text{дин}}] \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (9)$$

Запишемо роботу, що витрачається на руйнування матеріалу, у вигляді:

$$W_0 = \frac{P_{\max} h}{2}. \quad (10)$$

Підставивши сюди вираз (4) і (8), отримаємо:

$$W_0 = \frac{A^2 \rho^2 c^2 v^2}{4[\sigma_{\text{дин}}] \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (11)$$

Відповідно, при інших рівних умовах величина W_0 визначається кутом загострення леза α .

Енергія рухомого різачка:

$$W = \frac{mv^2}{2} \quad (12)$$

де m – маса різачка і ударника, рівна $Al\rho$.

Враховуючи, що в оптимальному випадку 50% енергії може бути використано на корисну роботу, прирівняємо:

$$\frac{mv^2}{4} = W_0 \quad (13)$$

Підставивши сюди замість W_0 його вираз (11) і замінивши m добутком $Al\rho$, отримаємо формулу для кута α :

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{A\rho c^2}{[\sigma_{\text{дин}}] lL} \quad (14)$$

Замінивши ρc^2 на E , в кінцевому варіанті запишемо:

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{AE}{[\sigma_{\text{дин}}] lL} \quad (15)$$

де α - кут загострення леза різачка, що визначає оптимальний процес ударного вирубування.

Підставивши значення (15) в формулу (9), отримаємо вираз для оптимальної глибини занурення леза в матеріал:

$$h_0 = \frac{vL}{2c}. \quad (16)$$

Визначимо повний час T_n удару різачка по матеріалу для всіх випадків зіткнення.

Із рис.2 очевидно, що в оптимальному (другому) випадку:

$$T_n = \frac{4L}{c} \quad (17)$$

На основі прийнятої прямолінійної залежності $P(t)$ і $P(h)$ складемо пропорцію:

$$h_0 I : \left(\frac{2L}{c}\right) = h : t,$$

Звідки:

$$t = \left(\frac{h}{h_0}\right) \left(\frac{2L}{c}\right).$$

В даному випадку час зручніше вимірювати проміжками рівними $\frac{L}{c}$ (час проходження звуковою хвилею відстані, рівній довжині ударника), тому останній вираз запишемо у вигляді:

$$t' = \frac{2h}{h_0}. \quad (18)$$

Підставивши вирази (9) і (16), отримаємо:

$$t' = \frac{2AE}{[\sigma_{\text{дин}}] L \operatorname{Ltg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (19)$$

В першому випадку зіткнення $t' < 2$ (рис.2, відрізок ОJ відповідає часу t'). Відрізок $JK = 2 - t'$, тоді із геометричної форми імпульсу ОСНА випливає:

$$T_n = 2 \left(\frac{2-t'}{2} + t' \right) \frac{L}{c} = \left[2 - \frac{2AE}{[\sigma_{\text{дин}}] L \operatorname{Ltg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] \frac{L}{c}. \quad (20)$$

В третьому випадку $t' > 2$, розмірковуючи аналогічно, знаходимо:

$$T_n = 2 \left(\frac{t'-2}{2} + t' \right) \frac{L}{c} = \left[\frac{6AE}{[\sigma_{\text{дин}}] L \operatorname{Ltg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 2 \right] \frac{L}{c} \quad (21)$$

Очевидно, що час, що знаходиться за формулами (17), (20) і (21), має звичайну розмірність.

Таким чином, розгляд процесу взаємодії рухомого різака з матеріалом на основі елементарної хвильової теорії дає можливість визначити аналітично найбільше значення сили P_{max} на контактній площадці леза, глибину h занурення леза, тривалість удару T_n і знайти їх значення, що відповідають оптимальним умовам вирубування.

Проведемо аналіз граничних умов в твердому матеріалі, що виникають в зоні контакту з робочим інструментом.

Під граничними умовами на контакті робочих інструментів з матеріалом при ударних видах вирубування, перфорування, пробивання розуміється такий напружений стан, який приводить до руйнування матеріалу під контактною площадкою леза.

Більшість матеріалів вуглецевого, швейного та шкіргалантерейного виробництва відносяться до в'язко-пружних та в'язко-пружно-пластичних матеріалів [5]. Перші характеризуються відсутністю пластичних деформацій в момент передруйнування, їх поведінка при дії зовнішніх сил підпорядковується закону Гука, тобто напруження пропорційне деформації до моменту руйнування. Другі в деякий період передруйнування починають проявляти пластичні властивості, тобто їх деформація збільшується не пропорційно діючому напруженню. Очевидно, що таке розділення до якоїсь міри умовне, так як в чистому вигляді ці властивості ніколи не проявляються через неоднорідність властивостей певних матеріалів. Однак вивчення поведінки деяких матеріалів, що мають добре виражені в'язко-пружні та в'язко-пружно-пластичні властивості, при дії на них різного виду руйнуючих навантажень допомагає встановити кількісні закономірності процесу руйнування подібних до них матеріалів, що є важливим для самої операції вирубування, так і для удосконалення технології вирубування та пресового устаткування.

Проведений аналіз наукових робіт по дослідженню ударного вирубування матеріалів вуглецевого, швейного та шкіряно-галантерейного виробництва показав, що їх можна розділити на дві групи. До першої можна віднести найбільш багаточисельні (практично всі) дослідження, в основу яких покладено передумову про аналогію занурення леза робочого інструменту під дією удару статичному зануренню клина. В результаті такого навантаження під дією сили удару в матеріалі розвивається поле напружень, що викликає появу випереджаючої тріщини, яка в подальшому викликає його руйнування (розрізання) та залежить від геометричних розмірів леза і тимчасового опору матеріалу розрізанню.

Пропонується до другої групи віднести дослідження ударного руйнування матеріалів, в основу яких покласти передумову про хвильовий характер взаємодії робочого інструменту з

матеріалом. Таких робіт по руйнуванню швейних та взуттєвих матеріалів не проводилося. Це мабуть було пов'язано із складністю проведення експериментальних досліджень та можливостей вимірювального та фіксуєчого устаткування.

Існують роботи по дослідженню руйнування гірських порід матеріалів. В даних роботах, підкреслюючи однорідність картини напруженого стану під площадкою леза інструменту при статичному і динамічному навантаженні, автори вказаних робіт велику увагу приділяють процесу передачі енергії удару хвилею напруження, а також ефекту руйнування, що пов'язаний з внутрішнім відбиванням хвилі при розповсюдженні її в глибину масиву. Аналогічними показниками можна охарактеризувати динамічне руйнування матеріалів взуттєвої, швейної та шкіряно-галантерейної промисловості.

Вплив і характер хвильових процесів, що проходять при передачі енергії удару і взаємодії робочого інструменту з матеріалом можна отримати завдяки використанню сучасних методів досліджень, а також новітнього електронного обладнання і приладів.

Розглянемо граничні умови напруженого стану матеріалу, що передують руйнуванню і процес занурення робочого інструменту. Представимо поверхню матеріалу як площину ізотропного напівпростору з ідеалізованими пружними властивостями. Під дією зосередженої сили P в цьому просторі виникає поле напружень (рис.4); ізолінії головних напружень відповідно до рішення задачі Бусінеска мають в вертикальній площині вигляд окружностей, що дотикаються границі напівпростору в точці прикладення сили P . У випадку дії на матеріал леза довжиною l сила P є навантаженням, що приходить на одиницю довжини леза. Теоретичні висновки підтверджуються результатами дослідів з фотопружними матеріалами, проведеними автором роботи [1]. При цьому не відмічається принципової різниці в структурі полів напруження при ударному і статичному навантаженнях.

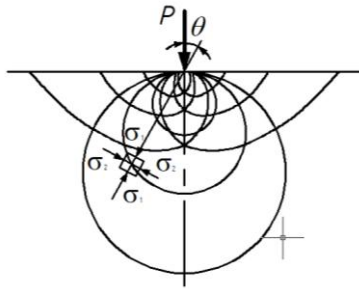


Рис.4. Поле напружень в пружному напівпросторі під дією зосередженої сили

Очевидно, що ізолінії поля напруження в ізотропному пружному напівпросторі є ізолініями максимальних дотичних напружень, що визначаються:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (22)$$

де σ_1 і σ_2 - головні напруження.

По теорії Мора руйнування твердих тіл проходить при досягненні в них максимальним дотичним напруженням τ_{\max} граничного значення, що називається також граничним напруженням зсуву. Відомо з [1], що напруження τ_{\max} діє по площадках, нахилених під кутом 45° до головних напружень. Тому в кожній точці ізолінії головних напружень максимальне дотичне напруження діє по елементарній площадці, кут нахилу якої до радіуса-вектора, що співпадає по напрямку з головним напруженням σ_1 рівний 45° .

В момент початку руйнування пружного напівпростору, тріщина, що в ньому зародилася, починає розвиватися по лінії зсуву, тобто в напрямку дії напруження τ_{\max} і переходить з одного радіуса-вектора на інший, попадаючи при цьому на нову ізолінію з меншим значенням τ_{\max} . Крива, по якій розвивається тріщина майбутнього початку руйнування (різання) матеріалу, повинна мати постійний кут нахилу до радіуса вектора в будь-якій точці напівпростору. Таку властивість має логарифмічна спіраль, яка була вперше описана Декартом і пізніше інтенсивно досліджена Бернуллі.

По формулі Бусінеска радіальне напруження (σ_1 на рис.4) визначається за формулою:

$$\sigma_r = \frac{2P \cos \theta}{\pi r} \quad (23)$$

де P - сила, що віднесена до довжини леза робочого інструменту; θ - кут між радіусом-вектором і вертикаллю; r - довжина радіуса-вектора.

Відповідно до форми (23) головне напруження в точці дії сили P рівне безкінечності, однак реальна контактна площадка леза має певну ширину і тому $r \neq 0$.

Експерименти з фотопружними матеріалами і теоретичні дослідження проведені в роботі [1] показують, що найбільші напруження виникають на деякій глибині від поверхні, що залежить, зокрема, від ширини контактної площадки. Так, якщо прийняти ширину площадки рівною $2a$, найбільші напруження виникають на глибині a . Такий самий висновок впливає також із розміщення напруження τ_{\max} під кутом 45° до головних напружень.

Як було відмічено вище, реальні матеріали взуттєвого та швейного виробництва тільки умовно можуть бути віднесені до ізотропних пружних матеріалів. Тому ударне руйнування матеріалів робочим інструментом проходить подібно до теоретичного процесу з відхиленням окремих результатів в ту чи іншу сторону при збереженні в той же час цілком визначених середньостатистичних показників.

При ударних видах вирубування, перфорування, пробивання занурення робочого інструменту в матеріал відбувається з самого початку дії удару – надходження початкової хвилі напруження. Під лезом, в зоні найбільших напружень, починає рости ядро ущільнення стиснутого матеріалу (рис.5, а), завдяки якому слідує більш плавний перерозподіл і передача тиску ударного імпульсу на навколишній масив матеріалу. В масиві утворюється наростаючий об'єм стискання з градієнтом напруження, що постійно збільшується в сторону ядра ущільнення. Збільшення напруження проходить як внаслідок занурення леза і росту ядра ущільнення, так і в результаті внутрішнього відбивання в глибину масиву хвильової енергії, що випромінюється лезом.

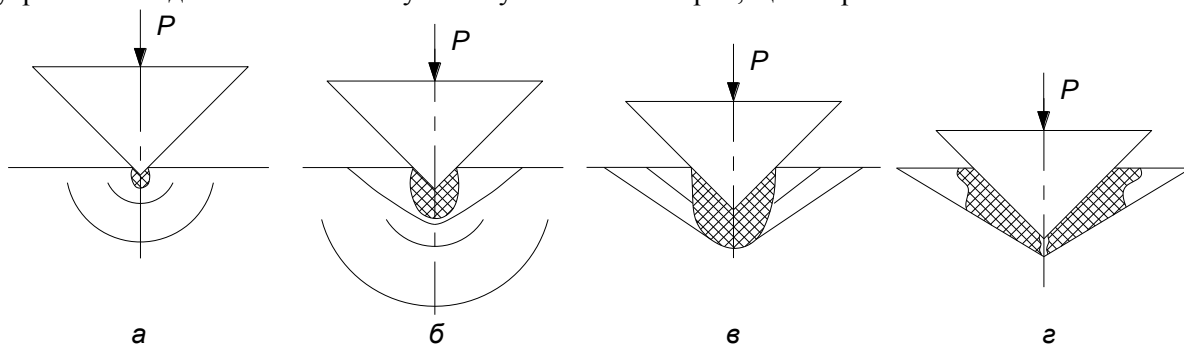


Рис.5. Схема ударного руйнування полімерного матеріалу клиновидним інструментом

При досягненні напруженням граничного значення для певного матеріалу в зоні, що примикає до ядра, починають зароджуватися тріщини, які розвиваючись по лініях різку, звільняють частину пружної енергії і викликають розривання об'єму стискання певного шару матеріалу (рис.5, б).

Далі картина повторюється. В наступному шарі, що примикає до ядра, напруження досягає критичного значення. Проходить зародження тріщини, її розвиток і розривання нової порції матеріалу. (рис.5, в). Потім знову відбувається приріст ядра, і так до тих пір, поки опір матеріалу зануренню леза не зрівняється із силою дії імпульсу або не закінчиться удар. В цей момент напруження на контактній поверхні падає, різко зменшується тиск на ядро ущільнення, і пружна енергія, що накопичена в незруйнованому об'ємі стискання йде на розривання та розсування шарів матеріалу, що залишилися (рис.5, г).

Для кількісного оцінювання результатів руйнування матеріалу ударним навантаженням деякі дослідники використовують поняття «динамічна твердість матеріалу» $[\sigma_{дин}]$. Цей показник є тим граничним значенням напруження на контактні леза з матеріалом, при якому матеріал руйнується в період удару. При зануренні леза в формі клину контактна площа рівномірно збільшується, що супроводжується, як показують експерименти, відносно рівномірним збільшенням сили опору зануренню.

Динамічна твердість одних і тих же матеріалів, особливо анізотропних, може коливатися в широких межах. Ці коливання пояснюються впливом тих дефектів і неоднорідностей властивостей, в результаті яких по теорії Гріффітса і починається руйнування твердих тіл.

Для практичного використання енергії удару при виконанні операцій вирубування, перфорування, пробивання найбільший інтерес представляє оптимальний процес руйнування матеріалу під лезом різачка. Критерієм такого процесу є мінімальна енергоємність при найбільшому к.к.д. передачі енергії матеріалу. Енергоємність руйнування може коливатися в деяких границях в залежності від геометричних розмірів робочого інструменту та параметрів удару. Але при одних і тих же умовах, головну роль в оптимізації технологічного процесу грає к.к.д. передачі енергії удару.

При кожній комбінації кута загострення леза різачка і динамічній твердості матеріалу втрати енергії при ударі будуть різні. Так при малому загостренні леза і малій динамічній твердості матеріалу опір зануренню наростає повільніше і основна частина енергії відбивається у вигляді хвилі розтягу. При великому куті загострення леза різачка (більшій початковій контактній площі) та матеріалі з більшим коефіцієнтом динамічної твердості матеріалу відбивається також основна частина енергії, але вже у вигляді хвилі стискування. Відповідно, для кожного конкретного початкового імпульсу є оптимальне співвідношення кута загострення леза різачка і динамічної твердості матеріалу при якому к.к.д. передачі енергії максимальний.

Висновки.

1. Руйнування матеріалу при передачі енергії удару від ударника із закріпленням на ньому робочим інструментом, або від ударника через робочий інструмент супроводжується виникненням під контактною площадкою інструменту об'ємної зони стискування з ядром ущільнення і градієнтом напруження, що змінюється; появою випереджаючої тріщини при досягненні напруженням значення динамічної твердості матеріалу та подальшим його руйнуванням (різанням). При цьому занурення леза проходить в більшості випадків плавно з поступовим зростанням опору занурення.

2. Енергія удару передається полімерному матеріалу через контактну площу подібно до передачі енергії на границі двох стержнів (робочий інструмент і полімерний матеріал). При цьому другий стержень (полімерний матеріал) може змінювати площу свого поперечного перерізу в тривалості удару від нуля до безмежності.

3. Залежність опору занурення P від глибини заглиблення h і часу t , на протязі якого відбувається занурення леза, може бути апроксимовано прямою лінією у випадку лінійної залежності приведеної контактної площі від глибини заглиблення леза і лінійної зміни амплітуди напруження в початковому імпульсі.

4. Величина кута загострення леза, що визначає закономірність зміни приведеної контактної площі, впливає на к.к.д. передачі енергії удару полімерному матеріалу і є параметром оптимізації процесу ударного виконання операції вирубування.

Список використаних джерел:

1. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – Л: Недра, 1977. – 159 с.
2. Поліщук О.С. Процес передачі енергії при ударному виконанні операцій легкої промисловості // Наукові нотатки. – 2018. – Вип. 63. - С.163-171.
3. Жуков И.А. Разработка научно-методических основ исследования и совершенствования ударных систем (на примере машин, применяемых при разрушении хрупких сред): Автореферат дис.... кандидата техн. наук: 01.02.06 / Жуков Иван Алексеевич. – Томск., 2010. – 32.
4. Поліщук О.С. Підвищення ефективності застосування пресового обладнання в легкій промисловості: дис.... кандидата техн. наук: 05.05.10 / Поліщук Олег Степанович. – К., 2001. – 155с.
5. Поліщук О.С., Кармаліта А.К., Бурмістенков О.П. Полімерні матеріали для виробництва виробів легкої промисловості та їх фізико-механічні властивості // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – №2 – С. 134 – 140.

Рецензенти:

Кармаліта А.К., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету, к.т.н., професор.

Місяць В.П., професор кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну, д.т.н., професор

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018

УДК 004.932

А.І. Поляченко*Київський національний університет імені Тараса Шевченка***МОЖЛИВОСТІ МЕТОДІВ ПОШУКУ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ АНОМАЛІЙ У
ТОМОГРАФІЧНИХ ТА РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗНІМКАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ВСТАНОВЛЕННЯ ДІАГНОЗУ**

У роботі розглянуті можливості методів пошуку та локалізації аномалій у томографічних та рентгенівських знімках для підвищення точності встановлення діагнозу. Встановлено існування великої кількості алгоритмів для кластеризації медичних зображень, які поділяються на структурні та статистичні. Досліджувана проблема полягає у тому, що основною характеристикою ураженої тканини є її внутрішня структура, тобто густина ураженої та неуразженої тканини можуть бути дуже схожими, а відповідні області на КТ чи МРТ знімку будуть досить подібними і аналіз значень інтенсивності не надасть потрібної інформації. Тому виникає необхідність розробки та впровадження таких методів аналізу структурних змін тканин організму, які дозволять максимально точно локалізувати уражені тканини та їх межі.

Ключові слова: пошук, локалізація, КТ, МРТ, діагноз, структурні зміни, уражені тканини, медичні зображення, кластеризація.

А.И. Поляченко*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко***ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ ПОИСКА И ЛОКАЛИЗАЦИИ АНОМАЛИЙ В
ТОМОГРАФИЧЕСКИХ И РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ТОЧНОСТИ ПОСТАНОВКИ ДИАГНОЗА**

В работе рассмотрены возможности методов поиска и локализации аномалий в томографических и рентгеновских снимках для повышения точности постановки диагноза. Установлено существование большого количества алгоритмов для кластеризации медицинских изображений, которые подразделяются на структурные и статистические. Исследуемая проблема заключается в том, что основной характеристикой пораженной ткани является ее внутренняя структура, то есть плотность пораженной и непораженной ткани могут быть очень похожими, а соответствующие области на КТ или МРТ снимках будут подобными и анализ значений интенсивности не предоставит нужной информации. Поэтому возникает необходимость разработки и внедрения таких методов анализа структурных изменений тканей организма, которые позволят максимально точно локализовать пораженные ткани и их пределы.

Ключевые слова: поиск, локализация, КТ, МРТ, диагноз, структурные изменения, пораженные ткани, медицинские изображения, кластеризация

A.I. Poliachenko*Taras Shevchenko National University of Kyiv***POSSIBILITIES OF METHODS FOR SEARCHING AND LOCALIZING ANOMALIES IN
TOMOGRAPHY AND X-RAY IMAGES TO IMPROVE THE ACCURACY OF DIAGNOSIS**

The paper discusses the possibilities of methods for the search and localization of anomalies in tomography and x-ray images to improve the accuracy of diagnosis. The existence of a large number of algorithms for the clustering of medical images, which are divided into structural and statistical, has been established. The problem under investigation is that the main characteristic of the affected tissue is its internal structure, that is, the density of the affected and unaffected tissue can be very similar, and the corresponding areas on CT scan or MRI images will be similar and the analysis of the intensity values will not provide the necessary information. Therefore, there is a need to develop and implement such methods for analyzing structural changes in body tissues, which will allow localizing the affected tissues and their limits as accurately as possible.

Key words: search, localization, CT scan, MRI, diagnosis, structural changes, affected tissue, medical images, clustering.

Постановка проблеми. Успіхи сучасної медицини суттєво залежать від досягнень у сфері медичного приладобудування та розвитку медичного програмного забезпечення. Однією з найважливіших задач, що постає перед лікарями, є визначення точних меж пухлин та інших аномальних утворень у тканинах організму людини. Для обстеження пацієнта, як правило, використовуються методи комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії (КТ та МРТ відповідно). Обидва методи дозволяють проводити пошарове вивчення внутрішньої будови органічних структур без їх фізичного пошкодження (якщо не розглядати можливі побічні ефекти у результаті опромінення чи тривалого знаходження у потужному магнітному полі).

Прилади КТ базуються на законі експоненційного зменшення інтенсивності монохроматичного випромінювання у гомогенному ізотропному середовищі (закон Бугера-Ламберта-Бера), що дозволяє шляхом аналізу ослаблення інтенсивності рентгенівського випромінювання,

визначати густину тканин, які вивчаються. На відміну від звичайного рентгенівського знімку, в якому результуюче зображення представляє собою сукупну рентгенівську тінь всіх тканин, що зустрілися на шляху проходження рентгенівського променя, знімки КТ відповідають щільності тканин у деякій конкретній площині сканування. МРТ прилади використовують інший принцип визначення структури тканин. Пацієнт знаходиться у потужному магнітному полі, в той час як надзвичайно чутливі детектори визначають відклик атомів водню, що змінюють свою орієнтацію під дією зовнішнього магнітного поля. Оскільки для окремих тканин організму властиві певні концентрації атомів водню, за реакцією атомів водню можна судити про типи тканин та їх розташування у межах області, яка вивчається.

Результатом обстеження є серія знімків, що відповідають обраним площинам сканування. Шляхом виконання досить нетривіальних обчислень, програмне забезпечення томографічних робочих станцій відтворює структурне зображення об'єкта сканування на основі даних про рентгенівську щільність (КТ) чи відклик атомів водню (МРТ). Як правило ці зображення є відносно монохромними (використання єдиного каналу для кольору) та невеликими за роздільною здатністю (наприклад, 512x512 пікселів). На основі отриманих знімків лікар візуально визначає наявність аномальних утворень та їх межі. Проблема полягає у тому, що наявність пухлин досить просто визначити візуально у силу їх характерних структурних особливостей, у той час як визначення точних меж між здоровими та ураженими тканинами є дуже складною задачею, яку практично неможливо вирішити без виконання додаткових замірів та розрахунків. Складність цієї задачі є наслідком того, що здорові та уражені тканини на знімках КТ та МРТ можуть виглядати практично однаково, у сенсі, наприклад, кольору відповідних областей, що, у свою чергу, унеможливує використання методів візуального аналізу зображення для виявлення меж між вказаними областями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При лікуванні онкологічних захворювань, в особливості, злоякісних пухлин, точність визначення конкретного захворювання та вчасність надання відповідної допомоги є ключовими факторами. Для обстеження пацієнта, як правило, використовуються методи комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії (КТ та МРТ відповідно) [4]. На основі отриманих серій знімків лікар повинен виявити аномальні тканинні утворення та якомога точніше визначити їх межі, особливо у випадку необхідності подальшого хірургічного втручання.

Визначення меж та форми патологічних осередків, в особливості, злоякісних новоутворень, метастазів, є однією з найбільш складних та актуальних задач променевої діагностики, а також для випадків подальшого хірургічного втручання. Важливість точного визначення меж уражених тканин впливає з того, що при їх неповному хірургічному видаленні, частини ураженої тканини, які залишились у організмі, можуть викликати вторинне розповсюдження злоякісних утворень і подальший розвиток та поширення аномальних осередків (виникнення вторинних вогнищ патологічного процесу). З іншого боку, надмірне ушкодження здорових тканин під час видалення патологічних утворень зменшує реабілітаційні показники пацієнта та може призвести до виникнення післяопераційних ускладнень. Більше того, визначення точних контурів та областей із однаковою структурою також важливе при аналізі ступеня ураження, оскільки різним стадіям розвитку патологічних захворювань характерна наявність відмінностей у структурі відповідних тканин. Уражені області ідентифікуються лікарем шляхом візуального аналізу наявних знімків. Окремий випадок складають такі тяжкі аномалії тканин як пухлини (рис. 1).

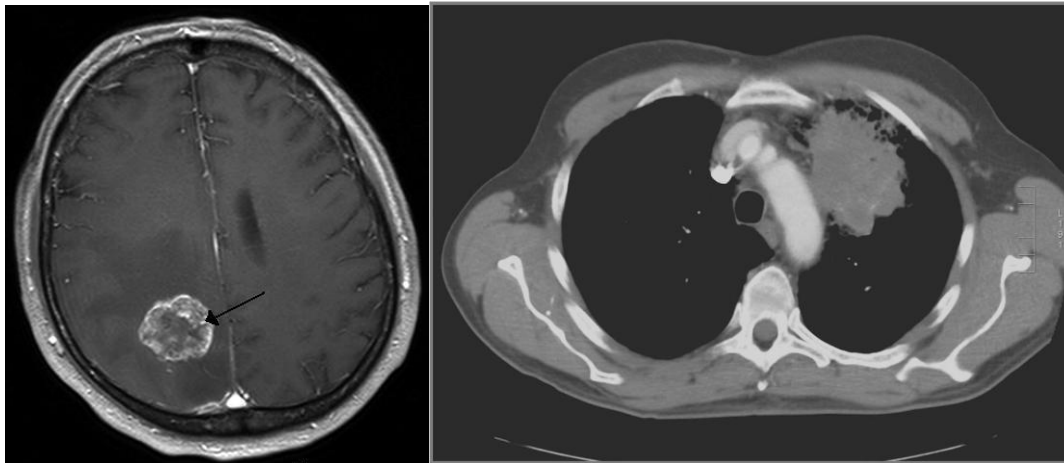


Рис. 1. Приклади знімків пухлин

Точне визначення меж новоутворення особливо важливе у випадку подальшого хірургічного втручання. На жаль, далеко не завжди візуальний аналіз дозволяє визначити межі патологічних осередків з достатньою точністю (рис. 2).

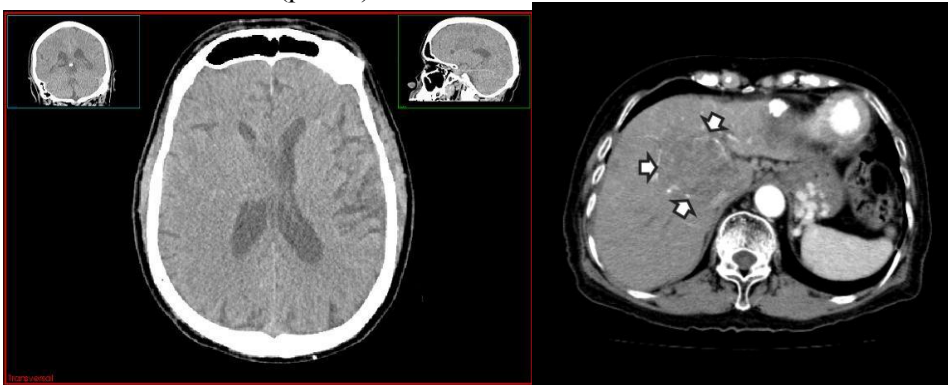


Рис. 2. Приклади пухлин, для яких важко визначити точні межі шляхом візуального аналізу

На практиці при аналізі конкретного медичного зображення виникає необхідність вибору алгоритму, найбільш підходящого для його сегментації [1,5, 6, 9, 11, 12, 14]. Фактично таке завдання стоїть, перед розробниками програмних засобів для МРТ-обладнання, а не перед лікарями-клініцистами, які використовують методи променевої діагностики.

При виборі алгоритму доводиться враховувати як властивості конкретного медичного зображення, так і особливості певного алгоритму сегментації [16-18]. Тому, далі, розглянемо найбільш застосовувані методи сегментації зображень. Аналіз існуючих публікацій показує, що класифікація методів сегментації можлива за різними критеріями (напрямами), включаючи параметри яскравості [Помилка! Невідомий аргумент ключа.] (розривність і однорідність); ознаки сірого рівня, текстури [Помилка! Невідомий аргумент ключа.] тощо. Автори роботи [5] класифікують методи сегментації в залежності від властивостей, на основі яких вони виконуються (розривність або схожість низькорівневих ознак); стратегій обробки зображення (послідовна або паралельна); типу зображення (кольорове або півтонове); наявності в використовуваному методі вбудованого (внутрішнього) критерію для перевірки якості сегментації. У роботах [10, 15] методи сегментації поділяються на три класи в залежності від того, що лежить в їх основі: край, область або пікселі. Класифікація методів сегментації в залежності від застосовуваного математичного апарату розглянута в роботі [2]. За цією ознакою розрізняють порогову сегментацію; морфологічну сегментацію і метод нарощування областей. У деяких роботах [3, 8], класифікація методів сегментації розглядається з точки зору участі оператора в процесі сегментації: інтерактивні, автоматичні, напівавтоматичні. Класифікувати методи сегментації, які найбільш часто використовують в завданнях обробки медичних зображень можна наступним чином: порогові методи; методи виявлення країв; методи виділення областей; метод

морфологічного водорозділу; методи, засновані на атласах; методи кластеризації; штучні нейронні мережі. Для оцінки ефективності застосування того чи іншого методу використовуються, як правило, такі показники [7]: чутливість; специфічність; точність. Практика показує, що один і той же метод може показати гарні результати на певних медичних зображеннях, а на інших зображеннях того ж типу може бути неефективним [13].

Постановка завдання. У даній статті необхідно виявити можливості методів пошуку та локалізації аномалій у томографічних та рентгенівських знімках з метою встановлення більш точного діагнозу.

Виклад основного матеріалу. У 2013 році в співпраці з Французькою грид-ініціативою (France Grilles) та фахівцями лабораторії Medical Imaging Research Center CREATIS University Lyon було встановлено першу версію порталу Virtual Imaging Platform в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України. Virtual Imaging Platform (VIP) – це веб-платформа для мультимодальної обробки медичних зображень. Особливістю даного продукту є наявність середовища, яке дозволяє застосовувати спільні програмні засоби обробки зображень з використанням власних наборів даних, інтегрувати в портал власні програми за допомогою розробників системи, виконувати обробку на розподілених комп'ютерних ресурсах. В 2014 році портал Virtual Imaging Platform в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України був адаптований для підтримки зберігання та обробки медичних даних в рамках спільних робіт с фахівцями Інституту ядерної медицини та променевої діагностики НАМН України. У межах зазначеного проекту були вирішені інфраструктурні питання збору, зберігання та обробки медичних зображень.

У той же час був ініційований проект реалізації оригінальних алгоритмів аналізу областей уражених тканин для МРТ та КТ зображень, що були запропоновані фахівцями Інституту ядерної медицини та променевої діагностики НАМН України. На жаль, роботи по проекту дуже швидко зупинилися і жоден з алгоритмів не був реалізований у тому об'ємі, який би дозволив його використання, або ж хоча б тестування на наборах реальних даних. Разом з цим, наявні дослідницькі праці у цьому напрямку є застарілими і не відповідають поточним потребам медичної галузі. Ці праці пропонують використання порівняно нескладних загальних статистичних прийомів (як то, наприклад, розрахунок середнього значення для області та ін.), що не дає бажаних результатів. Таким чином, в Україні на сьогодні немає інструментів чи методик для точного виявлення меж патогенних утворень в організмі людини, що негативно відображається на діагностичних можливостях лікарів у питаннях локалізації пошкоджених тканин. Важливим аспектом роботи з КТ та МРТ зображеннями є те, що вони не містять інформації про колір (рис. 3). Реальні дані відповідають рентгенівській щільності (як правило, за шкалою Хаунфілда).

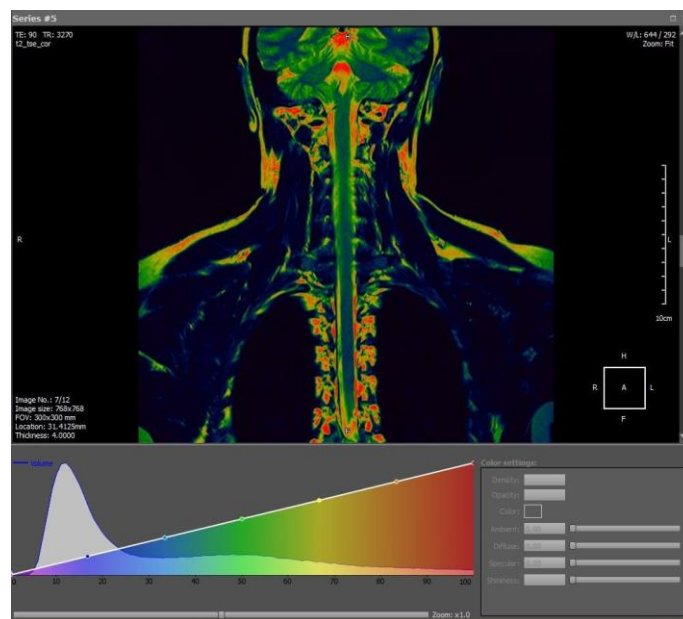


Рис. 3. Візуалізація томографічних знімків

Для відображення томографічного знімку потрібно задати передаточну функцію. Найбільш популярною передаточною функцією є лінійне контрастування у простір градацій сірого кольору (рис. 4).

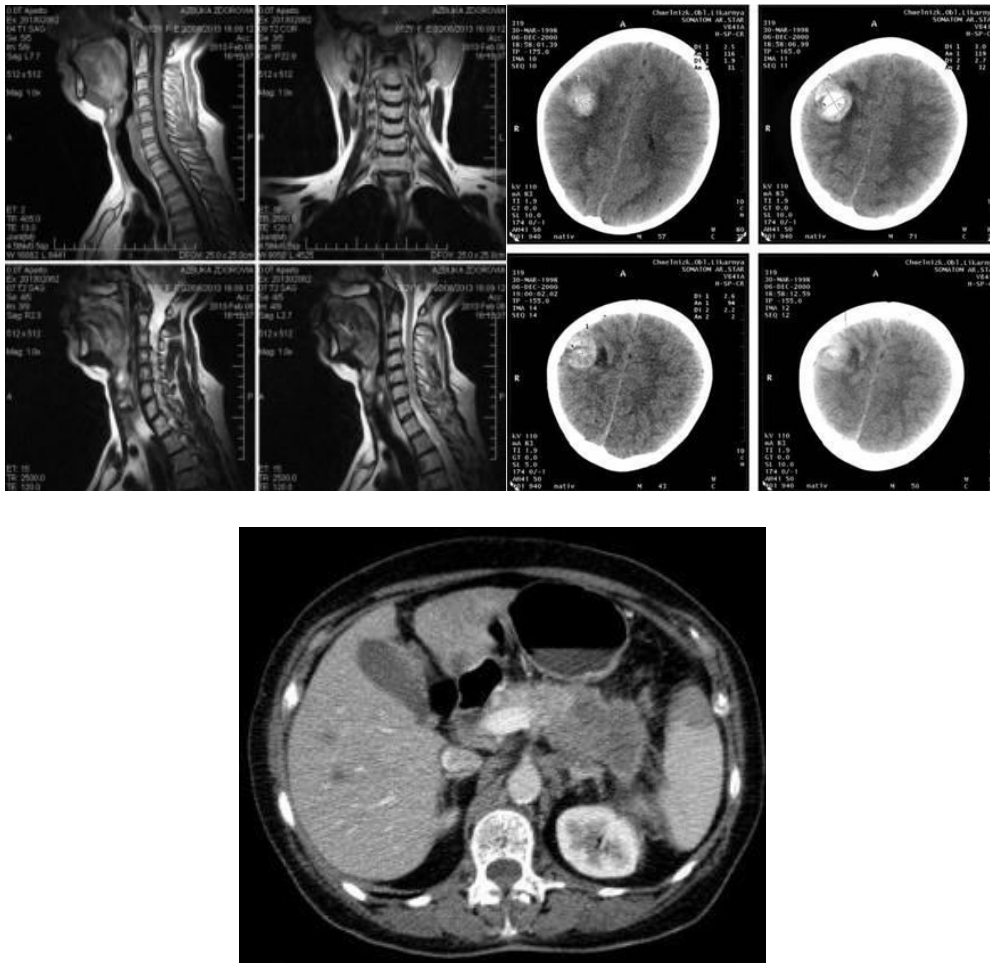


Рис. 4. Приклади лінійного контрастування у простір градацій сірого кольору

Важливим аспектом вирішення ураженої тканини є її морфологічні особливості, зокрема рівень васкуляризації (специфіка кровопостачання), особливості гілкування судинної сітки, густина тканин та інше. Наведені якісні та кількісні метрики дозволяють для конкретного виду тканин визначити не тільки тип ураження, а й встановити його точні межі. У роботі планується використати методи математичної постобробки діагностичних зображень з метою отримання якісних і кількісних результатів відносно границь областей, які мають подібні діагностичні параметри, що визначаються типом внутрішніх зв'язків при використанні таких методів променевої діагностики, як КТ та МРТ. На початковому етапі будуть реалізовані алгоритми просторової кореляції, запропоновані фахівцями Інституту ядерної медицини та променевої діагностики НАМН України, з подальшим їх вивченням, розвитком та вдосконаленням. У якості даних для обробки будуть використовуватися медичні зображення у форматі DICOM із двох встановлених у інституті томографів зі залученням медичних експертів для формулювання характеристики зображень та опису зон, що є підозрілими на аномальність. Реалізовані алгоритми в якості функціонального модуля будуть включені у окрему програму для робочих станцій, яка буде дозволяти відкривати DICOM зображення, обирати в них області для аналізу, виконувати відповідні розрахунки та здійснювати контрастування і кольорову корекцію обраних областей у відповідності до їх структури та отриманих статистичних даних. Створений прототип буде тестуватися та вдосконалюватися у тісній співпраці із медиками-фахівцями у галузі променевої діагностики.

Розвитком наведеного програмного рішення є його еволюція у веб-сервіс, який буде розгорнутий на потужностях грид-системи NGI-UA, яка працює в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України. Перехід на якісно нову потужну апаратну інфраструктуру дозволить збільшити пропускну здатність при обробці медичних зображень, зменшити час

очікування та надати доступ до функціоналу визначення меж патогенних зон ширшому колу медичних спеціалістів, оскільки для використання можливостей системи потрібно буде лише мати обліковий запис та підключення до мережі Інтернет. Архітектура програмної системи дозволить підключення альтернативних реалізацій методів аналізу контурів уражених тканин, їх порівняння та співставлення з точки зору швидкості роботи, споживання комп'ютерних ресурсів та точності результатів. Прикладами альтернативних методів пошуку контурів областей із певною патологічною структурою можуть бути групи алгоритмів з області штучного інтелекту, такі як нечіткі системи логічного виведення, багатшарові нейронні мережі та системи deep learning. Можливість застосування цих алгоритмів для вирішення поставленої задачі показується їх застосовністю у суміжних дисциплінах, таких як розпізнавання зображень та нечітке співставлення зі зразком.

Висновки. У роботі розглянуті можливості методів пошуку та локалізації аномалій у томографічних та рентгенівських знімках для підвищення точності встановлення діагнозу. Встановлено, що у світі сьогодні існує велика кількість запропонованих алгоритмів для кластеризації медичних зображень, які можна розділити на структурні та статистичні. Структурні методи базуються на просторових властивостях зображень і є чутливими до артефактів та шуму, що негативно відображається на їх застосовності. Також вони є залежними від чіткості границь між областями на зображенні та обраного початкового наближення. З іншого боку, статистичні методи розглядають зображення як деякий розподіл випадкової величини інтенсивності кольору пікселів. Проблема полягає у тому, що основною характеристикою ураженої тканини є її внутрішня структура. Іншими словами, густина ураженої та неуряженої тканини може бути дуже схожою. Як наслідок, відповідні області на КТ чи МРТ знімку будуть досить подібними і аналіз значень інтенсивності не зможе надати потрібної інформації. Існуючі алгоритми концентруються на виявленні контрастних переходів у зображенні як основний засіб кластеризації. У результаті встановлено, що існує необхідність у розробці та впровадженні таких методів аналізу структурних змін тканин організму, які дозволять максимально точно локалізувати уражені тканини та їх межі, на що будуть спрямовані подальші дослідження.

Список використаної літератури

1. Брумштейн Ю. М. Системный анализ направлений и особенностей информатизации сферы здравоохранения России / Ю. М. Брумштейн, Е. В. Складенко, А. С. Мальвина, Ю. Ю. Аксенова, А. Б. Кузьмина // Прикаспийский журнал: управление и высокотехнологии. - 2013. - № 4. - С. 73-86.
2. Гонсалес Р. С. Цифровая обработка изображений / Р. С. Гонсалес, Р. Э. Вудс. - Москва : Техносфера, 2005. - 1072 с.
3. Дороничева А. В. Методы распознавания медицинских изображений для задач компьютерной автоматизированной диагностики / А. В. Дороничева, С. З. Савин // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 4. - Режим доступа: www.science-education.ru/118-14414.
4. Жук С. В. Обзор современных методов сегментации растровых изображений / С. В. Жук // Известия волгоградского государственного технического университета. - 2009. - № 6. - С. 115-118.
5. Марусина М. Я. Современные виды томографии: учебное пособие / М. Я. Марусина, А. О. Казначеева. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2006. - 152 с.
6. Поршнев С. В. Универсальная классификация алгоритмов сегментации изображений / С. В. Поршнев, А. О. Левашкина // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. - 2008. - № 3. - С. 163-172.
7. Anam M. An Efficient Brain Tumor Detection Algorithm Using Watershed & Thresholding Based Segmentation / M. Anam, J. Ah, F. Tehseen // Image, Graphics and Signal Processing. - 2012. - Vol. 10. - Pp. 34-39.
8. Bansal S. Performance analysis of color based region split and merge and otsu's thresholding techniques for brain tumor extraction / S. Bansal, R. Maini // International Journal of Engineering Research and Applications. - 2013. - Vol. 3, issue 4. - Pp. 1640-1643.
9. Hakeem A. A. A new approach to image segmentation for brain tumor detection using pillar k-means algorithm / A. A. Hakeem, R. Tirumala, I. A. Mohammed // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. - 2013. - Vol. 2, issue 3. - Pp. 1429-1436.
10. Hough P. V.C. Method and means for recognizing complex patterns / P. V.C. Hough. - U.S. Patent 3,069,654. - December 18, 1962.
11. Kharrat A. Detection of brain tumor in medical images / A. Kharrat, N. Benamrane, M. Ben Messaoud, M. Abid // International Conference on Signals, Circuits and Systems. - 2009. - Pp. 1-6.

11. Logeswari T. An improved implementation of brain tumor detection using segmentation based on hierarchical self organizing map / T. Logeswari, M. Kaman // International Journal of Computer Theory and Engineering. - 2010. - Vol. 2, no. 4, pp. 1793-8201.
12. Marr D. Proceedings of the Royal Society of London / D. Marr, E. Hildreth // Series B, Biological Sciences. - Vol. 207, no. 1167. - Pp. 187-217.
13. Neeraj Sharma Automated medical image segmentation techniques / Neeraj Sharma, Lalit M. Aggarwal // Journal of medical physics. - 2010. - No. 35. - Pp. 3-14.
14. Prewitt J. M. S. Object enhancement and extraction, picture processing and psychopictorics // J. M. S. Prewitt; B. Lipkin, A. Rosenfeld (ed.). - NY : Academic Pres, 1970. - Pp. 75-149.
15. Rakesh M. Image segmentation and detection of tumor objects in MR brain images using fuzzy C-means (FCM) algorithm / M. Rakesh, T. Ravi // International Journal of Engineering Research and Applications. - 2012. - No. 2, issue 3. - Pp. 2088-2094.
16. Roberts L. G. Machine perception of three-dimensional solids / L. G. Roberts // Optical and Electro-Optical Information Processing. - MIT Pres, 1965. - Pp. 159-197.
17. Robinson G. S. Edge detection by compass gradient masks / G. S. Robinson // Computer Graphics and Image Processing. - 1977. - Vol. 6, no. 5. - Pp. 492-502.
18. Sobel I. E. Camera models and machine perception, PHD dissertation / I. E. Sobel. - Stanford University, 1970.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2018

УДК 621Ф192;621.002.3-419.001.5;656.56:620.193

К.Є. Потопальська, О.О. Ларін*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"***СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА РЕСУРСУ ТРУБОПРОВОДУ З
УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ВТОМИ ТА РОЗВИТКУ КОРРОЗІЇ**

В даній роботі проводиться аналіз впливу об'ємного поверхневого корозійного дефекту та втомних пошкоджень на надійність коліна магістрального трубопроводу. Для цього було створено параметричну модель трубопроводу з корозійним дефектом, що розвивається стохастично та підпорядковується лог-нормальному закону розподілення. На основі побудованої моделі було проведено серію типових розрахунків для визначення НДС трубопроводу з дефектом, який відповідає різним термінам експлуатації.

Ключові слова: корозія, магістральний трубопровід, втома, надійність, стохастичність.

К.Е. Потопальская, А.А. Ларин**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА С
УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ И РАЗВИТИЯ КОРРОЗИИ**

В данной работе проводится анализ влияния объемного поверхностного коррозионного дефекта и усталостных повреждений на надежность колена магистрального трубопровода. Для этого было создано параметрическую модель трубопровода с коррозионным дефектом, который развивается стохастично и подчиняется лог-нормальному закону распределения. На основе построенной модели было проведено серию типичных расчетов для определения НДС трубопровода с дефектом, который соответствует разным терминам эксплуатации.

Ключевые слова: коррозия, магистральный трубопровод, усталость, надежность, стохастичность.

K.E. Potopalska, O.O. Larin**STATISTICAL ESTIMATION OF PIPELINE RELIABILITY AND LIFETIME
TAKING INTO ACCOUNT THE PROCESSES OF FATIGUE ACCUMULATION
AND CORROSION GROW**

The aim of the research – to analyze of the influence of a volumetric surface corrosion defect and fatigue damage on the reliability of the main pipeline's elbow. The parametric model of defected pipeline was created. Volumetric corrosion defect is modeled as stochastically developing and obeys to the lognormal distribution law. Based on the constructed model, series of typical calculations were conducted for determining the stress-strain state of the pipeline with defect that corresponds to different operation terms. Using the obtained data for the construction stress-strain state and the developed mathematical model for determining the accumulation of fatigue damage, the damage parameter and probability of failure operation for the design at different values of the internal loading and with a defect that corresponds to different terms of operation was received. It has been determined a probability of failure during the operation of a damaged pipeline's elbow with the maximum possible load in all relevant areas.

Key words: corrosion, pipeline, fatigue, reliability, stochasticity.

Вступ

Магістральні трубопроводи є одним із найбільш поширених засобів транспортування нафти і газу в Світі, який забезпечує високі показники безпеки та економічності. За рахунок того, що зазвичай дані конструкції використовуються довготривало, вони схильні до появи різноманітних дефектів та пошкоджень. Такі пошкодження можуть виникати за рахунок дії агресивного середовища, зокрема при взаємодії з ґрунтом, в якому знаходиться трубопровід, механічних пошкоджень та інше. Одним з найбільш поширених типів є дефекти корозійної природи. Розвиток поверхневих дефектів корозійного типу відбувається випадково, тому процес їх зростання слід розглядати у ймовірнісній постановці. З іншого боку в наслідок дії циклічного внутрішнього навантаження (пульсації тиску) у трубопроводі відбувається процес накопичення втоми. Дані процеси (поява корозійних дефектів та накопичення втоми) відбуваються одночасно та мають суттєвий вплив на довготривалу міцність трубопроводу. Тому своєчасне діагностування дефектів та прогнозування ресурсу трубопроводу з урахуванням одночасного протікання зазначених процесів є вкрай важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідженню залишкового ресурсу пошкоджених магістральних трубопроводів приділено багато уваги вітчизняними та закордонними вченими. Існуючі дослідження можна умовно поділити на ті, які зосереджені на оцінці залишкової міцності конструкції з дефектом та ті, в яких проведена оцінка накопичення втомних пошкоджень в елементах магістральних трубопроводів. У той же час дослідження накопичення втоми проводяться або експериментально, в даних

дослідженнях вивчається поведінка матеріалу з якого вироблено трубопровід на основі досліджень напружено-деформованого стану одновісного зразка [1-3] або циліндричної оболонки [4,5] та ті, в яких використовуються повні скінчено-елементні моделі для визначання НДС та на основі цих результатів проводиться оцінка накопичення втомних пошкоджень [4,6].

Наприклад, у роботі [7] досліджено процес накопичення втомних пошкоджень у коліні трубопроводу зі стоншеною стінкою, при чому розглядається конструкція без дії внутрішнього навантаження. Також варто відмітити, роботу, в якій досліджується трубопровід з дефектом типу «вм'ятина». В даних роботах проводяться експериментальні та чисельні дослідження.

Необхідно виділити дослідження [1] в якому проводилась оцінка накопичення малоциклової втоми в трубопроводі з одиночним корозійним дефектом. В даній роботі корозійний дефект задавався з постійними розмірами, та не враховувався його розвиток у часі. Оцінка накопичення втомних пошкоджень проводилась з використанням моделі Менсона-Кофіна.

В цілому можна зробити висновок, що розвиток втомних процесів у матеріалі трубопроводу значно впливає на його залишковий ресурс, як і корозійні пошкодження. Тому оцінювати надійність трубопроводу необхідно враховуючи ці обидва процеси.

Метою даної роботи є дослідження впливу об'ємного дефекту корозійної природи, що знаходиться на поверхні криволінійної ділянки трубопроводу, який для різного рівня розвитку заданий статистично та його вплив на залишковий ресурс при відмовах, що викликані багато- та малоцикловою втомою.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- створення параметричної моделі коліна трубопроводу з корозійним дефектом з різними розмірами;
- проведення типових розрахунків для визначення НДС конструкції з дефектом з різними розмірами, які генеруються випадково в залежності від терміну експлуатації;
- з використанням отриманих даних НДС визначити закономірність накопичення параметру пошкоджуваності для трубопроводу з дефектом при експлуатаційному навантаженні;
- визначити ймовірність безвідмовної роботи коліна трубопроводу з дефектом.

Рішення даних задач можна розділити наступним чином:

1. На першому етапі створюється параметрична модель коліна трубопроводу з об'ємним дефектом, що дозволяє автоматично здійснити аналіз деформованого стану конструкції з дефектами різного розміру. Розміри дефекту (глибина, довжина і вага) моделюються з урахуванням відомих статистичних даних можливого розміру пошкодження для такого віку та середовища.

2. На другому етапі, на основі розробленої моделі, було проведено серію розрахунків для різних рівнів навантаження. Для цього було здійснено статичне моделювання трубопроводу з відповідними розмірами дефекту та навантаженням, що змінюється лінійно.

3. Крок 2 повторюється принаймні 150 разів з утворенням різних розмірів дефектів, які ймовірно можуть з'явитися при експлуатації трубопроводу відповідно до аналізованого віку.

4. На наступному етапі збільшується вік дефекту та створюються нові набори трубопроводу з дефектами різного розміру та аналізується їх деформований стан.

5. Дані, які накопичені на етапах 2-4 дають нам статистику концентрації напружень у трубопроводі з корозійним дефектом, що має певний відомий вік зростання.

6. Далі, з використанням оброблених статистичних даних та розробленої математичної моделі для оцінки накопичення втомних пошкоджень проводиться розрахунок параметру пошкодженості для трубопроводу з дефектом різного рівня розвитку та при різних рівнях внутрішнього навантаження.

7. На основі результатів етапу 6 проводиться оцінка надійності трубопроводу з дефектом при різних рівнях внутрішнього навантаження та може бути отримана ймовірність безвідмовної роботи.

Побудова розрахункової моделі. Моделювання трубопроводу

В роботі моделюється фрагмент коліна трубопроводу з урахуванням його криволінійної геометрії, нелінійними властивостями матеріалу та навантаженням, які відповідають стандарту ASME B31G. Модель складається з тороїдальної і циліндричної частин. Для розрахунку було обрано наступні значення розмірів конструкції: зовнішній радіус трубопроводу $D = 508$ мм; товщина стінки $h = 12,5$ мм; довжина досліджуваної частини трубопроводу $l = 1,5$ м (відповідно до X42 типу трубопроводу). Довжину прямої частини секції труби вибирали апостеріорно після

низки попередніх випробувань, коли крайові ефекти в моделі не впливають на деформований стан в досліджуваному перерізі труби. Матеріалом є сталь.

Ділянку трубопроводу навантажено внутрішнім тиском P і зафіксовано по краях. Для такого типу трубопроводів номінальний (робочий) тиск дорівнює 3 МПа. Також треба зазначити, що при експлуатації з певною частотою буває включення та виключення подачі речовини у трубопровід. При цьому значення внутрішнього тиску може бути більше робочого. Рівень максимального навантаження залежить від області розташування трубопроводу та відповідно до ASME B31.8 (2003) може змінюватися від 6 МПа до 12,8 МПа.

Для визначення НДС криволінійної частини трубопроводу використовували МСЕ. При розрахунках було використано чверть моделі, в якій враховано симетрію трубопроводу.

При створенні сітки враховували особливості моделі. Розмір елемента поступово зменшується при наближенні до зони з пошкодженням. Задано чотири елементи за товщиною. На непошкоджених ділянках трубопроводу будували впорядковану гексагональну сітку, у зоні дефекту – тетрадральну. Використовували ізо-параметричний скінчений елемент з 8-ма вузлами та зі 3-ма ступенями вільності у вузлі. Сітку усієї моделі та детально поверхневий дефект зображено на рис.1.

Об'ємний поверхневий дефект моделюється в центрі зовнішньої поверхні ділянки коліна трубопроводу (рис.1). Для дослідження було обрано дефект у формі паралелепіпеду із закругленими границями. Оскільки дефект розташований на поверхні вигину труби, ескіз був спроектований в локальній тороїдальній системі координат, яка залежить від радіусу коліна трубопроводу R . Геометричні параметри, такі як довжина (d_1), ширина (d_2) та глибина ($d_3=h-d$), задано параметрично. Це дозволяє автоматично перебудовувати модель в залежності від розмірів.

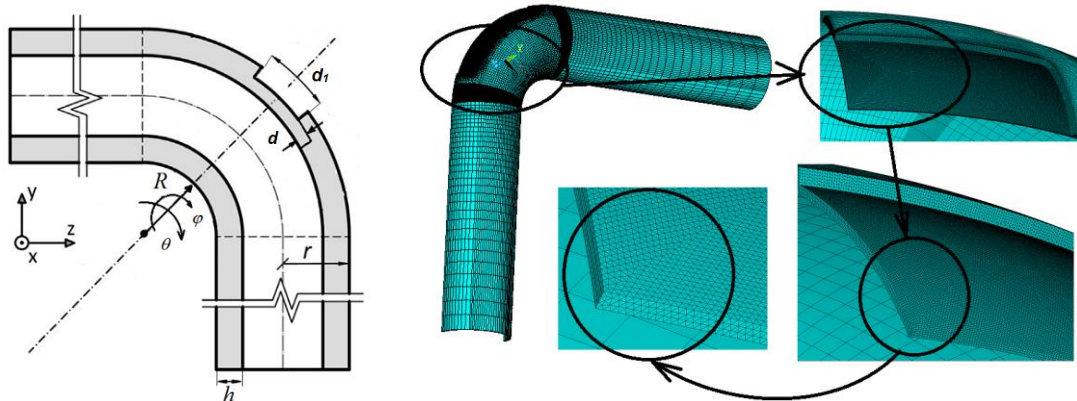


Рис. 1. Ескіз та побудована СЕ розрахункова модель

Конкретні розміри дефекту визначаються з аналізу поточного стану його розвитку. Тому в роботі пропонується отримувати розрахункові моделі з дефектом певного рівня розвитку та вивчати залишкову міцність трубопроводу у певний час його експлуатації. З аналізу відомих досліджень можна підсумувати, що зазвичай при оцінці росту дефектів використовують лінійні [8] або нелінійні [8-9] моделі для кінетики росту корозії.

В даній роботі пропонується враховувати ріст дефекту у часі у вигляді степеневої функції, яка пов'язує час експлуатації та характерний розмір $d_j(t)$ [9]

$$d_j(t) = k(t - t_0)^\alpha, \quad (1)$$

де t_0 – час появи корозійного пошкодження, α та k – це показники кінетики росту пошкоджуваності. З літературних даних та практики експлуатації трубопроводів відомо, що типово за 5 років на поверхні трубопроводу виникають пошкодження корозійного типу. Тому при розрахунках було обрано $t_0 = 5$ років. Процес розвитку корозії є випадковим, що може бути враховано, якщо показники рівняння кінетики її росту (1): α та k вважати випадковими величинами. Такий підхід широко використовується в літературі. При цьому відомо багато статистичних даних щодо можливих значень параметрів α та k і їх можливої варіації, зокрема і в залежності від зовнішніх чинників, а також різних напрямків росту корозійного пошкодження (тобто у глибину та по поверхні у ширину і довжину).

Параметр k здатен суттєво змінюватись, навіть за більш-менш однакових зовнішніх факторах. Параметр α в деяких дослідженнях вважається сталою детермінованою величиною, але є робота, що аналізує його зі статистичної точки зору. Проте його можлива варіація є не суттєвою, тому в даній роботі пропонується вважати параметр α фіксованим та таким, що дорівнює 0,73 .

Із статистичних даних відомо, також що розподіл значень розмірів дефекту із достатньою точністю можна вважати підпорядкованим підпорядковується логнормальному закону розподілення

$$f(d_j, t) = \frac{1}{d_j \sigma_j(t) \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d_j - \mu_j(t))^2}{2\sigma_j^2(t)}\right], \quad (2)$$

де $\sigma_j(t)$ та $\mu_j(t)$ – це параметри закону, які залежать відповідно до розміру дефекту у поточний час експлуатації та визначаються через співвідношення (1) з коефіцієнту варіації та математичного очікування габаритних розмірів дефекту наступим чином:

$$\mu_j(t) = \ln\left[\frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{\nu_j}{m_j^2(t)}}}\right], \quad \sigma_j^2(t) = \ln\left(1 + \frac{\nu_j}{m_j^2(t)}\right), \quad (3)$$

$$m_j(t) = \langle d_j(t) \rangle = \langle k_j \rangle (t - t_0)^\alpha, \quad \sigma_{d_j}^2(t) = \langle d_j(t)^2 \rangle - \sigma_{k_j}^2 (t - t_0)^{2\alpha}, \quad \nu_j = \frac{\sigma_{d_j}(t)}{m_j(t)} = \frac{\sigma_{k_j}}{k_j} = const, \quad (4)$$

де $\langle \dots \rangle$ – оператор усереднення, $m_j(t)$ – математичне очікування, ν_j – коефіцієнт варіації, який залежить від часу. На рисунку 2 на схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження $m_3(t)$ та можливий розкид її значень у часі.

Таблиця 3

Ймовірнісні характеристики габаритних розмірів дефекту

Параметр	Коефіцієнт варіації	Середнє квадратичне відхилення, мм
Довжина	5,2	20
Ширина	2,9	11
Глибина	0,075	0,5

Оцінка накопичення втомних пошкоджень.

В даній роботі пошкоджуваність визначається через співвідношення площі репрезентативного об'єму з мікротріщинами δS_D та не пошкодженого матеріалу δS , а рамках концепції ефективних напружень Работнова-Качанова:

$$D = \frac{\delta S_D}{\delta S} = \frac{\delta S - \delta \tilde{S}}{\delta S}, \quad \tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma_{eq}}{1 - D}, \quad (5)$$

Процес накопичення пошкоджуваності в залежності від того, спостерігається поява пластичних деформації у конструкції або ні, формується через механізм малоциклової або багатоциклової втоми. У загальному випадку для оцінки накопичення пошкоджуваності застосовується закон кінетики росту пошкоджуваності:

$$\dot{D} = \dot{\lambda} \frac{\partial F_D}{\partial Y}, \quad \dot{p} = \frac{\dot{\lambda}}{1 - D}, \quad (6)$$

де $\dot{\lambda}$ це множник пластичності, через який визначається швидкість накопичених пластичних деформації, F_D функція потенціалу дисипації пошкоджуваності, а Y – швидкість щільності виділення енергії. З попередніх досліджень та експериментів визначено, що F_D нелінійно залежить від Y у ступеневому вигляді:

$$F_D = \frac{S}{(s+1)(1-D)} \left(\frac{Y}{S}\right)^{s+1}. \quad (7)$$

З чого

$$\dot{D} = \left(\frac{Y}{S}\right)^s \dot{p}, \quad (8)$$

де S та s визначенні вище параметри матеріалу.

Енергія Y в загальному випадку для ізотропної пошкоджуваності залежить від пружних деформації або у термінах напружень:

$$Y = \frac{1}{2} E \varepsilon_e^2(t) \quad Y = \frac{\sigma^2(t)}{2E(1-D)^2} \quad (9)$$

При малоцикловій втоми головним чинником розвитку втоми є пластичні деформації, тому кінетика накопичення пошкоджуваності буде визначатися таким чином

$$\frac{dD}{dt} = \left(\frac{\sigma_{eq}^2 R_v}{2ES(1-D)^2}\right)^s \frac{dp}{dt}, p \geq p_D \quad (10)$$

де p_D – це порог пластичних деформацій при яких починає розвиватись пошкоджуваність в матеріалі. Для циклічного навантаження даний параметр має такий вигляд:

$$p_D = \varepsilon_{pD} \left(\frac{\sigma_u - \sigma_y}{\frac{\sigma_{eq \max} - \sigma_{eq \min}}{2} - \sigma_y} \right)^m \quad (11)$$

Якщо навантаження пропорційне та періодичне, то кількість циклів до відмови підраховується після дворазового інтегрування (10).

Вважаючи, що циклічні деформації стабілізовані, то при інтегруванні (10) по одному циклу для визначення варіації пошкоджуваності за один цикл:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{1}{(1-D)^{2s}} \int_{\text{cycle}} \left(\frac{\sigma_{eq}^2 R_v}{2ES}\right)^s dp \quad (12)$$

де R_v теж постійна відповідно до навантаження. Та має такий вигляд:

$$R_v = \frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right)^2 \quad (13)$$

Позначимо інтеграл (12) як δ_D , отже варіація пошкоджуваності буде визначатися:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{\delta_D}{(1-D)^{2s}} \quad (14)$$

$$N_R = N_D + \frac{1}{\delta_D(2s+1)} \left[(1-D)^{2s+1} - 1 \right] \quad (15)$$

де N_D – це кількість циклів до появи пошкоджуваності в матеріалі. Також з виразу (14) можна виразити пошкоджуваність, якщо границю інтегрування у правій частині змінити на поточне значення циклу n . Таким чином пошкоджуваність буде дорівнювати:

$$D = 1 - \left[1 - (n + N_D) \delta_D (2s + 1) \right]^{1/2s+1} \quad (16)$$

У випадку ж багатоциклової втоми, визначення кінетики накопичення втомних пошкоджень буде мати наступний вигляд:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\omega_e}{\sigma_{-1}^m N_0 (c+1)} \left(\frac{\sigma_{eq}}{1-D}\right)^c \quad (17)$$

де σ_{-1} – це границя витривалості, N_0 , c – параметри кривої Веллера, ω_e – ефективна частота, c – константа кінетичного рівняння, які визначаються експериментально та можуть бути виражені через характеристики кривої Веллера [11]. Визначимо варіацію пошкоджуваності за один цикл:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \int_{1 \text{ cycle}} \frac{\omega_e}{\sigma_{-1}^m N_0 (c+1)} \left(\frac{\sigma_{eq}}{1-D} \right)^c dt \quad (18)$$

Оскільки пошкоджуваність за один цикл є постійною її можна винести за знак інтегралу. Позначивши інтеграл у виразі (18) як δ_M , варіацію пошкоджуваності визначимо у формі аналогічній (14) як:

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{\delta_M}{(1-D)^m} \quad (19)$$

Таким чином, пошкоджуваність для випадку багаточислової втоми має вид:

$$D = 1 - [1 - (n + N_D)\delta_M (m+1)]^{1/(m+1)} \quad (20)$$

Узагальнюючи отримані результати, пошкоджуваність для конструкції буде визначатися в залежності від наявності пластичних деформацій таким чином:

$$D = \begin{cases} 1 - [1 - (n + N_D)\delta_D (2s+1)]^{1/(2s+1)}, & dp > 0 \\ 1 - [1 - (n + N_D)\delta_M (m+1)]^{1/(m+1)}, & dp = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Статистична оцінка НДС та надійності конструкції з корозійним дефектом

На основі розробленої СЕ моделі (рис. 1) було проведено серію розрахункових досліджень коліна трубопроводу з середніми розмірами дефекту відповідно до геометричних параметрів, що відповідали різному часу життя дефекту (період від 10 до 45 років). Виявлено, що у період після 35 років експлуатації у трубопроводі можуть з'являтися пластичні деформації при типовому навантаженні. В період експлуатації від 37 років у трубопроводі з відповідним дефектом при дії максимально можливого навантаження виникають напруження, які привішують границю міцності.

Тому подальші дослідження пошкодженого трубопроводу проводилось для періоду експлуатації з 35 до 45 років. Для кожного моменту часу (від 35 до 45 років) було проведено біля 200 розрахунків з випадковими розмірами дефекту, які підпорядковуються логнормальному закону розподілення та мають відповідні відомі ймовірнісні характеристики (3-4). Після проведених розрахунків отримані ймовірнісні характеристики НДС конструкції при різних рівнях навантаження та у різний термін експлуатації. Отримані дані по еквівалентним напруженням за критерієм Мізеса, які було статистично оброблено. Сформовані гістограми (рис. 2) для різних рівнів навантаження та визначені середні значення, дисперсії та коефіцієнти асиметрії гістограм.

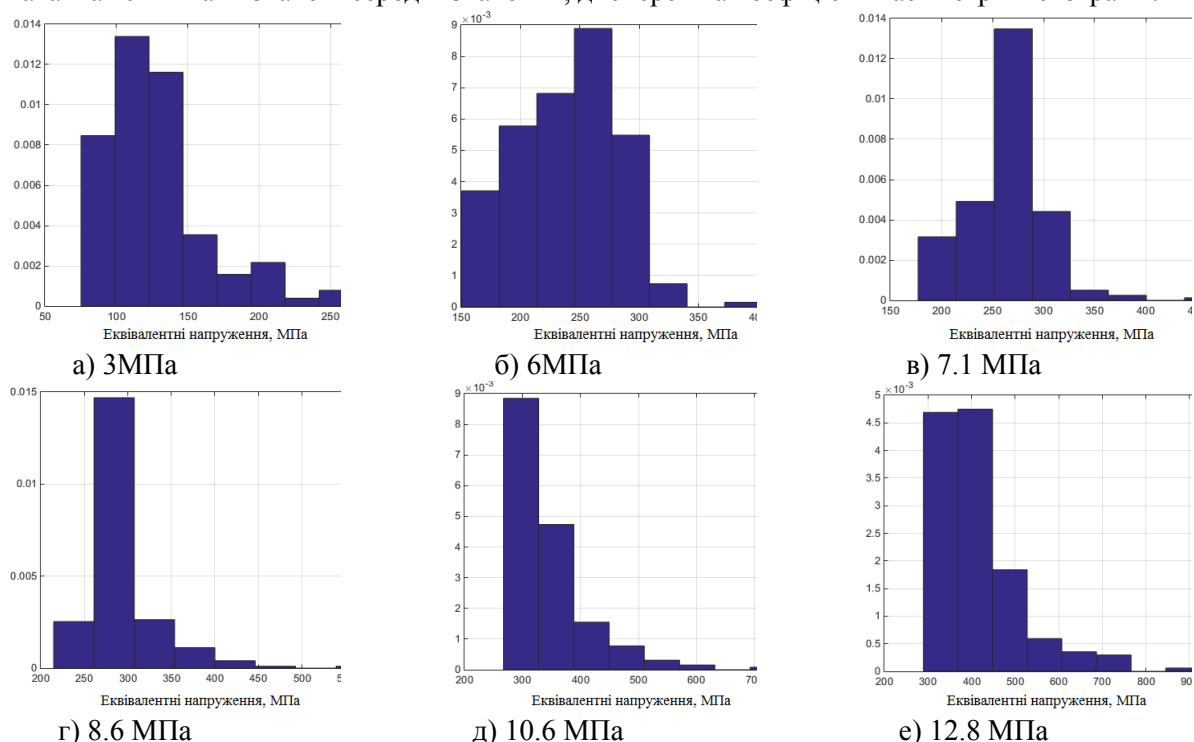


Рис.2. Гістограми розподілу максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням при терміні експлуатації 45 років при різних рівнях навантаження

Підставляючи дані імітаційного моделювання по можливим еквівалентним максимальним напруженням в інтеграли (12) та (18) було розраховано можливі реалізації параметру пошкоджуваності через вираз (21), статистичний аналіз яких дозволив визначити ймовірність досягнення параметром пошкоджуваності одиниці (критичного значення) в залежності від кількості циклів пульсації тиску в експлуатації коліна трубопроводу при корозійних дефектах різних рівнів свого розвитку (різного часу від початку зародження цього дефекту).

Таким чином, отримано чисельні статистичні оцінки ймовірності безвідмовної роботи коліна трубопроводу в залежності від величини пульсації тиску при режимах пуску та зупинки експлуатації. Розглянуто такі рівні навантаження: типове, що дорівнює 6 МПа (рис.2 а) та максимально можливе – 12,8 МПа (рис.2 б).

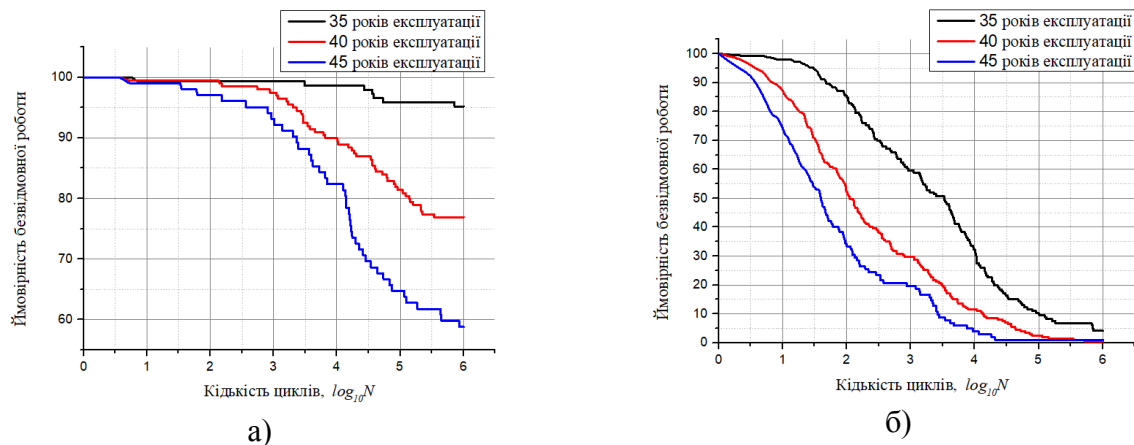


Рис.3 Ймовірність безвідмовної роботи при пульсації тиску в трубопроводі (вкл/викл) для типового а) та максимально можливого б) навантаження

З отриманих результатів видно, що при навантаженні 6 МПа (рис. 3а), ймовірність безвідмовної роботи після 500 циклів дорівнює 96 %. При максимально можливих рівнях навантаження відповідно від зони розміщення трубопроводу ймовірність безвідмовної роботи менше 100% починаючи з 100 циклів роботи. З даних результатів можна зробити висновок, що експлуатація трубопроводу з дефектом з відповідними розмірами може бути небезпечною.

Вдячність

Дана робота виконана за підтримки МОН України в рамках реалізації Науково-Дослідної Роботи «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (№ ДР 0117U004969).

Висновки

В роботі проведено серію розрахунків криволінійної частини трубопроводу з пошкодженням, що стохастично розвивається при різних термінах експлуатації. На основі отриманих результатів було визначено статистичні характеристики НДС в залежності від внутрішнього тиску та часу який перебуває в експлуатації трубопровід. На основі отриманих даних та розробленої математичної моделі для оцінки накопичення втомних пошкоджень визначено параметр пошкоджуваності для трубопроводу з дефектом. З використання отриманих значень ймовірність безвідмовної роботи коліна трубопроводу в залежності від величини пульсації тиску при режимах пуску та зупинки експлуатації. Визначено, що при експлуатації коліна трубопроводу з пошкодженням, яке розвинулось за час експлуатації від 35 до 45 років при максимально можливому навантаженні у всіх відповідних зонах існує ймовірність відмови.

Література

1. Cunha D.J.S. et al. Fatigue analysis of corroded pipelines subjected to pressure and temperature loadings // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 113. – P. 15–24.
2. Mansor N.I.I. et al. A review of the fatigue failure mechanism of metallic materials under a corroded environment // Eng. Fail. Anal. Elsevier Ltd. – 2014. – Vol. 42. – P. 353–365.
3. Jaoude A.A. et al. Lifetime analytic prognostic for petrochemical pipes subject to fatigue // IFAC

Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). IFAC. – 2012. – Vol. 8, № PART 1. – 707-713 p.

4. Poberezhnyi L. et al. Fatigue and failure of steel of offshore gas pipeline after the laying operation // Arch. Civ. Mech. Eng. Politechnika Wroclawska. – 2016. – Vol. 16, № 3. – P. 524–536.

5. Fatoba O., Akid R. Low cycle fatigue behaviour of API 5L X65 pipeline steel at room temperature // Procedia Eng. Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 74. – P. 279–286.

6. Papadopoulos G.A., Davidov Y.A., Vodenicharov S.B. Low-cycle fatigue loading of BDS 25G pipeline steel // Theor. Appl. Fract. Mech. – 1998. – Vol. 30, № 2. – P. 133–137.

7. Pinheiro B. de C., Pasqualino I.P. Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure // Int. J. Fatigue. Elsevier Ltd. – 2009. – Vol. 31, № 5. – P. 962–973.

8. Takahashi K. et al. Experimental study of low-cycle fatigue of pipe elbows with local wall thinning and life estimation using finite element analysis // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd. – 2010. – Vol. 87, № 5. – P. 211–219.

9. Takahashi K. et al. Low cycle fatigue behaviors of elbow pipe with local wall thinning // Nucl. Eng. Des. – 2009. – Vol. 239, № 12. – P. 2719–2727.

10. Lemaitre J. A course on damage mechanics / J. Lemaitre. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. – 1996.

11. Larin O. A probability approach to the estimation of the process of accumulation of the high-cycle fatigue damage considering the natural aging of a material / O. Larin, O. Vodka // International Journal of Damage Mechanics, 2015. – Vol. 24(2). – Pp. 294–310.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК: 621.22.011

А.В. Ратушный

Сумський Государственный Университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАПИЛЛЯРНОГО НАСОСА

В статье рассматриваются методологические основы определения оптимальных параметров конструкции капиллярного насоса. Такая конструкция должна обеспечить максимальные значения интегральных характеристик насоса – напора и КПД. Её выявление предлагается выполнить методом планирования эксперимента и нахождения соответствующего сочетания геометрических параметров капиллярного насоса.

Ключевые слова: капиллярный насос, оптимальные параметры, методика определения

О.В. Ратушний**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КАПІЛЯРНОГО НАСОСА**

У статті розглядаються методологічні основи визначення оптимальних параметрів конструкцій капілярного насоса. Така конструкція повинна забезпечити максимальні значення інтегральних характеристик насоса - напору і ККД. Її виявлення пропонується здійснити шляхом планування експерименту і знаходження відповідного поєднання геометричних параметрів капілярного насоса.

Ключові слова: капілярний насос, оптимальні параметри, методика визначення

A. Ratushnyi**METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL PARAMETERS OF A CAPILLARY PUMP**

The article discusses the methodological basis for determining the optimal design parameters of a capillary pump. Such a design should provide maximum values of the integral characteristics of the pump - head and efficiency. It is proposed to identify it by planning the experiment and finding the appropriate combination of the geometric parameters of a capillary pump.

Keywords: capillary pump, optimal parameters, method of determination

Вступление. При разработке насосного оборудования, в том числе и работающего на принципиально новых физических принципах [1], в отличии от традиционных [2], необходимо знать, как влияют отдельные геометрические параметры рабочего органа на интегральные характеристики и правильно определять оптимальные соотношения между этими параметрами с целью обеспечения максимальной экономичности и эффективности насоса. Рабочий орган капиллярного насоса может представляться как пучок капилляров, сгруппированный тем или иным способом (рис. 1).

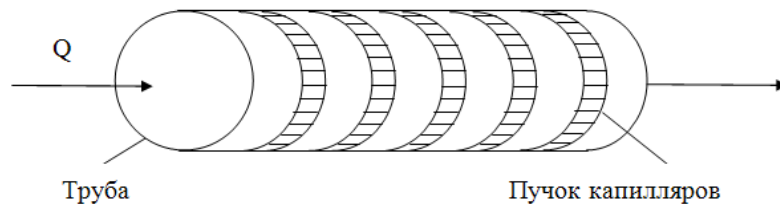


Рис. 1. Конструкция капиллярного насоса

Постановка проблемы. Исходя из приведённого в [3] анализа особенностей функционирования капиллярного насоса, можно утверждать, что достижение им максимальной напорности и КПД определяется в основном геометрией рабочего органа – то есть диска с пучком капилляров (рис 1). Так как процессы, происходящие в любом насосе, являются многофакторными, то для выявления оптимального соотношения геометрических параметров рабочего органа необходимо создать модель, характеризующую зависимость напора и КПД одновременно от нескольких основных влияющих факторов процесса. Исходя из опыта и рекомендаций решения подобных задач [4,5], было решено воспользоваться методикой планирования эксперимента [6-8].

Цели и задачи исследования. Цель исследования можно сформулировать следующим образом: разработать методику определения оптимальных параметров капиллярного насоса для обеспечения максимальных значений его интегральных характеристик.

Задача исследования: выбрать параметры оптимизации, основные факторы и уровни их варьирования, составить матрицу планирования, получить уравнение регрессии, получить в общем виде оптимальное соотношение факторов.

Методология исследования. В качестве методологии данного исследования использовались методики решения многокритериальных задач оптимизации.

Изложение основного материала. На данном этапе была поставлена задача получить математические модели зависимости напора и КПД от геометрических параметров рабочего органа капиллярного насоса – задача одновременного рассмотрения нескольких параметров оптимизации. Исследование сводилось к решению компромиссной задачи нахождения условного экстремума для одной поверхности отклика при ограничениях, накладываемых другой. Для этого использовался метод неопределённых множителей Лагранжа. Данный метод относительно несложен, хорошо зарекомендовал себя при планировании эксперимента и позволяет получить количественную оценку влияния отдельных параметров рабочего органа на параметры оптимизации, установить оптимальное соотношение его геометрических параметров, обеспечивающих максимальное повышение напора при варьируемых в приемлемом диапазоне значениях КПД.

В качестве параметров оптимизации были приняты напор (y_h) и КПД (y_n) рабочего органа. Исходя из ранее проведённых исследований, в качестве основных факторов, влияющих на параметры оптимизации, были приняты:

x_1 – толщина единичного диска с пучком капилляров l , мм;

x_2 – диаметр единичного капилляра d , мм

x_3 – диаметр капиллярного диска D , мм;

x_4 – расстояние между соседними капиллярными дисками s , мм.

Основные уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Факторы	Кодовые обознач.	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			верхний +1	основной 0	нижний -1
l , мм	x_1	3	13	8	5
d , мм	x_2	0,2	0,6	0,4	0,2
D , мм	x_3	10	35	25	15
s , мм	x_4	3	13	8	5

Таблица 2

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	1
3	1	1	-1	1	1
4	1	-1	-1	1	1
5	1	1	1	-1	1
6	1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	-1	1
8	1	-1	-1	-1	1
9	1	1	1	1	-1
10	1	-1	1	1	-1
11	1	1	-1	1	-1
12	1	-1	-1	1	-1
13	1	1	1	-1	-1
14	1	-1	1	-1	-1
15	1	1	-1	-1	-1
16	1	-1	-1	-1	-1

В качестве плана эксперимента был принят полный факторный эксперимент, позволяющий получить оценки влияния каждого фактора на параметры оптимизации. Факторный эксперимент осуществляем с помощью матрицы планирования (табл. 2), одинаковой для всех схем, в которой использовались кодированные значения факторов [8**Помилка! Закладку не визначено.**]. Параметры оптимизации предлагается вычислять в каждом опыте при одинаковом количестве капилляров, принятом равным 10.

Для оптимизационного анализа использовали линейную модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (1)$$

где b_i – значение коэффициентов уравнения регрессии.

Они определяются следующим образом:

$$b_i = \sum_1^N \frac{x_{ij}y_j}{N}, \quad (2)$$

где x_{ij} – кодированное значение i -го фактора в j -м опыте;

y_j – значение параметра оптимизации в j -м опыте;

N – число опытов в матрице планирования.

Дисперсию параметра оптимизации вычисляем по результатам трёх опытов в центре плана, то есть при $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0$.

Дисперсия параметра оптимизации

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{u=s} (y_u - \bar{y})^2}{n_o - 1}, \quad (3)$$

где n_o – число опытов в центре плана;

y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте в центре плана.

Дисперсия коэффициентов регрессии

$$s^2\{b_i\} = \frac{s_y}{N}, \quad (4)$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b_i = t \cdot s^2\{b_i\}, \quad (5)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента. Согласно [8**Помилка! Закладку не визначено.**] принимаем $t = 2,2$.

Далее необходимо определить величины коэффициентов регрессии, которые больше соответствующих доверительных интервалов. Они будут являться статистически значимыми.

Проверку адекватности моделей производится по F -критерию Фишера [8].

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, \quad (6)$$

Дисперсия адекватности

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{f}, \quad (7)$$

где y_j – экспериментальное значение параметра оптимизации в j -м опыте;

\hat{y}_j – значение параметра оптимизации;

f – число степеней свободы, $f = N - (k + 1)$, k – число факторов, равное 4.

Табличное значение F_m согласно [8] принимаем 19,4 для всех схем и параметров оптимизации. Адекватность моделей оценивалась, исходя из сравнения F_m и F_p . Модель следует признать адекватной, если выполняется условие $F_m > F_p$ или же $F_m - F_p > 0$.

Уравнения, получаемые из (1), с соответствующими числовыми значениями b_i , связывающие параметры оптимизации с основными факторами, являются также функцией отклика. Для нахождения оптимальных значений параметров оптимизации необходимо решить компромиссную задачу методом неопределённых множителей Лагранжа. Необходимо найти режимы, обеспечивающие максимальный напор рабочего органа при задаваемых значениях КПД капилляра. Отметим, что определение диапазона возможных значений КПД капилляра является предметом отдельного исследования и в данной статье не рассматривается. Каждому из этих значений будут отвечать значения максимального напора. Режимы, обеспечивающие выполнение данного требования и будут являться оптимальными. Они могут быть установлены нахождением условного максимума функции y_h при ограничениях, налагаемых функцией y_h .

Для решения этой задачи составляем вспомогательная функция $F(x_1, x_2, x_3, x_4, \lambda)$, которая может быть представлена в виде

$$F = f(x_1, x_2, x_3, x_4) + \lambda[\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) - y_h], \quad (8)$$

где $f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_{0h} + b_{1h}x_1 + b_{2h}x_2 + b_{3h}x_3 + b_{4h}x_4$;

$\varphi(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_{0\eta} + b_{1\eta}x_1 + b_{2\eta}x_2 + b_{3\eta}x_3 + b_{4\eta}x_4$.

Дифференцируя $F(x_1, x_2, x_3, x_4, \lambda)$ по $x_1, x_2, x_3, x_4, \lambda$ соответственно и приравнявая к нулю частные производные, получим систему уравнений. Решая эту систему при заданном значении y_h , находим точки условных экстремумов. Однако при решении полученной системы найденные значения x_1, x_2, x_3, x_4 могут выходить за область эксперимента, поэтому исследуемое факторное пространство необходимо ограничить поверхностью

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = \rho^2 \quad (6)$$

и находить условные экстремумы, варьируя ρ . При этом данный параметр увеличиваем до тех пор, пока корни системы находятся в области эксперимента или незначительно выходят из неё.

Максимальное значение ρ можно найти, используя зависимость кодированных значений факторов x_1 - x_4 и натуральных:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_i^o}{\varepsilon_i}, \quad (10)$$

где x_i – натуральное значение i -го фактора;

\bar{x}_i^o – натуральное значение основного уровня i -го фактора;

ε_i – интервал варьирования i -го фактора.

Придавая x_i предельные значения и используя зависимость (9) можно определить область допустимых значений ρ , при которой значения факторов оставались в области эксперимента. Вспомогательная функция в данном случае имеет вид:

$$F = b_{0h} + b_{1h}x_1 + b_{2h}x_2 + b_{3h}x_3 + b_{4h}x_4 + \lambda_1(b_{0\eta} + b_{1\eta}x_1 + b_{2\eta}x_2 + b_{3\eta}x_3 + b_{4\eta}x_4 - y_h) + \lambda_2(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - \rho^2)$$

Дифференцируя её по всем аргументам и приравнявая нулю частные производные, получим следующую систему уравнений, которую при принятых значениях y_h и ρ можно решить с использованием соответствующих программных продуктов, например Mathcad.

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{1h} + b_{1\eta} \lambda_1 + 2x_1 \lambda_2 = 0 \\ b_{2h} + b_{2\eta} \lambda_1 + 2x_2 \lambda_2 = 0 \\ b_{3h} + b_{3\eta} \lambda_1 + 2x_3 \lambda_2 = 0 \\ b_{4h} + b_{4\eta} \lambda_1 + 2x_4 \lambda_2 = 0 \\ b_{0\eta} + b_{1\eta} x_1 + b_{3\eta} x_3 + b_{4\eta} x_4 - y_\eta = 0 \\ x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 - \rho^2 = 0 \end{array} \right.$$

Выводы. Сформулированная методика поиска оптимальной конструкции капиллярного насоса для обеспечения его максимального напора и КПД позволяет изготовить необходимое количество исследуемых моделей методом 3d-печати с наперед известными геометрическими параметрами. Далее планируется проведение натурных испытаний соответствующих образцов. По их результатам путём расчёта по представленной методике и будет получено оптимальное сочетание параметров насоса.

Список использованных источников:

1. Ратушный, А. В. Путь к новой парадигме развития: особенности перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу / А. В. Ратушный, А. А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки») — 2017. № 60 — С. 199-205.
2. Михайлов, А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 288 с.
3. Ратушный, А.В. Концепция капиллярного насоса [Текст] / А.В. Ратушный, Д.Р. Васильченко, А.А. Дрофа // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки»). — 2018. — Вип. 63 — С. 189-195.
4. Мандрыка А.С. Оптимизация реверсивных насосных решеток с применением планирования эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст]/ А.С. Мандрыка. // Энергетическое машиностроение. – 1972. – № 16. – с. 112-118.
5. Герман В.Ф. Создание и исследование сточно-массных свободновихревых насосов повышенной экономичности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.04.13/ В. Ф. Герман. – М., 1985. – 15 с.
6. Львовский Е.Н. Статические методы построения эмпирических формул [Текст] / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.
7. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
8. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст] / А.А. Спиридонов. – М.: Наука, 1981. – 279 с.

Рецензент:

Ковалёв И.А. к.т.н, профессор, заведующий кафедрой Прикладной гидроаэромеханики СумГУ

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК 667.64:678.026

О.І. Редько, Р.Г. Редько

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ І ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З ПІДВИЩЕНИМИ АНТИКОРОЗІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ І ЗНОСОСТІЙКІСТЮ

У роботі запропоновано склад і технологію формування захисних покриттів з підвищеними антикорозійними характеристиками і зносостійкістю. Показано, що для отримання покриттів з полішеними властивостями у пластифікований епоксидний зв'язувач необхідно вводити двокомпонентний полідисперсний дисперсний наповнювач. Висока ефективність застосування нових покриттів підтверджена випробуваннями у виробничих умовах при захисті від корозії і зношування устаткування нафтопереробної і газотранспортної промисловості.

Ключові слова: полідисперсний двокомпонентний наповнювач, діелектричні властивості, питомий електроопір, епоксидні композитні покриття.

Табл. 1 Літ. 4.

О.И. Редько, Р.Г. Редько

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННЫМИ АНТИКОРОЗИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬЮ

В работе предложен состав и технологию формирования защитных покрытий с повышенными антикоррозионными характеристиками и износостойкостью. Показано, что для получения покрытий с улучшенными свойствами в пластифицированную эпоксидную матрицу необходимо вводить двухкомпонентный полидисперсный наполнитель. Высокая эффективность применения новых покрытий подтверждена испытаниями в производственных условиях при защите от коррозии и износа оборудования нефтеперерабатывающей и газотранспортной промышленности.

Ключевые слова: полидисперсный двухкомпонентный наполнитель, диэлектрические свойства, удельное электросопротивление, эпоксидные композитные покрытия.

O.I. Redko, R.G. Redko

RESEARCH COMPOSITION AND FORMING TECHNOLOGY OF SHEETING WITH ENHANCED EXPLOITATION CHARACTERISTICS

Composition and forming technology of sheeting with enhanced exploitation characteristics are offered in the article. It is shown that for the receipt of coverage's with improved properties it is necessary to enter modified dispersion filler in the epoxy matrix. High efficiency of application of new coverage's is confirmed tests in production terms at the corrosion protection of oil and gas-transport industry equipment.

Keywords: polydisperse two-component filler, dielectric properties, the electrical resistivity, epoxy composite coating.

Вступ. Композитні матеріали (КМ) на основі полімерів забезпечують необхідний комплекс фізико-механічних властивостей, корозійну тривкість і зносостійкість, а також високу ремонтоздатність за рахунок неодноразового відновлення поверхонь деталей композитами, що використовують, як покриття. У цьому напрямку цікавим є використання матеріалів на основі епоксидних смол, які, крім вказаних властивостей, мають значну адгезію до металевих поверхонь, технологічність при формуванні у вигляді покриттів на деталі зі складним профілем, розвинуту сировинну базу [1]. Для поліпшення технологічних властивостей покриттів у епоксидні олігомери вводять пластифікатори.

Крім того, формування зв'язувачів, які містять пластифікатори, забезпечує краще змочування наповнювача, підвищує рухливість макромолекул, що зумовлює високий ступінь зшивання, у тому числі, і у зовнішніх поверхневих шарах матриці навколо дисперсних часток [2]. Відомі матеріали, що використовують у вигляді полімерних матриць для захисних покриттів, мають недоліки. Це зокрема, значна тривалість технологічного процесу полімеризації і багатоступеневий режим термічного оброблення, високі показники залишкових напружень, що погіршує фізико-механічні властивості КМ під час їх експлуатації.

Мета дослідження – встановити оптимальний склад інгредієнтів і розробити технологічні режими формування епоксикомпозитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Об'єкти та методи дослідження. 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 карбиду кремнію. Як дрібнодисперсні наповнювачі використовували частки вспученого вермикуліта (ВВ), газової сажі (ГС) і оксиду хрому зеленого (ГОСТ 2912-79).

Зольні мікросфери є мінеральними відходами, що містяться у золі при спалюванні вугілля на електростанціях. Перевагою їх використання є низька густина, невеликі розміри, сферична форма, висока температура плавлення. Хімічний склад ЗМ, %: SiO_2 – 55,0...59,0, Al_2O_3 – 27,0...31,0, Fe_2O_3 – 4,6...5,5, K_2O – 3,2...3,7, CaO – 1,1...1,8, MgO – 1,3...1,7, TiO_2 – 0,1...1,1, SO_2SO_3 – 0,05...1,00, Cl < 0,1.

Коричневий шлам як доступний і активний наповнювач вводили для здешевлення КМ та активації 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.

Спінений вермикуліт є пористим матеріалом у вигляді лускатих часток, який отримують відпалом вермикулітового кноцентрата – гідрослюди, що містить між елементарними шарами зв'язану воду. Хімічний склад вспученого вермикуліту, %: SiO_2 – 33...36, Fe_2O_3 – 5...17, FeO – 0,2, Al_2O_3 – 6...18, MgO – 14...25, CaO – 1,2...2,0, K_2O – 3...5, Mn – 0,06, Na_2O – 0,5, TiO_2 – 0,4, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ – 6,8...7,0.

Покриття 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.

Зміну питомого електроопору композитів при збільшенні температури визначали за допомогою моста змінного струму Е7-14 при частоті 1 кГц за стандартною методикою згідно з ГОСТ 6433.4-71. Зразки для дослідження формували за розмірами: діаметр – $D=30\pm 0,5$ мм., висота – $h=5\pm 0,05$ мм. Розкид значень за товщиною зразків не перевищував 8%.

Результати та їх обговорення. Поставлену задачу підвищення адгезійних, фізико-механічних властивостей і зменшення залишкових напружень у захисних покриттях, які експлуатуються в умовах значного градієнту температур і циклічних навантажень вирішують за рахунок використання епоксидного зв'язувача, який містить епоксидний діановий олігомер, пластифікатор і твердник з таким співвідношенням компонентів, мас.ч.: епоксидний діановий олігомер ЕД-20 – 100, пластифікатор дибутилфталат ДБФ – 8, твердник поліетиленполіамін – 8 [3].

Для зшивання епоксидного зв'язувача використовували твердник холодного тверднення поліетиленполіамін (ПЕПА), який вводили при стехіометричному співвідношенні компонентів. Формування композиту на основі епоксидного діанового олігомера ЕД-20 (100мас.ч.) та пластифікатора дибутилфталату (8мас.ч.) дозволяє поліпшити реологічні властивості епоксидних композицій та знизити залишкові напруження. Епоксидний зв'язувач формують і наносять на поверхню за такою технологією. Дозування компонентів, гідродинамічне суміщення епоксидного олігомера ЕД-20 та пластифікатора дибутилфталату до отримання однорідної суміші, вакуумування композиції протягом 40...60хв., введення твердника ПЕПА. Отриману композицію протягом 10...20хв. наносять на попередньо обезжирену поверхню.

Наведений склад композиції і спосіб формування захисного покриття має техніко-економічні переваги порівняно з відомими матеріалами: високі адгезійні та фізико-механічні властивості, незначні показники залишкових напружень за рахунок раціонально підбраного складу інгредієнтів, що забезпечує високу адгезійну і когезійну міцність композитів, достатні реологічні властивості.

На основі розробленого епоксидного зв'язувача формували захисні покриття з високими експлуатаційними характеристиками різного функціонального призначення [4].

Покриття 1. Основне призначення – збільшення міжремонтного ресурсу роботи технологічного устаткування.

Оснoву розробки становлять результати досліджень адгезійної, когезійної міцності і залишкових напружень у захисних покриттях. Високі адгезійні показники і незначні залишкові напруження мають епоксикомпозитні покриття з матеріалу, що містить епоксидну діанову смолу, пластифікатор, твердник та неорганічний наповнювач з таким співвідношенням компонентів, мас.ч.: епоксидна діанова смола ЕД-20 – 100, пластифікатор дибутилфталат – 7...9, твердник поліетиленполіамін – 7...9, неорганічний наповнювач: зольні мікросфери (63мкм) – 5...15, газова сажа (10...20мкм) – 5...10.

З метою підвищення адгезійної міцності композиції як основний наповнювач використано частки зольних мікросфер з дисперсністю 63мкм. Для поліпшення когезійної міцності і зменшення залишкових напружень у матеріалі як додатковий наповнювач використано дрібнодисперсні частки газової сажі (10...20 мкм).

Зольні мікросфери (ТУ 5712-010-80338612-2008) є скляними сферами, наповненими повітрям. Зольні мікросфери 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 твердість і температура плавлення, хімічна інертність до впливу агресивних середовищ. Хімічний склад зольних мікросфер, %: SiO_2 – 55,0-59,0, Al_2O_3 – 27,0-31,0, Fe_2O_3 – 4,6-5,5, K_2O – 3,2-3,7, CaO – 1,1-1,8, MgO – 1,3-1,7, TiO_2 – 0,1-1,1, SO_2SO_3 – 0,05-1,00, $\text{Cl} < 0,1$.

Додатково для поліпшення реологічних і когезійних властивостей матеріалу у композицію вводили пластифікатор дибутилфталат. Це забезпечує кращу змочуваність наповнювача, що, у свою чергу, поліпшує адгезію покриття до металевої основи і зменшує показники залишкових напружень у композиті.

Композицію формують і наносять на поверхню за такою технологією. Підготовка поверхні, яка полягає у обезжирюванні і видаленні забруднень, окалини, іржі з використанням піскоструминного оброблення. Формування композиції: приготування зв'язувача (дозування компонентів та їх суміщення) і приготування наповнювачів (очищення дисперсних часток від домішок методом ультразвукового оброблення). Після отримання однорідних фракцій порошки просушують у сушильній шафі при температурі $T=323...353\text{K}$ протягом часу $\tau=2,0\text{год}$. Надалі проводять гідродинамічне суміщення наповнювачів і зв'язувача до отримання однорідної суміші, вакумування композиції протягом 40...60хв, введення твердника ПЕПА. Отриману композицію протягом 60...80хв. наносять на попередньо обезжирену поверхню методом пневматичного розпилення.

Покриття 2. Основне призначення – підвищення корозійної тривкості устаткування, що експлуатується у природних умовах.

Оснoву розробки становлять результати дослідження адгезійної, когезійної міцності і корозійної тривкості захисного покриття шляхом виконання епоксикомпозитного покриття, що містить адгезійний і поверхневий шари. Адгезійний шар складається з епоксидної діанової смоли, пластифікатора, твердника та двокомпонентного полідисперсного мінерального наповнювача. Інгредієнти для адгезійного шару і технологію його формування наведено вище при описі способу формування покриття 1. Поверхневий шар складається з епоксидної діанової смоли, пластифікатора, твердника та двокомпонентного полідисперсного мінерального наповнювача з таким співвідношенням компонентів, мас.ч.: епоксидна діанова смола – 100, пластифікатор дибутилфталат – 7...9, твердник поліетиленполіамін – 7...9, неорганічний наповнювач: зольні мікросфери (63мкм) – 25...35, вспучений вермикуліт (10...20мкм) – 15...20.

Вспучений вермикуліт є пористим матеріалом у вигляді лускатих часток, який отримують відпалом вермикулітового кноцентрата – гідрослюди, що містить між елементарними шарами зв'язану воду. Хімічний склад вспученого вермикуліту, %: SiO_2 – 33...36, Fe_2O_3 – 5...17, FeO – 0,2, Al_2O_3 – 6...18, MgO – 14...25, CaO – 1,2...2,0, K_2O – 3...5, Mn – 0,06, Na_2O – 0,5, TiO_2 – 0,4, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ – 6,8...7,0.

Зольні мікросфери вводили у зв'язувач для збільшення когезійної міцності поверхневого шару, а, отже, для підвищення антикорозійних властивостей покриття. Введення у поверхневий шар зольних мікросфер до 25мас.ч. на 100мас.ч. смоли ЕД-20 призводить до зменшення об'єму полімеру у стані поверхневих шарів, при цьому когезійна міцність покриття знижується. Введення зольних мікросфер понад 35мас.ч. на 100мас.ч. смоли ЕД-20 зумовлює підвищення залишкових напружень у покритті внаслідок значної кількості дефектів поверхневих шарів навколо дисперсних часток наповнювача. В такому випадку при експлуатації покриття швидко руйнується.

Введення у поверхневий шар як додаткового дисперсного наповнювача вспученого вермикуліту при оптимальному вмісті забезпечує формування стійкого до седиментації шару покриття з високою когезійною міцністю. Збільшення вмісту вспученого вермикуліту зумовлює виникнення напруженого стану та дефектів у поверхневих шарах, що призводить до зменшення когезійної міцності і, відповідно, до погіршення корозійної тривкості покриття.

Нанесення на металеву основу (сталь Ст.3) методом пневматичного розпилення адгезійного шару з товщиною 80...100мкм дозволяє суттєво підвищити адгезійну міцність і корозійну тривкість захисних покриттів. Попередня полімеризація адгезійного шару при температурі $T=313...333\text{K}$ протягом $\tau=20...30\text{хв.}$ забезпечує високий ступінь зшивання макромолекул з утворенням просторової сітки, що зумовлює поліпшення адгезійної міцності та фізико-механічних властивостей покриттів. Виконання адгезійного шару з товщиною, яка менша за 80мкм, погіршує перебіг дифузійних процесів при формуванні захисного покриття. Виконання адгезійного шару з товщиною, яка більша від 100мкм, знижує величину адгезійної міцності гетерогенних матеріалів. Крім того, полімеризація шару при температурі, яка вища оптимальних режимів та тривалістю, що більша від часу $\tau=30\text{хв.}$, зумовлює зменшення міжшарової взаємодії, що погіршує захисні властивості покриттів. Формування шару при температурно-часових режимах, які нижчі від оптимальних значень, погіршує технологічні умови формування захисних покриттів.

Поверхневий шар з товщиною 150...180мкм наносять на адгезійний шар після його попередньої полімеризації. Далі проводять термостатування покриття при температурі $T=493...498\text{K}$ протягом часу $\tau=2,0...2,1\text{год.}$

Покриття 3. Основне призначення – підвищення гідроабразивної зносостійкості технологічного устаткування.

Основу розробки становлять результати досліджень адгезійної, когезійної міцності і зносостійкості захисного покриття. Матеріал епоксикомпозитного покриття містить адгезійний і поверхневий шари. Інгредієнти для адгезійного шару і технологію його формування наведено вище при описі способу формування покриття 1. Поверхневий шар складається з епоксидної діанової смоли, пластифікатора, твердника та двокомпонентного полідисперсного мінерального наповнювача з таким співвідношенням компонентів, мас.ч.: епоксидна діанова смола – 100, пластифікатор дибутилфталат – 7...9, твердник поліетиленполіамін – 7...9, неорганічний наповнювач: карбід кремнію (63мкм) – 75...85, оксид хрому (10...20мкм) – 35...45.

Режими формування поверхневого шару є аналогічними до режимів і параметрів аналогічного шару покриття 2. Відмінним є те, що поверхневий шар має товщину 180...200мкм.

Отримані експериментальні результати порівняльних випробувань адгезійних властивостей, залишкових напружень, корозійної тривкості і відносної зносостійкості розроблених та відомих захисних покриттів свідчать про високі експлуатаційні характеристики і доцільність використання нових матеріалів у різних галузях промисловості (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльні показники властивостей захисних покриттів

Показник	ПКП 1	ПКП 2	ПКП 3	ПКП 4	ПКП 5	ПКП 6
Адгезійна міцність, МПа	76,4	72,1	68,3	42,1	50,3	58,7
Залишкові напруження, МПа	2,5	2,8	3,1	4,8	5,3	6,3
*Корозійна тривкість, ρ , Ом·см ²	3,6	5,1	3,1	2,1	2,4	2,8
**Відносна зносостійкість, ϵ	0,74	0,72	1,2	0,44	0,28	0,56

Примітка.

*Корозійну тривкість (значення питомого електроопору) досліджували після 120...140 діб витримки у агресивному середовищі (3%-ний розчин хлориду натрію).

**Відносну зносостійкість визначали за втратою маси досліджуваного стосовно контрольного зразка зі сталі Ст.3.

ПКП 1...3 – розроблені покриття; ПКП 4 – полімеркомпозитне покриття (пат. Японії №152574, 10.08.85р.), ПКП 5 – полімеркомпозитне покриття (а.с. СРСР №1175945, опубл. в Б.И., 1985, №32), ПКП 6 – полімеркомпозитне покриття (пат. №97020588, опубл. в "Промислова власність України", 1997, №5).

Висновки. Висока ефективність застосування нових покриттів підтверджена випробуваннями у виробничих умовах при захисті від корозії і гідроабразивного зношування устаткування нафтопереробної і газотранспортної промисловості. На підприємствах даних галузей промисловості ставлять у комплексі широкий спектр підвищених вимог до експлуатаційних характеристик захисних покриттів, позаяк технологічне устаткування піддається одночасно постійному впливу атмосферних та агресивних середовищ. У результаті експлуатації контрольних об'єктів встановлено, що використання захисних покриттів особливо ефективно при захисті від корозії металоконструкцій і устаткування в умовах впливу агресивного середовища хлориду натрію, а також від атмосферної корозії деталей транспортуючих засобів та контейнерів.

Крім того, впровадження розроблених епоксикомпозитних матеріалів у вузлах технологічного устаткування забезпечує підвищення надійності і довговічності обладнання у 2...3 рази. Результати дослідної перевірки експлуатаційних характеристик розроблених композитів у вигляді виробів та захисних покриттів доводять їх високу надійність і ефективність та необхідність подальшого впровадження у різних галузях промисловості.

1. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Добротвор І.Г. Дослідження корозійної тривкості епоксикомпозитних покриттів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.-2008.-Спец. вип. №7.-С.448-452.

2. Стухляк П.Д., Букетов А.В. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням.-Тернопіль: Збруч.-2009.- 237с.

3. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.І. Дослідження адгезійних властивостей і залишкових напружень у пластифікованій дибутилфталатом епоксидній матриці // Вісник ХНТУСГ.-Харків: ХНТУСГ.-Вип.96.-2010.-С.416-426.

4. Бугай Б.Г., Зінь І.В., Білий М.Н., Похмурська М.Т. Стійкість нових лакофарбних покриттів ВАТ "Талак" у корозійних середовищах // Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів.-Корозія-98:Матеріали ІV Міжнарод. конференції-виставки.-Львів:ФМІ.-1998.-С.265-268.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2018

УДК 621.941.323.2

Р.Г. Редько, О.І. Редько
ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕРОЗВІДНИХ ЗАТИСКНИХ ЦАНГ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також з метою зменшення згинальних напружень пелюсток, підвищення точності виготовлення і збільшення довговічності затискних цанг розроблено нові конструкції і метод виготовлення нерозвідних цанг. Відмінною особливістю його порівняно з існуючими (методами виготовлення розвідних цанг) є виключення в технологічному процесі повторного нагрівання і розведення пелюсток. Наведено розрахункову схему і формули для визначення діаметра попереднього розточення, припусків на внутрішнє шліфування, ширини шлиців (або діаметра штифта) при виготовленні нерозвідних затискних цанг.

Ключові слова: затискна цанга, цангові затискні механізми, маловідходні технології, термічна обробка, нерозвідні затискні цанги, зношування затискних цанг.

Рис. 3 Літ. 5.

Р.Г. Редько, О.І. Редько
ТЕХНОЛОГІЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕРАЗВОДНЫХ ЗАЖИМНЫХ ЦАНГ

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, а также с целью уменьшения изгибающих напряжений лепестков, повышение точности изготовления и увеличения долговечности зажимных цанг разработаны новые конструкции и метод изготовления неразводных цанг. Отличительной особенностью его по сравнению с существующими (методами изготовления разводных цанг) есть исключения в технологическом процессе повторного нагрева и разведения лепестков. Приведено расчетную схему и формулы для определения диаметра предыдущей расточки, припусков на внутреннее шлифование, ширины шлицев (или диаметра штифта) при изготовлении неразводных зажимных цанг.

Ключевые слова: зажимная цанга, цанговые зажимные механизмы, малоотходные технологии, термическая обработка, неразводные зажимные цанги, износ зажимных цанг.

R.G. Redko, O.I. Redko
TECHNOLOGY OF MANUFACTURING OF INDIVIDUAL CLAMP COLLETS

On the basis of theoretical and experimental researches, as well as with the aim of reducing the bending voltages of the petals, increasing the accuracy of manufacture and increasing the durability of clamping tsang, new designs and a method of manufacturing inelastic tsang have been developed. A distinctive feature of it in comparison with the existing (methods of manufacturing split tsang) is the exclusion in the technological process of reheating and breeding of petals. The calculation scheme and formulas for the determination of the diameter of the preliminary grinding, the allowances for internal grinding, the width of the slots (or the diameter of the pin) in the manufacture of inelastic clamping tsang is given.

Key words: clamping collet, collet clamping mechanisms, low-waste technology, heat treatment, non-detachable clamping collet, wear of clamping collet.

Вступ. Багато із металорізальних верстатів і, насамперед, пруткових токарних автоматів, оснащено цанговими затискними механізмами (ЦЗМ). Їх основна перевага - в можливості порівняно просто автоматизувати процес закріплення штучних та пруткових заготовок, так як для цього потрібно лиш просте осьове переміщення цанги відносно шпинделя, а також малі радіальні габарити і незначний вплив частоти обертання на зусилля затиску заготовки. Ці механізми знаходять широке застосування і в багаточисельному верстатному обладнанні.

Найменш довговічним елементом в ЦЗМ і елементом, який найбільше впливає на такі показники, як точність обробки та жорсткість технологічної системи, є затискна цанга (ЗЦ). Причиною швидкого їх виходу із ладу є недосконалість методів проектування та технології виготовлення, які не забезпечують виконання цанг із найбільш вдалим для даних умов обробки конструктивними та високими якісними параметрами. Технологічні процеси їх виготовлення є трудомісткими, коефіцієнт використання металу дуже низький і становить 22-26% і після зношення робочих поверхонь затискних цанг, їх відправляють на переробку [1].

Розробка маловідходних технологій виготовлення цанг, зокрема технології виготовлення нерозвідних затискних цанг, що є в даний час гострим та актуальним питанням, дасть можливість спростити технологічний процес виготовлення цанг та підвищити їх довговічність.

Постановка проблеми. З метою зменшення згинальних напружень пелюсток, підвищення точності виготовлення і збільшення довговічності затискних цанг розроблено нові конструкції, а також метод виготовлення нерозвідних цанг. Відмінною особливістю його порівняно з існуючими технологіями (методами виготовлення розвідних цанг) є виключення повторного нагрівання і розведення пелюсток.

Для проходження прутка діаметром, більшим діаметра робочого отвору, а також для забезпечення пружності пелюсток, в існуючих технологічних процесах пелюстки розводять. При розведенні пелюсток здійснюється повторне нагрівання та термофіксація (рис.1).

Так як розведення пелюсток для отримання робочого напруженого стану затискних цанг виконують після фінішних операцій, точність виготовлення цанг знижується завдяки деформації їх внаслідок температурних змін. У розвідних затискних цангах при довготривалій роботі і недостатній якості термообробки частково зменшуються пружні розтискні властивості пелюсток, внаслідок чого цанга перестає розкриватись, а також знижується їх опір втомі, що може призвести до поломки внаслідок двостороннього знакозмінного згину при затиску прутків діаметрами, меншими d_{\min} або більшими d_{\max} діаметра d_0 робочого отвору цанги (рис. 1,г). Аналогічна картина спостерігається також при зношенні цанги навіть при $d_{\min} > d_0$.

У нерозвідних затискних цангах робочий отвір виконують більшим діаметра прутка (для вільного проходження його при подачі), і надання пружності пелюсткам здійснюється механічним способом.

З метою зменшення припуску на шліфування при попередній обробці нерозвідної затискної цанги робочий отвір розточують на конус з кутом $2\beta_{зв}$, рівному куту зведення пелюсток при завершальному шліфуванні, причому діаметр d_1 виконують більшим діаметра робочого отвору d_0 на величину розведення пелюсток при виготовленні розвідних цанг, або більшим максимального діаметру прутка d_{\max} (рис. 1, д). При цьому кут зовнішньої конічної поверхні цанги виконують більшим кута конуса шпинделя на величину $2\beta_{зв}$. Шліфування робочого отвору цанги на діаметр $d_0 \leq d_{\min}$ проводиться в спеціальному корпусі 1 при зведених на кут $2\beta_{зв}$ пелюстках (рис. 1, е). Про величину зведення судять по затиску між шліцями штифтів 2 діаметром $d_{ш}$, запресованих в плаваючу втулку 3, яка підтягується до торця цанги гайкою 4. Штифти, по можливості, розміщують по середній лінії обводу переднього торця цанги (рис. 1, ж).

Так як пелюстки нерозвідної цанги вигинаються в одному напрямку від нейтрального положення (рис. 1,з) – в сторону осі цанги, то для виключення тертя подавальної і затискної цанг необхідно витримати зазор δ_2 (рис. 2). Це досягається завдяки збільшенню внутрішнього діаметра пелюсток d . Необхідні міцність та жорсткість пелюсток досягаються за рахунок збереження товщини t збільшенням зовнішнього діаметру пелюсток D . В цьому випадку лімітуючим стає не зазор δ_3 , а діаметр напрямного пояса D_n та довжина конусної частини a .

Вибір основних параметрів нерозвідних затискних цанг (рис. 2), нерухомих в осьовому напрямку, і які застосовують в одношпindelних токарних автоматах, здійснюється відповідно до нових результатів, отриманих в даному дослідженні і скоригованими з відповідними формулами[4]. Параметри цанг повинні враховувати вимоги ГОСТ 2876-80 на основні та передбачувальні розміри.

Основні результати дослідження. Для визначення діаметру штифтів $d_{ш}$, які обмежують величину зведення губок та пелюсток, використовується схема, наведена на рис. 3.

$$d_{ш} = C'D' = CD - 2CC' = t_2 - 2\delta_n \sin\varphi / 2. \quad (1)$$

Якщо прийняти діаметри штифтів $d_{ш}$ рівними ширині шліців t_2' розвідної цанги за умови збереження ширини фетрових (або войлочних) прокладок, то ширину розрізання нерозвідної затискної цанги можна визначити за формулою:

$$t = t_2' + 2\delta_n \sin\varphi / 2 = d_{ш} + 2\delta_n \sin\varphi / 2, \quad (2)$$

де t_2 – ширина шліців нерозведеної затискної цанги.

Потім проводять корекцію по товщині дискової фрези. З метою зменшення припуску на шліфування робочого отвору цанги при зведених пелюстках, останні попередньо розточуються на конус з діаметрами на задньому (передньому) кінці губок, які визначаються за розрахунковою схемою (рис. 3). В цьому випадку максимальний припуск, що знімається по середній твірній губки, при нульовому припуску на шліцах, дорівнює:

$$\Delta_n' = r_0 + \delta_n - D_p' - \text{ на передньому перерізі губки;}$$

$$\Delta_n = r_0 + \delta_n - D_p - \text{ на задньому перерізі губки.}$$

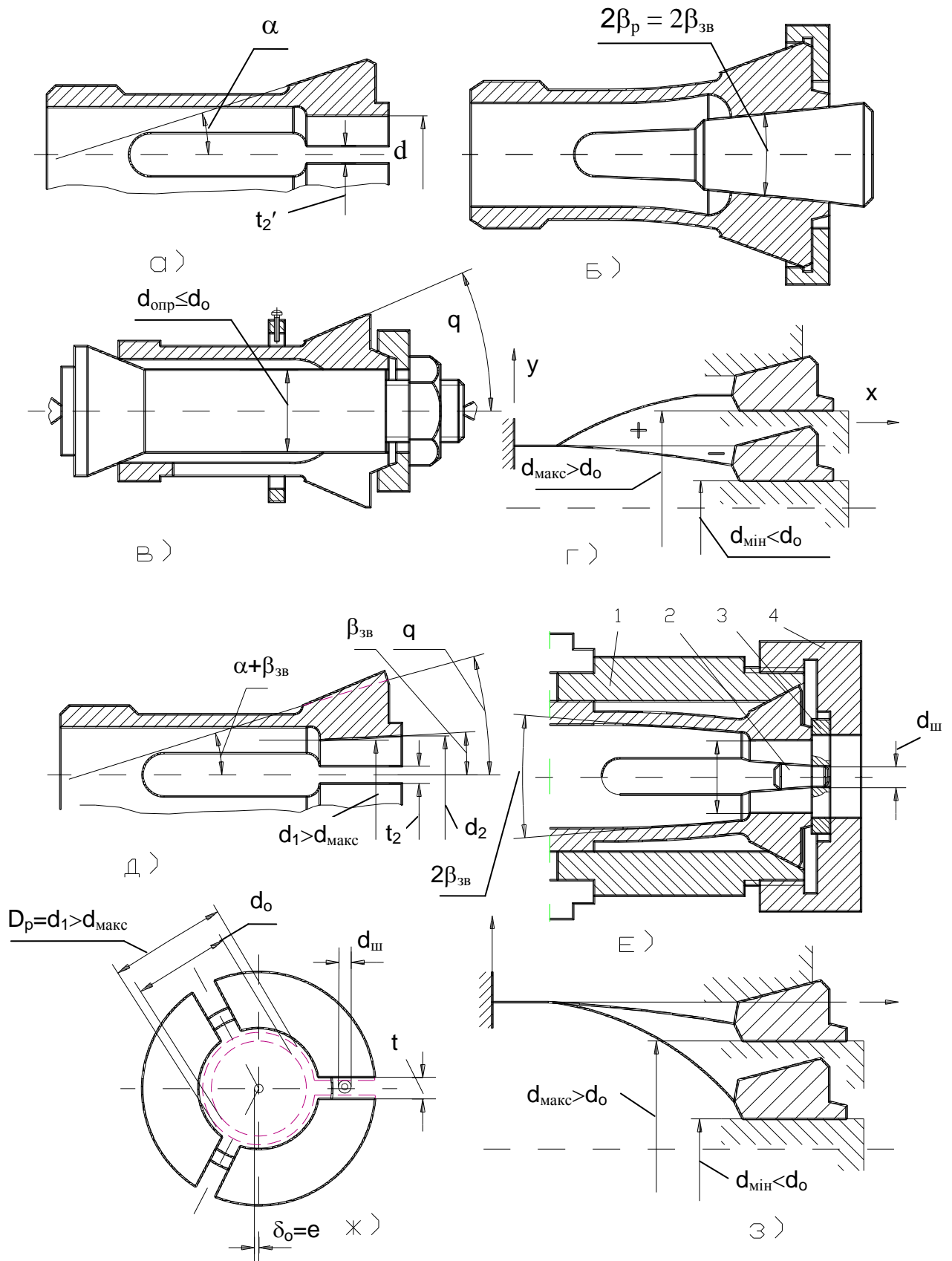


Рис. 1. Порівняння методів виготовлення розвідних і нерозвідних затискних цанг

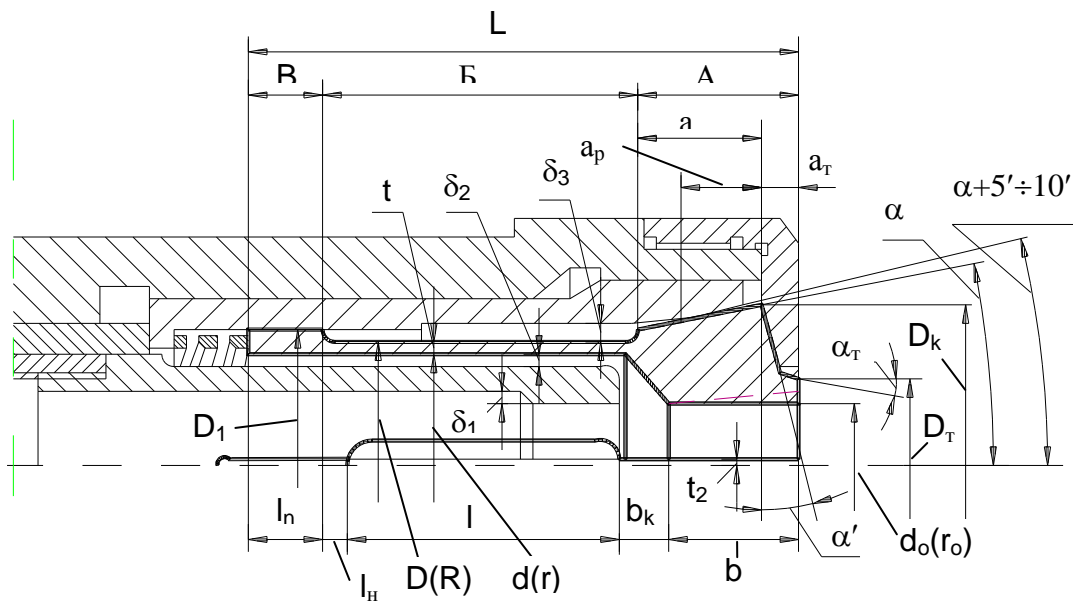


Рис 2. Основні параметри нерозвідної затискної цанги

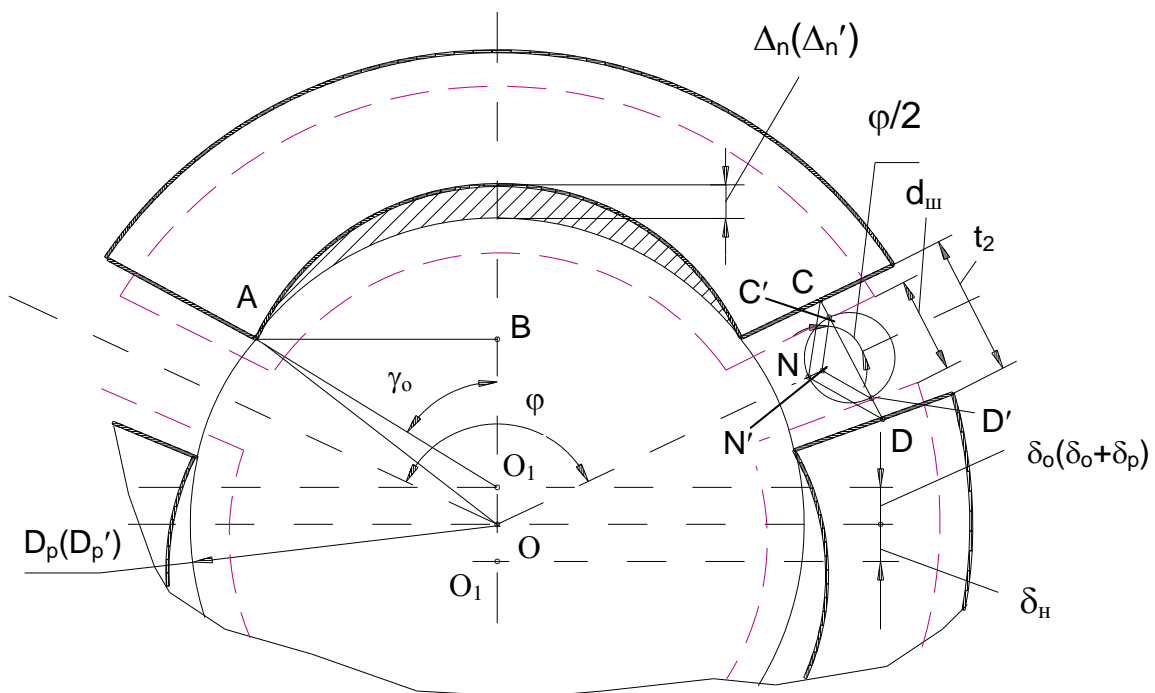


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення діаметра попереднього розточення, припусків на внутрішнє шліфування, ширини шліців (або діаметра штифта)

Фінішні операції необхідно виконувати після термічної обробки. У зв'язку з цим необхідно забезпечити процес виготовлення цанг на спеціальному обладнанні і покращити якість контролю введенням універсальних контрольних пристосувань[2].

В умовах спеціалізованого виробництва процес виготовлення цанги необхідно розділити на отримання напівфабрикату, а потім – готового виробу. Всі поверхні, зовнішні та внутрішні, напівфабрикату оброблюються із залишенням припуску під шліфування конуса і напрямного пояса. Діаметри робочих отворів затискних губок необхідно виконувати тільки після отримання заявки на виробництво певної кількості цанг із конкретним діаметром оброблювального виробу.

Аналогічні рекомендації можуть бути запропоновані для ЗЦ з розтягуючим зусиллям, які детально досліджені в попередніх дослідженнях [3].

Висновки. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також з метою зменшення згинальних напружень пелюсток, підвищення точності виготовлення і збільшення довговічності затискних цанг розроблено нові конструкції і метод виготовлення нерозвідних цанг. Відмінною особливістю його порівняно з існуючими (методами виготовлення розвідних цанг) є виключення в технологічному процесі повторного нагрівання і розведення пелюсток. Наведено розрахункову схему і формули для визначення діаметра попереднього розточення, припусків на внутрішнє шліфування, ширини шліців (або діаметра штифта) при виготовленні нерозвідних затискних цанг.

Література

1. Кузнецов Ю.Н. Долговечность цанг. // Технология и организация машиностроения.- Киев, вып.13, 1974, с. 46-55.
2. Редько Р.Г. Исследование предельных возможностей зажимных цанг. //Вестник НТУУ "КПИ": серия машиностроение. Выпуск 34.– Киев, 1999.– С. 98–100.
3. Редько Ростислав Григорович. Підвищення працездатності затискних цанг токарних автоматів, виготовлених за маловідходною технологією: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01 / Луцький держ. технічний ун-т. - Луцьк, 1999. - 233л. - Бібліогр.: л. 150-167.
4. Р.Г.Редько, О.І.Редько, В.В.Шанайда, Р.А.Склярів. Дослідження пружно-силових характеристик затискних цанг, виготовлених за діючими та новими технологіями // Наукові нотатки. – Випуск 44.– Луцьк, 2014. – С. 249– 253.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2018

УДК 685.34.02

Р.В. Росул, Т.М. Садовнікова, Т.Т. Рейс*Мукачівський державний університет***ІСТОРИЧНИЙ АСПЕКТ РОЗВИТКУ ШКІРГАЛАНТЕРЕЙНИХ ВИРОБІВ**

В роботі розглянуто історичний опис розвитку шкіргалантерейних виробів для подальшого вдосконалення моделювання шкіргалантерейних виробів і створення конструктивно уніфікованих рядів моделей. За допомогою Історико-етнографічного аналізу конструкції досліджуваного об'єкту та визначення параметрів, шляхом графічної інтерпретації, що дозволить застосовувати при виготовленні виробів. Актуалізовано питання виробів народів Закарпаття. Виявлено, що гуцул мав шкіряну сумку, яку носив на ремені через плече. Це так звана тобівка. Ця сумка була прямокутною або округлою форми з відформованим вручну простим жорстким клинчиком. Закривалася вона на клапан, який доходив до країв стінки або був лише трішки коротшим. Клапан прикрашався тисненням і металевою фурнітурою (мідь, латунь, срібло). Ручка-ремінь кріпилася за допомогою металевих пряжок. Для мілких речей і грошей використовувалася тішка – маленька плоска сумка на дуже довгому тонкому ремені. Встановлено, що Конструкція сумки у сучасному розумінні з'являється лише наприкінці XIX і на початку XX століття. При цьому проходить розподіл сумок за сезоном та призначенням. З XX-того століття, особливо після першої світової війни, з приходом у виробництво і установи великої кількості жінок, зручна недорога сумка стає предметом, без якого не можна уявити сучасну жінку. Сумка виготовлялася в основному із шкіри. У перше десятиліття XX-того віку має місце захоплення екзотичними матеріалами: шкіри кенгуру, крокодила, змій. Представлено вплив хімії в Середина XX-того віку. Тому у шкіргалантерейному виробництві почали широко застосовуватися замітники шкіри. Це дозволило збільшити різноманітність шкіргалантерейних виробів, розширити асортимент і спростити технологічні процеси їх виготовлення. Розвиток хімії сприяв виникненню нових матеріалів і нових способів виготовлення виробів. Тому деякі вироби лише традиційно зараз називають шкіргалантерейними виробами. Основним результатом даної роботи є використання історичного опису розвитку шкіргалантерейних виробів в моделюванні і конструюванні. Результат досягається шляхом створення конструктивно уніфікованих рядів моделей. Розглянутий нами історико-етнографічний аналіз виробів, адекватно описує етапи розвитку шкіргалантерей.

Ключові слова: вироби, конструкції, матеріали, оздоблення, шкура, шкіра, стінка, клапан, формування.

Р.В. Росул, Т.М. Садовнікова, Т.Т. Рейс*Мукачевський державний університет***ІСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ РОЗВИТКУ КОЖГАЛАНТЕРЕЙНИХ ИЗДЕЛИЙ**

В работе рассмотрены историческое описание развития кожгалантерейных изделий для дальнейшего совершенствования моделирования кожгалантерейных изделий и создание конструктивно унифицированных рядов моделей. С помощью историко-этнографического анализа конструкции исследуемого объекта и определение параметров путем графической интерпретации, что позволит применять при изготовлении изделий. Актуализирован вопрос изделий народов Закарпатья. Выведено, что гуцул имел кожаную сумку, которую носил на ремне через плечо. Это так называемая тобівка. Эта сумка была прямоугольной или округлой формы с отформованным вручную ботаном или простым жестким клинчиком. Закрывалась она на клапан, который доходил до краев стенки или был лишь немного короче. Клапан украшался тиснением и металлической фурнитурой (медь, латунь, серебро). Ручка-ремень крепилась с помощью металлических пряжек. Для мелких вещей и денег использовалась Тишка - маленькая плоская сумка на очень длинном тонком ремне. Установлено, что Конструкция сумки в современном понимании появляется лишь в конце XIX и в начале XX века. При этом проходит распределение сумок по сезону и назначению. З XX-того века, особенно после первой мировой войны, с приходом в производство и учреждения большого количества женщин, удобная недорогая сумка становится предметом, без которого нельзя представить современную жінку. Сумка изготавливалась в основном из кожи. В первое десятилетие XX-того возраста имеет место увлечение экзотическими материалами: кожи кенгуру, крокодила, змій. Представлены влияние химии в Середина XX-того века. Поэтому в кожгалантерейные производстве начали широко применяться заменители кожи. Это позволило увеличить разнообразие кожгалантерейных изделий, расширить ассортимент и упростить технологические процессы их изготовления. Развитие химии способствовало возникновению новых материалов и новых способов изготовления изделий. Поэтому некоторые изделия только традиционно сейчас называют кожгалантерейными виробами. Основным результатом данной работы является использование исторического описания развития кожгалантерейных изделий в моделировании и конструировании. Результат достигается путем создания конструктивно унифицированных рядов моделей. Розглянутий нами історико-етнографічний аналіз виробів, адекватно описує етапи розвитку кожгалантерей.

Ключевые слова: изделия, конструкции, материалы, отделка, шкура, кожа, стенка, клапан, формирование

R. Rosul, T. Sadovnikova, T. Rejs*Mukachevo State University***HISTORICAL ASPECT OF THE DEVELOPMENT OF LEATHER GOODS**

The paper considers the historical description of the development of leather goods for the further improvement of the modeling of leather goods and the creation of structurally unified series of models. With the help of historical and ethnographic analysis of the design of the object under study and the determination of parameters by graphical interpretation, which will allow to use in the manufacture of products. The issue of products of the peoples of Transcarpathia is updated. It is

revealed that the Hutsul had a leather bag, which he wore on a belt over his shoulder. This is the so-called tobivka. This bag was a rectangular or round shape with a hand-formed bot or a simple hard wedge. It closed on the valve, which reached the edges of the wall or was only slightly shorter. The valve was decorated with embossed and metal fittings (copper, brass, silver). The handle-belt was fastened with metal buckles. For small things and money, Tishka was used - a small flat bag on a very long thin belt. It is established that the design of the bag in the modern sense appears only in the late XIX and early XX centuries. At the same time, the distribution of bags according to the season and assignments takes place. In the 20th century, especially after the First World War, with the arrival of a large number of women in production and establishments, a convenient, inexpensive bag becomes an object without which modern gin can not be imagined. skin. In the first decade of the 20th age there is a fascination with exotic materials: kangaroo leather, crocodile, snakes. The influence of chemistry in the middle of the 20th century is presented. Therefore, leather production began to be widely used leather substitutes. This made it possible to increase the diversity of leather haberdashery products, expand the range and simplify the technological processes of their wiggling. The chemical chemistry promoted the emergence of new materials and new methods of manufacturing products. Therefore, some products are only now traditionally called leather fancy goods. The main result of this work is the use of a historical description of the development of leather goods at modeling and design. The result is achieved through the creation of constructively unified series of models. Our historical and ethnographic analysis of products is glimpsed by us, adequately describes the stages of development of leather goods.

Key words: products, structures, materials, decoration, skin, leather, wall, valve, formation

Основною задачею, яка стоїть перед шкіргалантерейною промисловістю є вдосконалення моделювання шкіргалантерейних виробів на основі модульного методу і створення конструктивно уніфікованих рядів моделей з врахуванням освоєння їх виробництва на комплексно-спеціалізованих поточних лініях. Широке впровадження системи автоматизованого проектування шкіргалантерейних виробів, що дозволить швидко розробляти широкий асортимент нових моделей у відповідності з напрямком моди і попитом споживачів.

В роботі [1], вказано, що Конструкція сумки у сучасному розумінні з'являється лише наприкінці XIX і на початку XX століття. При цьому проходить розподіл сумок за сезоном та призначенням.

З XX-ого століття, особливо після першої світової війни, з приходом у виробництво і установи великої кількості жінок, зручна недорога сумка стає предметом, без якого не можна уявити сучасну жінку.

Сумка виготовлялася в основному із шкіри. У перше десятиліття XX-ого віку має місце захоплення екзотичними матеріалами: шкіри кенгуру, крокодила, змії.

Середина XX-ого віку знаменується розвитком хімії. Тому у шкіргалантерейному виробництві почали широко застосовуватися заміники шкіри. Це дозволило збільшити різноманітність шкіргалантерейних виробів, розширити асортимент і спростити технологічні процеси їх виготовлення.

Розвиток хімії сприяв виникненню нових матеріалів і нових способів виготовлення виробів. Тому деякі вироби лише традиційно зараз називають шкіргалантерейними виробами.

Актуальним питанням являються вироби народів Закарпаття. Гуцул мав шкіряну сумку, яку носив на ремені через плече. Це так звана тобівка. Ця сумка була прямокутною або округлою форми з відформованим вручну ботаном або простим жорстким клинчиком. Закривалася вона на клапан, який доходив до країв стінки або був лише трішки коротшим. Клапан прикрашався тисненням і металевою фурнітурою (мідь, латунь, срібло). Ручка-ремінь кріпилася за допомогою металевих пряжок. Для мілких речей і грошей використовувалася тішка – маленька плоска сумка на дуже довгому тонкому ремені. Вона також прикрашалася металом але головною її прикрасою була велика фігурна пряжка на ручці. Жінки західної України носили: бесаг – це переметна сумка із грубого полотна, обов'язково в клітку; дзєбенка - це невелика плоска сумка на кольоровому шнурі із, що прилягала до стегна і виготовлялася із вовняної тканини з яким геометричним орнаментом, який утворював горизонтальні смуги. Ця сумка прикрашалася китицями і бахромою. Такі ж сумки але менш прикрашені носили і в інших районах України. Чоловіки підвішували необхідні предмети до поясу або затикали за кушак. Однак також були поширені невеликі гаманці і кисети, що були вишиті кольоровими нитками, а іноді срібними і золотими нитками.

Мета дослідження.

Застосувати історичний опис розвитку шкіргалантерейних виробів для подальшого вдосконалення моделювання шкіргалантерейних виробів і створення конструктивно уніфікованих рядів моделей.

Методи дослідження.

Історико-етнографічний аналіз конструкції досліджуваного об'єкту та визначення параметрів, шляхом графічної інтерпретації, які можуть застосовуватися при виготовленні виробів.

Об'єкт, предмет та методи дослідження.

Об'єктом дослідження є шкіргалантерейні вироби. Предмет дослідження – історичний розвиток шкіргалантерейних аксесуарів.

Виклад основного матеріалу

Перші конструкції шкіргалантерейних виробів Європи (Древня Греція, слов'янські народи).

Перші шкіргалантерейні вироби – це мішки із шкіри або хутра. Ці конструкції зустрічаються сьогодні у виробках народних майстрів.

В давньогрецьких похованнях зустрічаються жіночі гаманці у вигляді мішечка, поверхня якого була повністю покрита вишивкою. Мілкі побутові предмети носили за ременем або в руках.

Зображення перших сумок зустрічаються у папірусах Древнього Єгипту. Сумка, яка була знайдена при розкопках Пазирицького кургану характеризується складністю конструкції та красою оздоблення. Древні шкіргалантерейні вироби (сумки) носили на поясі, довгому ремені, на голові, за плечима, у руці, возили на візках.

У Європі сумки почали використовувати з XI століття. Це були невеликі сумки (найчастіше з ременем), у які знатні кавалери та дами клали мілкі монети для роздачі милостині. Тому ці вироби отримали назву монетників (рис.1). Великий поясний гаманець носили в основному купці та міняли.

З XV століття роль сумки міняється. Вона стає предметом, який популярний у будь якому суспільстві. Предметом розкошів стають сумки, які прикрашені вишивкою шовком або металевою ниткою (золотою, срібною), бісером. Популярною конструкцією сумки стає сумка на рамочному замку, який оздоблений перламутром та дорогоцінним камінням (рис.2).

Конструкції перших сумок зустрічаються сьогодні у народних майстрів. Більшість виробів були плоскими або з невеликими ботанами та клинчиками. Сумки були м'якої конструкції. Каркасність досягалася за рахунок матеріалу. Сумки не мали підкладки або внутрішніх відділень та кишень[2].

Матеріали і особливо оздоблення сумок були особливими для різних народностей.

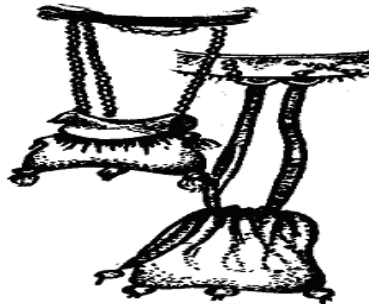


Рис.1. Монетники



Рис.2. Сумки XVI – XVIII століть

На території, що була заселена слов'янами (росіянами) крім звичайних мішків для перенесення вантажів жінки не користувалися сумками. Їх заміняли хустки зав'язані у вузол.

Просту полотняну сумку, яку носили на лямці або на мотузці через плече, мали богомолки, що здійснювали довгі подорожі по "святих місцях".

Шкіряні сумки у сільського населення зустрічалися дуже рідко і були ознакою якоїсь професії. Так шкіряні сумки із грубої юхти носили пастухи[3]. Це були сумки півкруглої форми з нешироким відформованим ботаном або плоскі. Клапан закривав усю передню стінку, а щоб він не хлопав на ходу до нього пришивали куски товстого ремня, який виступав за край сумки. Клапан оздоблювали різними бляшками або декоративними цвяхами. Таку сумку носили через плече.

Особливу сумку мали коновали: невелика, із жорсткої шкіри, прямокутної форми і простими клинчиками (рис.3).



Рис.3. Сумка для коновала

На території молдови чоловіки носили трайсти - щільні пастушачі сумки із шкіри. Вони мали прямокутну форму і були оброблені по низу бахромою. Десага – сумка для чоловіків і жінок із тканини. Чоловіча десага у вигляді переметної сумки, яку носять через плече, у зв'язку з цим мала вузьку середню частину. Також мала кишені у вигляді мішків, які затягнуті шнуром.

Жіночу десагу носили у руках. Вона була за конструкцією викроєна з двох мішків (обов'язково із картої тканини), верх яких мав форму трикутника. Бокові поверхні наглухо зашиті з однієї сторони, а дві другі сторони мішка зшиті таким чином, щоб залишався вхід у вигляді трикутника.

На території Прибалтики сумки виготовляли переважно із тканини для жінок та із шкіри для чоловіків. Жіночі сумки кріпилися до пояса були плоскими і мали прямокутну або трапецієвидну форму. Вони прикрашалися вишивкою або аплікацією. Серед чоловічих сумок найпоширеніші були гаманці, які носили посередині пояса. За конструкцією вони були плоскими або мали відформований вузький ботан.

Вироби народів Середньої Азії, Сходу та Кавказу.

Башкири і татари займалися переважно розведенням худоби і славилися обробкою шкіри (татарський саф'ян). Тому вони виготовляли шкіргалантерейні вироби переважно із шкіри.

Сумка була приналежністю чоловічого костюму. Жінки користувалися звичайними мішками або мали сумки-кісети, які були прикрашені вишивкою.

У чоловіків окрім гаманців для мілких речей були мисливські сумки, які підвішувалися до пояса на петлях. Татари прикрашали таку сумку клапаном з тисненням і металевими бляшками, башкири – кольоровою аплікацією із шкіри.

Для Середньої Азії, де було розвинене ткацтво, килимарство, та обробка шкіри характерною конструкцією шкіргалантерейних виробів є переметна сума (Рис.4). Це широка смуга тканини, до кінців якої пришиті плоскі кишені. Іноді вони відкриті, іноді зашнуровані. Виготовляли ці сумки із килимової тканини або із товстої грубої вовняної тканини.

Кожен народ використовував традиційні кольори та орнамент.

Узбеки – сумки із вовняної тканини яскравих кольорів у сполученні з чорним. Із тонкої шкіри шили плоскі гаманці, які носили за поясом. Їх прикрашали накладним тисненням і смугами із шагрени. Для мілких монет використовували гаманці у вигляді глечика з вузьким горлом, що дозволяло виготовляти їх без застібки.

Таджики – майже всі шкіргалантерейні вироби виготовлялися із шкіри в тому числі і переметні суми. Для перенесення провізії та її зберігання використовувалися сумки та мішки із

шкіри ягнят, яку знімали цілу і зшивали знизу. Але навіть такі сумки прикрашали. Так верх мішка обшивали смужкою шкіри яскравого кольору, внизу пришивали бахрому, а ділянки лап прикрашали шкіряними китицями[4].

У таджиків гаманці і сумки мали внутрішні відділення або кишені. Клапан сумки за конструкцією був коротшим стінки. Майстри Середньої Азії вручну відформувували ботан і іноді робили його двохскладковим. Тобто їх вироби мали порівняно з іншими народами складнішу конструкцію.

Жінки для шиття виготовляли сумки, які мали форму трапеції з коротким клапаном, що прикріплювався до задньої стінки коротким ремнем. Сумки прикрашалися вишивкою, орнаментом.

У туркменів були поширені переметні суми із килимової тканини з традиційним туркменським орнаментом у чорно – червоних тонах. Такі сумки називалися кап, чувал. Для зберігання мільких речей використовувалася плоска сумка, що була схожа на подушку з ручкою-шнурком.

Воїни та мисливці носили пояси, до яких підвішували зброю, кресало, а також і маленьку декоративну плоску сумку з клапаном, який був прикрашений срібними накладками. Жінки носили хейкен – шкіряна сумка для ключів і мільких грошей.



Рис.4. Сумки народів Середньої Азії

а – переметна сума; б - кошіль для мільких монет; в – мішок із шкіри ягняти; г – сумка для швацького приладдя; д – сумка з підвішеним вогневом для мисливця; ж – калта; з – калта з аплікацією із шагреневої шкіри

Велике значення для туркменів, що кочували мала сумка, яка називалася торбою і заміняла шафу або скриню. В неї складали одяг і вшали на стіну юрти.

У казахів чоловіки носили сумку, яка називалася калта. Вона була півкруглої, рідше прямокутної форми, плоскою або з ботаном і підвішувалася до пояса.

Народності Кавказу носили плоскі гаманці з клапаном трикутної форми іноді з двома відділеннями в середині[5]. Ці сумки були пошиті з кусочків кольорової шкіри[6] (рис.5).

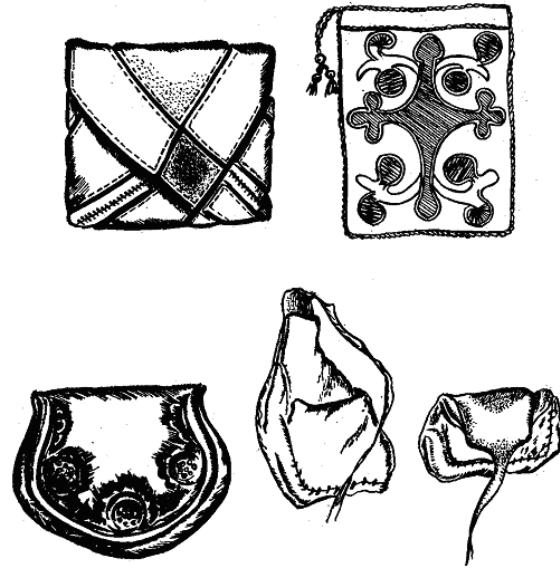


Рис.5. Сумки народів Кавказу

Черкеси мали гаманці для мілких грошей із тканини з аплікацією, яка була вирізана із бичачого пузиря.

У Дагестані були килимові переметні суми, які мали нашиті у декілька рядів кисті.

Для Грузії характерні переметні суми – хурджин із шкіри, які були затягнуті шнуром або відкриті (із килима); бурдюк – із шкіри для вина, олії, сиру. Чоловіки підвішували до пояса доволі велику сумку-гаманець, яку кріпили за дві петлі, що знаходилися на задній стінці. Така сумка була плоскою але добре відформованою, вона мала клапан, що був коротшим за стінку і мав овальну форму. При виготовленні клапана в середині нього вирізали довгу стрічку, яка звужувалася до низу і закінчувалася вузлом. Краї клапана оброблялися рельєфною строчкою.

В Азербайджані сумки виготовлялися переважно із тканини. Найбільш поширені були: хейве – переметна сумка, що була схожа на середньоазіатські але мала ромбовидний виріз у центрі; хурчун – переметна сумка з відкритими кишнями.

Певний період у житті людини на землі пояси виконували однакову з татуюванням психологічну функцію і зустрічалися навіть там, де люди не носили одягу із-за гарячого клімату, наприклад, у Африці. Пізніше пояс став необхідним людині для того, щоб носити різні предмети, для підтримування одягу на тілі, для прикрасення костюму.

У середні віки пояс символізує достоїнство і подружню вірність, а також слугує для носіння дзеркал, ключів, дзвіночків[7].

Пояси були дуже популярні на Сході, що пов'язано з вільним одягом, який необхідно було обов'язково підв'язувати.

Конструкції виробів XIX початку XX століття.

Конструкція сумки у сучасному розумінні з'являється лише наприкінці XIX і на початку XX століття. При цьому проходить розподіл сумок за сезоном та призначенням.

З XX-ого століття, особливо після першої світової війни, з приходом у виробництво і установи великої кількості жінок, зручна недорога сумка стає предметом, без якого не можна уявити сучасну жінку.

Сумка виготовлялася в основному із шкіри. У перше десятиліття XX-ого віку має місце захоплення екзотичними матеріалами: шкіри кенгуру, крокодила, змії.

Середина XX-ого віку знаменується розвитком хімії. Тому у шкіргалантерейному виробництві почали широко застосовуватися заміники шкіри[8]. Це дозволило збільшити різноманітність шкіргалантерейних виробів, розширити асортимент і спростити технологічні процеси їх виготовлення.

Висновки.

Основним результатом даної роботи є використання історичного опису розвитку шкіргалантерейних виробів в моделюванні і конструюванні. Результат досягається шляхом створення конструктивно уніфікованих рядів моделей.

Розглянутий нами історико-етнографічний аналіз виробів, адекватно описує етапи розвитку шкіргалантереї.

Подальше дослідження передбачає впровадження результатів роботи в процес моделювання і конструювання шкіргалантерейних виробів.

Література

1. Якимова Г.П. Проектування та виготовлення шкіргалантерейних і лимарних виробів // Г.П. Якимова, Т.М. Садовнікова, Р.В. Росул // Навчальний посібник. – К.: 2010
2. Ермилова Д.Ю. История домов моды: / Д.Ю.Ермилова / Учебное пособие - «Academia», 2003
3. Шевнюк О.Л. Історія костюма: / О.Л.Шевнюк // Навч. посібн. Реком. МОНУ - Знання, 2008
4. Стамеров К.К. Нариси з історії костюма. / К.К.Стамеров /// У двох частинах. Мистецтво, 1978
5. Куленко М. Основи графічного дизайну / М. Куленко Підручник для студ. ВНЗ, - Кондор-2007
6. Білодід Ю.М. Основи дизайну: / Ю.М.Білодід, О.П.Поліщук // Навчальний посібник, Парапан, - 2004
7. Фольта А.В. Основы художественного конструирования. / А.В.Фольта, Н.Д.Бевз, Р.И.Смолинский // Практикум: ВУЗов Учебник для студ. Вища школа, - 1978
8. Веселовська Г.В. Комп'ютерна графіка / Г.В.Веселовська, В.С.Ходаков, В.М.Веселовський // Навч. посібник для студ. ВНЗ. Реком. МОНУ – Олді плюс, - 2008

Рецензенти:

Стегней Мар'яна Іванівна, МДУ, декан факультету «Економіки, управління та інженерії», доктор економічних наук, професор

Жигуц Юрій Юрійович, УжНУ, завідувач кафедри «ТМ», доктор технічних наук, професор

Стаття надійшла о редакції 07.11.2018

П.П. Савчук, В.П. Кашицький, І.В. Боярська, Д.М. Матрунчик

Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА СТРУКТУРУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ

Представлено результати досліджень формування властивостей епоксиполімерів під впливом інфрачервоного випромінювання та при дії струмів високої частоти. Проаналізовано результати досліджень механічних характеристик епоксиполімерів та проведено порівняльну оцінку впливу енергії зовнішніх джерел на структурування епоксиполімерів.

Ключові слова: епоксиполімерний матеріал, електромагнітне випромінювання, структура, полімеризація, ІЧ-випромінювання, ударна міцність.

П.П. Савчук, В.П. Кашицкий, И.В. Боярская, Д.М. Матрунчик

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЭПОКСИПОЛИМЕРОВ

Представлены результаты исследований формирования свойств эпоксиполимеров под воздействием инфракрасного излучения и при воздействии токов высокой частоты. Проанализированы результаты исследований механических характеристик эпоксиполимеров и проведена сравнительная оценка влияния энергии внешних источников на структурирование эпоксиполимеров.

Ключевые слова: эпоксиполимерный материал, электромагнитное излучение, структура, полимеризация, ИК-излучения, ударная прочность.

P. Savchuk, V. Kashytskyi, I. Boiarska, D. Matrunchyk

INFLUENCE OF PHYSICAL FIELDS ON THE STRUCTURING OF EPOXY POLYMERS

Presents a study of the formation properties epoxy polymers under the influence of infrared radiation and the effects of high frequency currents. Analyzed research results and the comparative evaluation of the influence of energy of external sources on structuring of epoxy polymers.

Keyword: epoxy polymers materials, electromagnetic field, structure, polymerization, IR radiation, microwave radiation, impact strength.

На сьогодні актуальним питанням в галузі матеріалознавства епоксидних композиційних систем є проблема утворення надійного з'єднання наповнювачів з полімерною матрицею для досягнення комплексу необхідних властивостей та гарантування працездатності матеріалу впродовж необхідного терміну експлуатації.

Тому розробка технологічних основ вибору та поєднання способів тверднення епоксиполімерних матеріалів, дослідження процесів структурування, механізмів і кінетики процесів формування границь розділу, визначення основних факторів, що дозволяють керувати цими процесами, з метою забезпечення оптимальних характеристик є актуальною науковою задачею.

Існує ряд технологій, що дозволяють отримати полімерні матеріали з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Так, в промисловості використовують ІЧ-промені та струми високої частоти (СВЧ).

Внаслідок простоти, доступності, відносно невисокої вартості генераторів енергії ІЧ-нагрівання знайшло широке застосування в технологічних процесам як перспективний спосіб прискореного тверднення полімерних матеріалів. ІЧ-нагрівання використовують на різних стадіях виготовлення виробів [1, 2].

Для досягнення рівномірної температури по всьому об'ємі матеріалу потрібен досить тривалий процес нагрівання. Це призводить до значного підвищення вартості виготовлення виробів. Крім того, у разі нагрівання матеріалу зовнішнім джерелом теплоти за умови низької його теплопровідності складається ситуація, коли в середніх шарах відбувається процес тверднення, зовнішні шари починають розтріскуватись, а внутрішні шари ще не досягли температури ініціювання процесу полімеризації (полікондесації). Кардинальним вирішенням питання рівномірного тверднення полімеркомпонітних матеріалів є можливість використання методу нагрівання, який би не залежав від теплопровідності матеріалу. До моменту постановки завдання уже використовували властивість матеріалів поглинати (відбивати) електромагнітні хвилі. Тому завдання зводилось до забезпечення максимального поглинання енергії електромагнітної хвилі опромінюваним матеріалом. Таким чином було отримано новий спосіб обробки матеріалів в полі струмів високої частоти [3].

Вплив постійних магнітних полів на властивості полімерів пояснюється орієнтацією фрагментів макромолекул із високими значеннями анізотропії магнітної сприйнятливості [4].

Твердження за рахунок нагрівання в полі СВЧ – абсолютно новий метод, що забезпечує нагрівання покриття зсередини назовні. Надвисокочастотні електромагнітні хвилі проникають через плівку і нагрівають підкладку. Таким чином, в цьому випадку усувається первинне твердження плівки на поверхні.

Різноманітність методів регулювання структури полімеркомпозитних покриттів дозволяє покращити їх характеристики за рахунок уведення в матрицю зародків структуроутворення, обробки композицій зовнішніми фізичними полями. Обробка зовнішніми фізичними полями у процесі формування покриттів підвищує їх характеристики за рахунок регулювання параметрів надмолекулярної структури полімеру й орієнтованого розподілу часток наповнювача на межі розподілу основа – покриття [5].

Отже, метою даної статті є встановлення особливостей впливу ІЧ-випромінювання та обробки в полі СВЧ на формування структури та механічних характеристик епоксиполімерів.

Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), що представляє собою рідкий реакційноздатний олігомерний продукт. Можливість твердження даної смоли без виділення побічних продуктів забезпечує незначну пористість і високу щільність матеріалів [6-7]. Для твердження епоксидних композицій застосовано поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 2413-357-00203447-99).

Твердження епоксиполімерної матриці було проведено при використанні зовнішніх джерел енергії: ІЧ-випромінювання; термічного нагрівання до кінцевої температури 393 К з витримкою протягом 4 год; обробки у полі струмів високої частоти; ступінчастого термічного нагрівання до температури 293 К, 303 К, 323 К, 343 К, відповідно по 10 хв витримка на кожній стадії нагрівання.

Структурування в полі струмів високої частоти проведено з використанням камери надвисокочастотної обробки. Час витримки під час обробки складав від 5 с до 50 с, а під час охолодження – 60-120 с. Потужність електромагнітного випромінювання змінювалась від 25 Вт до 210 Вт.

Твердження епоксиполімерної матриці під дією ІЧ-випромінювання проводили за допомогою нагрівача, що випромінює електромагнітні хвилі ІЧ-спектру. Площа зони випромінювання становила 600 см².

Ступінь твердження епоксиполімерного покриття визначали за вмістом гель-золь-фракції. Метод оснований на здатності частини матеріалу, не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета, який працював в автоматичному режимі.

Розроблені епоксиполімерні покриття досліджували на міцність при стисненні (ГОСТ 4651-82) та ударну міцність.

Експериментально встановлено, що витримка за кімнатної температури протягом 2 год призводить до формування епоксиполімеру з нижчим вмістом гель-фракції, порівняно з епоксиполімерами, що мали витримку 1 год, оскільки при цьому відбувається формування більшої кількості первинних зв'язків, які знижують рухливість сегментів макромолекул і процес подальшого структурування під дією силових полів дещо знижується. Витримка протягом 24 год за кімнатної температури призводить до формування значно більшої кількості первинних хімічних зв'язків порівняно з витримкою 2 год, на що вказує вищий вміст гель-фракції в системі [8].

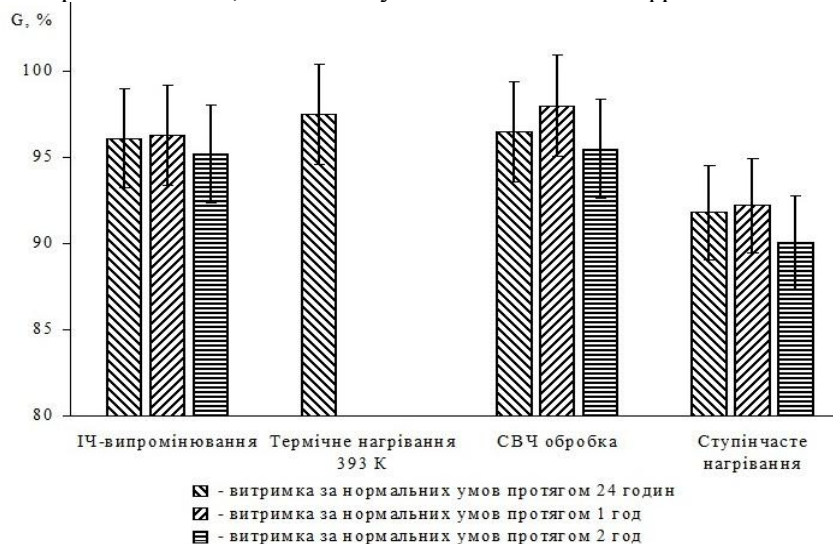


Рис. 1. Залежність вмісту гель-фракції епоксиполімерів від характеру структурування

Найнижчі значення отримано для епоксиполімерів структурованих ступінчастим нагріванням, що вказує на недостатній тепловий вплив, оскільки тепла енергія поступає до внутрішніх шарів за рахунок теплопровідності. Також тривалість теплового впливу є недостатньою для завершення процесів структурування епоксиполімерної системи.

Структурування під дією ІЧ-випромінювання дозволяє сформувати систему з вищим вмістом гель-фракції, порівняно з структуруванням в процесі ступінчастого термічного нагрівання, що вказує на здатність системи утворювати хімічні зв'язки одночасно в усьому об'ємі епоксиполімеру через вищу можливість електоромагнітних хвиль ІЧ спектру проникати в об'єм матеріалу. Експериментально встановлено, що найвищий вміст гель-фракції характерний для епоксиполімерів, що структуровані у полі струмів високої частоти після витримки за нормальних умов протягом 1 год. Це пов'язано з утворенням максимальної кількості хімічних зв'язків та енергетичним впливом, який забезпечив підвищену рухливість сегментів макромолекул в об'ємі матеріалу.

Структурування епоксиполімерів під дією термічного нагрівання за температури 393 К можливе після попередньої витримки протягом 24 год за кімнатної температури, оскільки відбулось формування достатньої кількості первинних зв'язків. Структурування термічним нагріванням після витримки 1 год або 2 год є неможливим через одночасне зниження в'язкості полімеру та підвищення швидкості реакції полімеризації, що призводить до кипіння композиції та утворення пористої структури.

Загальний вигляд зразків після екстрагування (рис.2) підтверджує результати вмісту гель-фракції відповідно до характеру структурування епоксиполімерів. Кількість утворених на поверхні тріщин для зразків епоксиполімерів структурованих термічним нагріванням в полі СВЧ і ІЧ-випромінювання (рис. 2, а, в) вказує на здатність матеріалу чинити опір розчиненню неструктурованої частини системи, що підтверджує кращу структурованість матеріалу. Необхідно відмітити, що матеріал структурований під впливом електромагнітних хвиль ІЧ спектру має менше тріщин порівняно з матеріалом структурованим ступінчасто, оскільки енергія та висока проникна здатність даних хвиль зумовлює інтенсивне та одночасне мікропереміщення сегментів макромолекул у всьому об'ємі полімерної матриці, що дозволяє інтенсифікувати утворення хімічних зв'язків.

Відсутність макротріщин на поверхні епоксиполімерів (рис. 2, б) термічно структурованих за температури 393 К вказує на високий вміст гель-фракції у системі через здатність формувати спочатку хімічні зв'язки на поверхні матеріалу, оскільки передача тепла відбувається за рахунок теплопровідності від поверхневих шарів до внутрішніх.

Експериментально встановлено, що найвищу міцність при стисканні ($\sigma_{ст}=113$ МПа) мають епоксиполімери, які структуровані ступінчастим термічним нагріванням (нагрів до 293 К, 303 К, 323 К, 343 К і 393 К, відповідно з витримкою по 10 хв на кожній стадії) після попередньої витримки на повітрі протягом 1 год (рис. 3). Це пов'язано з тим, що вміст гель-фракції в епоксиполімерах структурованих під час ступінчастого нагрівання є найнижчим, порівняно з іншими способами.

Найнижчі значення міцності при стисканні епоксиполімерів структурованих ІЧ-випромінюванням пояснюється невисоким вмістом гель-фракції. Оптимальною за кімнатної температури є витримка протягом 1 год, що забезпечує підвищення межі міцності при стисканні.



а



б

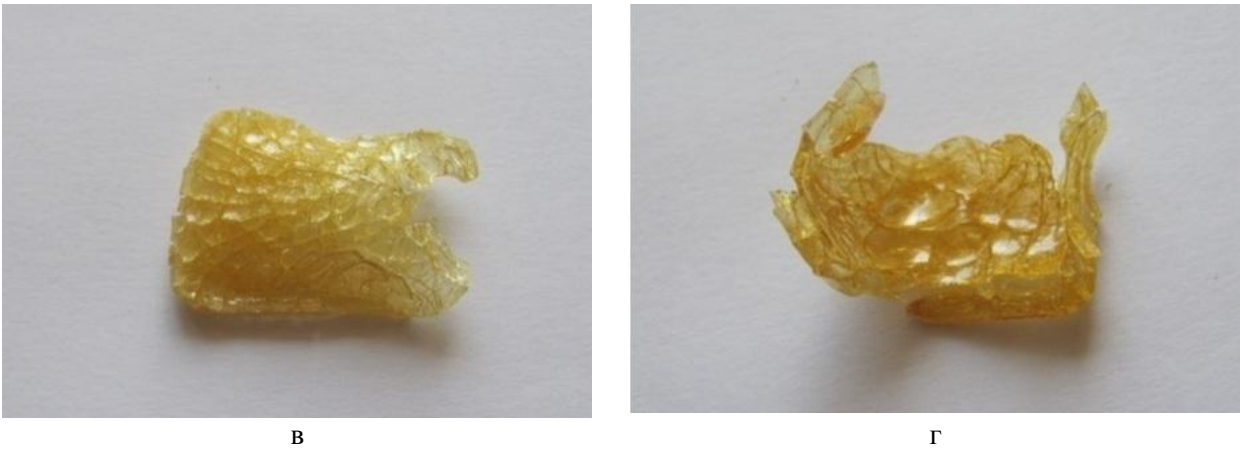


Рис. 2. Загальний вигляд епоксикомпозитів після екстрагування структурованих під дією: а – ІЧ-випромінювання; б – термічного нагрівання ($t_{\text{кін}}=393\text{ K}$); в – СВЧ обробки; г – ступінчастого нагрівання

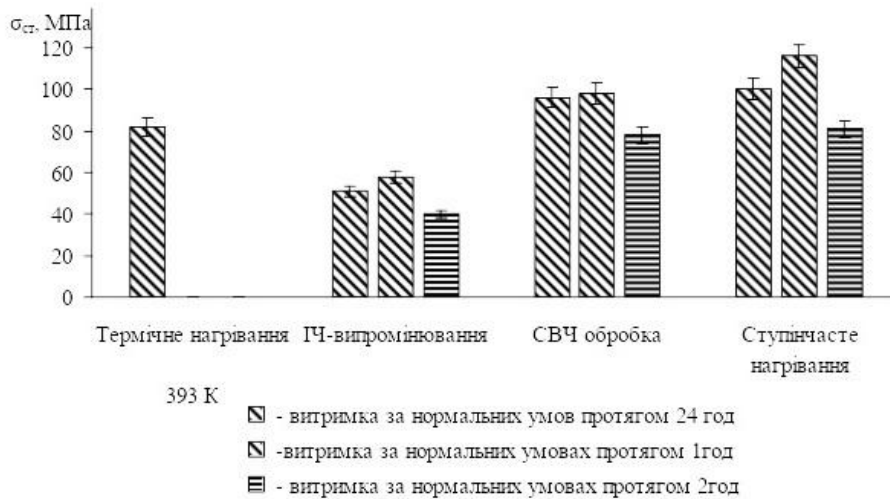


Рис. 3 Залежність межі міцності епоксиполімерів при стисканні від характеру структуризації

В результаті система характеризується підвищеною в'язкістю, що спричиняє зміну крихкого руйнування епоксиполімеру на в'язке. При цьому зразок пластично деформується без поширення тріщин, що підвищує максимальне зусилля перед руйнуванням.

Епоксиполімери структуровані термічним нагріванням характеризуються вищою межею ударної міцності (рис. 4) порівняно з епоксиполімерами, що формувались під час СВЧ обробки та ІЧ-випромінювання. Попереднє структуривання епоксиполімерів за кімнатної температури протягом 1 год також додатково відіграло позитивну роль у підвищенні ударної міцності.

Найвищі значення ударної міцності для епоксиполімерів структурованих ступінчастим нагріванням пов'язані із підвищеним вмістом гель-фракції у системі, яка здатна поглинати енергію динамічних навантажень.

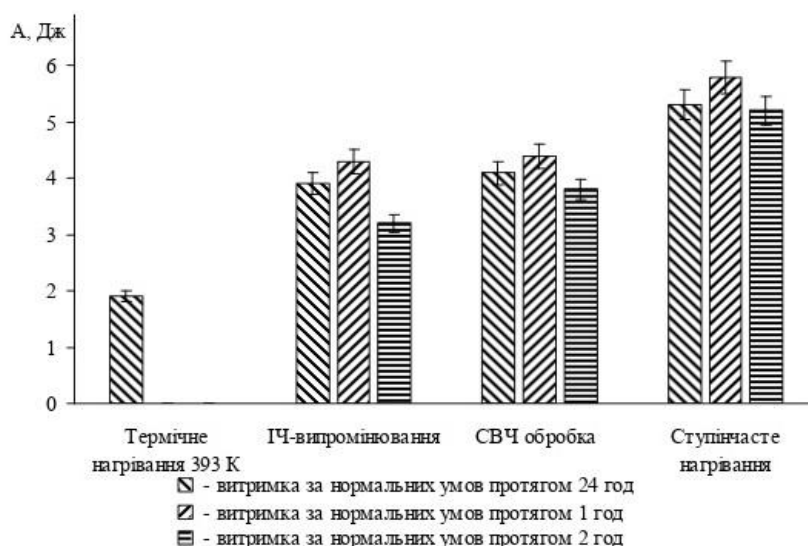


Рис. 4 Залежність ударної міцності епоксиполімерів від характеру структури

Також експериментально підтверджено, що інтенсивне структуривання під час термічного нагрівання призводить до формування епоксиполімерів з найнижчими значеннями ударної міцності, через високі внутрішні напруження системи, оскільки формування структурної сітки відбувається нерівномірно.

В процесі впливу енергетичних полів відбувається інтенсивне поглинання енергії та її локалізація, що зумовлює випаровування летких складових композиції. Підвищена температура зумовлює зростання швидкості реакцій полімеризації, в результаті чого зростає в'язкість системи та відбувається блокування газових включень в об'ємі матеріалу, що призводить до утворення пористої структури об'ємних зразків.

За потужності електромагнітного поля 190 – 210 Вт структуривання епоксиполімерів відбувається на 75 – 80%. Встановлено, що у полі СВЧ процес формування сітчастого епоксиполімеру відбувається значно швидше, ніж у термічному полі. Структуривання під дією ІЧ-випромінювання дозволяє сформувати систему з вищим вмістом гель-фракції, порівняно з структуриванням в процесі ступінчастого термічного нагрівання, що вказує на здатність системи одночасно утворювати хімічні зв'язки в усьому об'ємі епоксиполімеру через високу здатність електророманітних хвиль ІЧ-спектру проникати в об'єм матеріалу.

В подальшому планується провести дослідження комплексного впливу енергетичних полів на дослідження структури та напружень, які виникають в епоксиполімерах при даних способах структуривання.

Література.

1. Ultraski L.A. Polymer alloys and blends: thermodynamic and rheology / L.A. Ultraski. – Munich: Hanser, 1989. – 318 p.
2. Berlin A.A. Printsipyi sozdaniya kompozitsionnykh polimernykh materialov / A.A. Berlin, S.A. Volfson, V.G. Oshmyan, N.S. Enikolopov. – M.: Himiya, 1990. – 240 s.
3. Polimerni kompozitsyni materialy v raketno-kosmichny tekhnik: Pidruchnik / [Dzhur E.O., Kuchma L.D., Manko T.A. ta In.] – K.: Vischa osvita, 2003. – 399 s.
4. Buketov A.V. Zakonomirnost' vplivu obrobki energetichnimi polyami zv'yazuyuchogo i napovnyuvachiv na vlastivost' epoksikompozitnih materialiv dlya zahisnih pokryt'iv: dis. d-ra tehn. nauk: 05.02.01 / A.V. Buketov – Ternopil: TDTU, 2007. – 337 s.
5. Knyazev V.K. Epoksidnyie konstruktsionnyie materialy v mashinostroenii / V.K. Knyazev. – M.: Himiya, 1987. – 392 s.
6. Stuhlyak P.D. Epoksidnyie kompozityi dlya zaschitnykh pokryt'iy / P.D. Stuhlyak. – Ternopol: Zbruch, 1994. – 177 s.
7. Buketov A.V. Fiziko-himichni protsesi pri formuvanni epoksikompozitnih materialiv / Buketov A.V., Stuhlyak P.D., Kalba E.M. – Ternopil: Zbruch, 2005. – 182 s.
8. Boyarska I.V. Zastosuvannya metodiv Intensifikatsiyi protsesiv strukturuvannya dlya keruvannya vlastivostyami epoksikompozitiv: dis. k-ta tehn. nauk: 05.02.01 – "Materialoznavstvo" / I.V. Boyarska – Lutsk: Lutskiy NTU, 2016. – 184 s.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

О.Л. Садова, В.П. Кашицький, О.В. Заболотний, С.М. Щеглов, С.Л. Янчук

Луцький національний технічний університет

ІНТЕНСИВНЕ СТРУКТУРУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ ПІД ЦИКЛІЧНИМ ВПЛИВОМ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ

Досліджено вплив температури та тривалості витримки в тепловому полі на процеси структурування та механічні характеристики епоксиполімерів. Визначено оптимальний режим попередньої термічної обробки виробів на основі епоксиполімерів, формування яких відбувається в умовах підвищених температур. Встановлено вплив циклічності нагрівання та охолодження на формування структури та властивості епоксиполімерів.

Ключові слова: ударна в'язкість, вузли зшивання, полімерна сітка, релаксація, макромолекули, залишкові напруження.

О.Л. Садовая, В.П. Кашицкий, О.В. Заболотный, С.Н. Щеглов, С.Л. Янчук

ІНТЕНСИВНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЕПОКСИПОЛИМЕРОВ ПОД ЦИКЛИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ

Исследовано влияние температуры и продолжительности выдержки в тепловом поле на процессы структурирования и механические характеристики эпоксиполимеров. Определен оптимальный режим предварительной термической обработки изделий на основе эпоксиполимеров, формирование которых происходит в условиях повышенных температур. Установлено влияние цикличности нагрева и охлаждения на формирование структуры и свойства эпоксиполимеров.

Ключевые слова: ударная вязкость, узлы сшивания, полимерная сетка, релаксация, макромолекулы, остаточные напряжения.

O. Sadova, V. Kashytskyi, O. Zabolotnyi, S. Shcheglov, S. Yanchuk

THE INTENSE STRUCTURING OF EPOXY POLYMERS UNDER THE CYCLIC INFLUENCE OF THE THERMAL FIELD

The influence of temperature and duration of exposure in thermal field on the processes of structuring and mechanical characteristics of epoxy polymers has been studied. The optimal mode of pre-heat treatment of products on basis of epoxy polymers, the formation of which occurs in conditions of elevated temperatures, has been determined. The influence of cyclicity of heating and cooling on formation of structure and properties of epoxy polymers has been established.

Keyword: impact viscosity, crosslinking knots, polymer mesh, relaxation, macromolecules, residual tensions.

Властивості полімеркомпозитних матеріалів залежать від характеристик полімерного в'язучого, яке повинно забезпечувати формування конфігурації виробу та міцність поліфазної системи. Серед спектру реактопластичних полімерів значну популярність отримали епоксидні смоли, які вирізняються високою адгезійною міцністю до багатьох конструкційних матеріалів, малою усадкою та високою технологічністю. Суттєвим недоліком даних полімерів є тривалий час переходу олігомера в твердий стан, який складає приблизно одну або дві доби. Даний момент в умовах серійного та масового виробництва є не вигідним з економічної точки зору. Тому для інтенсифікації процесів структурування застосовують теплову обробку, яка повинна займати мінімальний час. В промисловості класичні технології структурування полімеркомпозитних матеріалів на основі реактопластів передбачають нагрівання виробів з конвективним способом підведенням тепла. Даний метод дозволяє отримати деталі з полімеркомпозитних матеріалів, однак є довготривалим та потребує значних енерговитрат.

Висока тривалість процесу нагрівання обумовлена необхідністю досягнення рівномірного розподілу температури в об'єму матеріалу, що призводить до значного зростання собівартості виробів. Крім того, у випадку нагрівання матеріалу з низькою теплопровідністю зовнішнім джерелом теплоти виникає ситуація, коли в зовнішніх шарах ініціюються процеси тверднення, а внутрішні шари ще не досягли енергетичного порогу початку процесу полімеризації. В подальшому тепловий вплив забезпечує формування полімерної сітки в середині виробу, а периферійні зони при цьому отримують надлишкову теплову енергію, яка викликає появу залишкових напружень або деструкцію полімеру.

Тому постає задача дослідження впливу параметрів термічної обробки на формування виробів на основі реактопластів та розробки оптимального режиму інтенсивного структурування полімерів з можливістю релаксації залишкових напружень в процесі структурування, що забезпечить високу довговічність та надійність виробів на основі реактопластичних матриць.

Отримання виробів на основі термореактопластів полягає в пресуванні під невеликим тиском за підвищених температур [1]. При цьому в результаті полімеризації або поліконденсації

олігомери перетворюються в полімери сітчастої будови, що пов'язано із зменшенням рухливості елементів сітки полімеру. Понижена рухливість окремих ділянок макромолекул ускладнює проходження релаксаційних процесів, що призводить до появи у даних ділянках залишкових напружень [2], які негативно позначаються на характеристиках міцності виробу. Водночас при дослідженні молекулярної рухливості епоксидних композитів встановлено, що при великих ступенях зшивання вони стають достатньо жорсткими полімерами, що погіршує їх фізико-механічні властивості [3, 4] через збільшення часу релаксації напружень при дії зовнішнього силового поля.

В роботах [5-7] значна увага приділяється температурно-часовим режимам тверднення композитів на основі епоксидних смол. Термічна обробка при температурах склування 60-120 °С призводить до зменшення вільного об'єму між макромолекулами в епоксиолімерах, що супроводжується обмеженням молекулярної рухливості і зміною числа конформаційного набору ланцюгів макромолекул.

В роботах [8, 9] основна увага акцентована на процесах додаткового структурування епоксикомпозитів за ступінчастим температурно-часовим режимом. При цьому створюються необхідні для конформаційного перетворення сприятливі умови на початковій стадії реакції, а структурування прискорюється у результаті підвищення температури на кінцевому етапі. Отримані за ступінчастим режимом епоксидні полімери мають розвинуту тривимірну сітчасту структуру, внаслідок чого для них характерна підвищена термостійкість та ударна в'язкість [10]. Ступінчасте або повільне охолодження затвердлених полімерів забезпечує значне зниження залишкових напружень у результаті їх релаксації і перегрупування надмолекулярних структур.

Дані дослідження стосуються процесів додаткового структурування епоксикомпозитів попередньо сформованих за нормальних умов і, відповідно, постає задача визначення впливу температур та тривалості витримки на фізико-механічні властивості епоксикомпозитів структурованих відразу після процесу поміщення композиції у форму.

Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), що представляє собою високов'язку прозору рідину. Масова доля епоксидних груп складає 20,0-22,5%, летких речовин – 0,2-0,8%. Можливість тверднення цієї смоли без виділення побічних продуктів забезпечує незначну пористість і високу щільність матеріалів. Для тверднення епоксидних композицій застосовували поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70), який призначений для структурування епоксидних смол при кімнатній та знижених температурах в умовах підвищеної вологості.

Твердість матеріалу за методом Брінеля визначали за ГОСТ 1786-80. Дослідження проводили на зразках у формі бруска з гладкою поверхнею товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. При дослідженні стальну кульку діаметром 10 мм втискували в поверхню досліджуваного матеріалу з навантаженням 2,5 кН протягом 60 с.

Ударну в'язкість визначали за ГОСТ 4647-80. Зразки прямокутної форми з квадратним поперечним перерізом 10x10 мм і довжиною 60 мм піддавали динамічному навантаженню на маятниковому копрі з кутом зарядки 160°.

Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції. Метод оснований на здатності частини матеріалу (плівки), не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета, який працював в автоматичному режимі [11]. Екстракцію зразків у формі пластин розміром 40x70 мм товщиною до 0,5 мм проводили в ацетоні протягом 8 год з наступним сушінням при температурі 120 °С до постійної маси.

Структурування епоксиолімерів без витримки за температури 18-22 °С умов та без охолодження між етапами нагрівання призводить до інтенсивного нагрівання поверхневих шарів композиції, в результаті чого відбувається вспінювання (рис. 1, а) та утворення пористої структури. Вирішення даної проблеми полягало у застосуванні стадії охолодження після етапу нагрівання, що дозволяло знизити надлишкову кількість теплової енергії в всередині матеріалу та отримати епоксиолімери без дефектів структури (рис. 1, б).



Рис. 1. Загальний вигляд зразків епоксиполімерів без охолодження між циклами (а) та неповним охолодження (б)

Тверднення композицій на основі епоксиполімерів проведено за умови використання ступінчастого термічного нагрівання без витримки при досягненні максимальної температури на кожному етапі та без витримки на кожній стадії охолодження.

На першому етапі досліджено вплив швидкості нагрівання на механічні характеристики епоксиполімерів, структурування яких здійснено за 5 циклами (рис. 2).

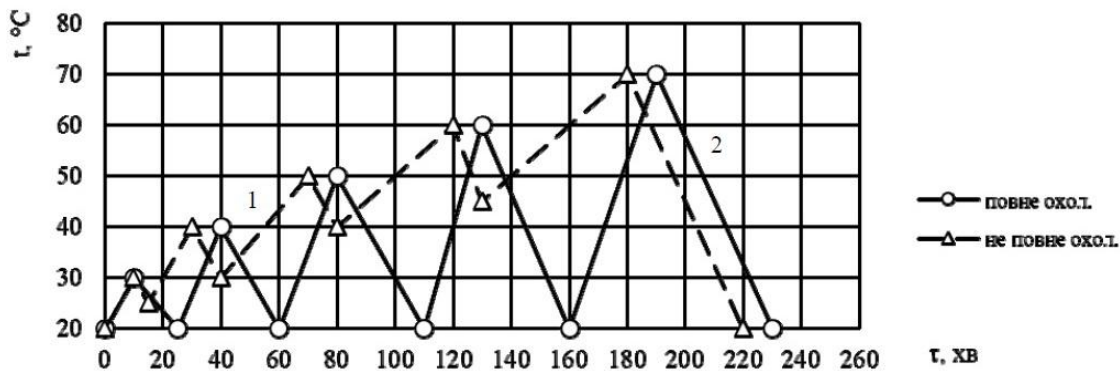


Рис. 2. Термограма процесу попередньої термічної обробки епоксиполімерів за 5-ти ступінчастим циклом нагрівання та охолодження

З метою скорочення загальної тривалості обробки епоксиполімерів у тепловому полі, що має практичну доцільність при розробці технологічного процесу формування виробів на виробництві, визначено наступні режими структурування епоксиполімерів за трьома (рис. 3) та двома (рис. 4) циклами термічної обробки з різними швидкостями нагрівання та способами охолодження.

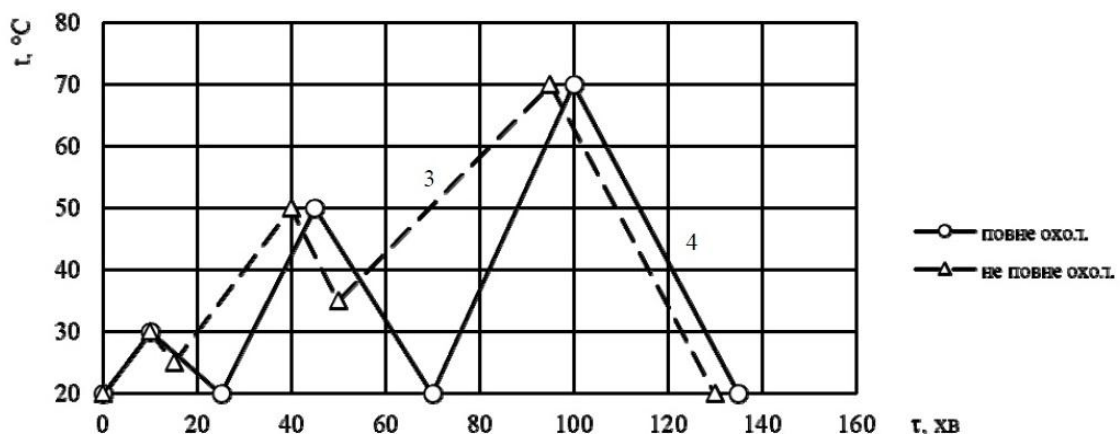


Рис. 3. Термограма процесу попередньої термічної обробки епоксиполімерів з 3-х ступінчастим циклом нагрівання та охолодження

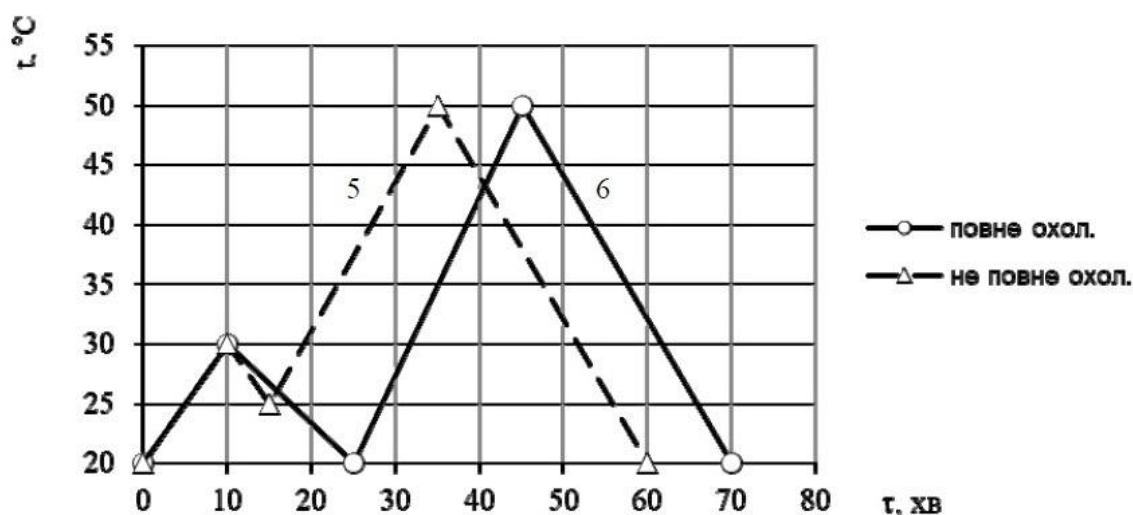


Рис. 4. Термограма процесу попередньої термічної обробки епоксиполімерів з 2-х ступінчатим циклом нагрівання та охолодження

Структурування епоксиполімерів з повним охолодженням до температури 18-22 °С призводить до зупинки релаксаційних процесів в полімерній сітці та відновлення інтенсивної рухливості сегментів макромолекул на наступному етапі нагрівання (рис. 5). Це спричиняє розвиток деструктивних процесів, що пов'язані з руйнуванням окремих зв'язків або утворенням мікротріщин. При цьому опір поверхневих шарів статичному навантаженню знижується, особливо при структуруванні за режимом № 2, оскільки тривалість процесу тверднення є нижчою порівняно з режимом № 1 і, відповідно, кількість вузлів звивання є меншою. Максимальні значення твердості отримано в результаті проведення термічної обробки за режимом № 3, де максимальна температура складала 50 °С, що забезпечує оптимальну кількість теплової енергії необхідної для структурування епоксиполімерів.

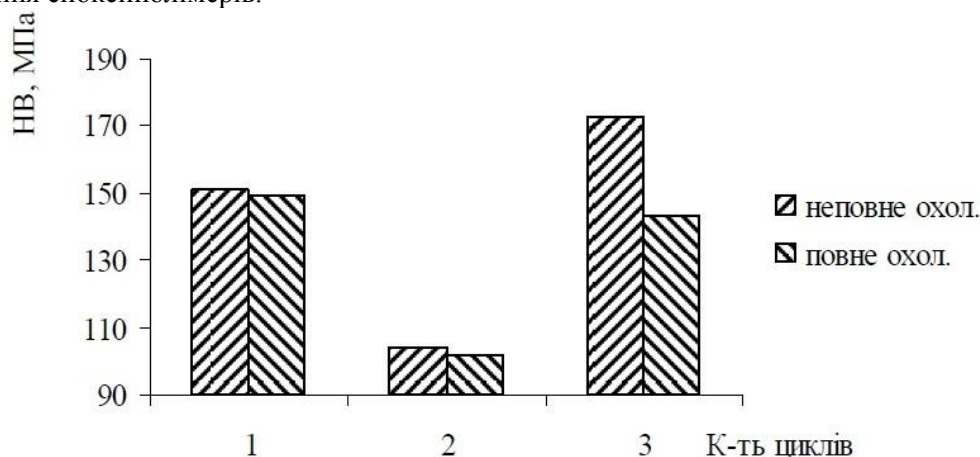


Рис. 5. Залежність твердості епоксиполімерів від режиму охолодження (неповне охолодження – режим 1, 3, 5), повне охолодження – 2, 4, 6) та кількості циклів: 1 – 5 циклів; 2 – 3 цикли; 3 – 2 цикли

Режими термічної обробки № 1 та № 2 не забезпечують підвищення ударної в'язкості епоксиполімерів, оскільки температура 70 °С на початковому етапі термічної обробки призводить до інтенсивного накопичення теплової енергії в об'ємі полімеру, яка через низьку теплопровідність не відводиться з системи і спричиняє появу дефектів у вигляді порожнин округлої форми різного діаметру. Стійкість до динамічних навантажень епоксиполімерів, структурованих за режимом № 2 дещо знижується, оскільки тривалість витримки є недостатньою для формування максимальної кількості вузлів зшивання.

Зростання ударної міцності на 30-40 % пов'язано з структуруванням епоксиполімерів за температури 50 °С, яка забезпечує більш рівномірне надходження теплової енергії від периферійних зон до центра зразка, в результаті чого формується структура без дефектів. Зниження напруженого стану відбувається за рахунок стадії охолодження, яка забезпечує

релаксацію залишкових напружень, оскільки знижується швидкість реакції утворення хімічних зв'язків та присутня достатня сегментна рухливість макромолекул епоксиполімеру.

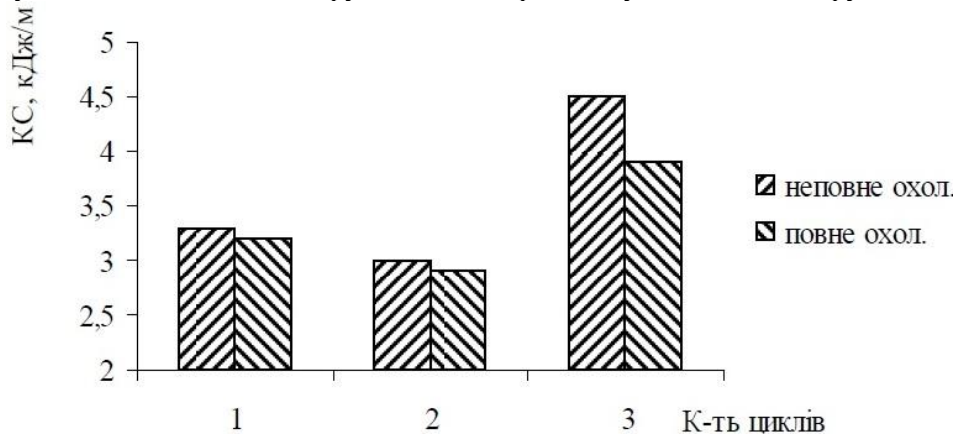


Рис. 6. Залежність ударної вязкості епоксиполімерів від режиму охолодження (неповне охолодження – режим 1, 3, 5), повне охолодження – 2, 4, 6) та кількості циклів: 1 – 5 циклів; 2 – 3 цикли; 3 – 2 цикли

Експериментально встановлено, що оптимальний режим попередньої термічної обробки епоксиполімерів складається з двох циклів поетапного нагрівання до температури 30 °С на першому етапі та 50 °С на другому етапі з охолодженням до температури 25 °С після першого етапу нагрівання. Підвищення механічних характеристик на 12-35 % відбувається через зниження температури нагрівання на початковому етапі термічної обробки, яка спричиняє інтенсивне структурування епоксиполімерів з нерівномірним розподілом хімічних зв'язків, що спричиняє появу концентраторів напружень у вигляді порожнин та тріщин. Застосування стадії охолодження між циклами нагрівання дозволяє знизити кількість теплової енергії та забезпечити більш рівномірний розподіл вузлів зшивання в епоксиполімерній матриці. Напружений стан в епоксиполімері можливо знизити завдяки неповному охолодженню епоксиполімеру, оскільки відбувається релаксація залишкових напружень в об'ємі полімеру при умові зниження інтенсивності теплового впливу.

В подальшому планується провести дослідження впливу витримки на кожному етапі нагрівання на формування структури та фізико-механічні характеристики епоксиполімерів та епоксикомпозитів.

Література.

1. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А.А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 248 с.
2. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Кальба Є.М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
3. Стухляк П. Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / Стухляк П. Д., Букетов А. В., Добротвор І. Г. – Тернопіль: Збруч. – 2008. – 208 с.
4. Технология полимерных материалов / под. ред. В. К. Крыжановского. – СПб: Профессия, 2008.
5. Стухляк П.Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.
6. Волосков Г.А., Липская В.А., Бабич Т.С., Солоницина В.А. Влияние режимов отвержения на механические свойства эпоксиполимеров // Пластические массы. – 1981. – №3. – С. 42-43.
7. Савчук П.П. Розробка композиційних антифрикційних матеріалів на основі епоксидних смол, неорганічних наповнювачів для динамічно навантажених вузлів тертя: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.01 – Тернопіль: ТДПУ, 1999. – 18 с.
8. Носков А.М., Новиков Н.И. Влияние режима отвержения эпоксидных олигомеров на их стойкость к окислительному термостарению // Пластические массы. – 1981. – №7. – С. 33.
9. Билым П.А., Попова Н.Г., Костыркина И.А., Печенко К.П. Структурно-механические свойства эпоксиполимера, отверженного в различных режимах // Пластические массы. – 1987. – №9. – С. 28-29.
10. Микитишин А.Г. Розробка технології та дослідження параметрів формування виробів з епоксинаповнених виробів: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.01 – Тернопіль: ТДТУ, 2002. – 20 с.
11. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1988. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК 37.014.53:001.8

В.В. Скідан¹, Є.О. Романюк¹, Г.В. Єфімчук²*Київський національний університет технологій та дизайну¹**Луцький національний технічний університет²***ДО ПИТАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ АКАДЕМІЧНОЇ ДОБРОЧЕСНОСТІ В
ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС**

У статті проаналізовано ставлення освітньої та наукової спільноти до питання академічної доброчесності, її імплементації в учбовий процес закладів вищої освіти України. Також представлено результати опитування щодо методів боротьби з академічним плагіатом та оцінки наукових робіт на оригінальність.

Ключові слова: академічна доброчесність, плагіат, академічний плагіат, освітній процес.

В.В. Скидан¹, Е.А. Романюк¹, Г.В. Ефимчук²*Киевский национальный университет технологий и дизайна¹**Луцкий национальный технический университет²***К ВОПРОСУ ВНЕДРЕНИЯ ПРИНЦИПОВ АКАДЕМИЧЕСКОЙ ЧЕСТНОСТИ В
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС**

В статье проанализировано отношение образовательной и научной общественности к вопросу академической честности, ее имплементации в учебный процесс высших учебных заведений Украины. Также представлены результаты опроса о методах борьбы с академическим плагиатом и оценки научных работ на оригинальность.

Ключевые слова: академическая честность, плагиат, академический плагиат, образовательный процесс.

V. Skidan¹, Y. Romaniuk¹, G. Yefimchuk²*Kyiv National University of Technology and Design¹**Lutsk National Technical University²***TO THE QUESTIONNAIRE OF PRINCIPLES OF ACADEMIC INTEGRITY
IN THE EDUCATIONAL PROCESS**

The article analyzes the attitude of the educational and scientific community to the issue of academic integrity. Problems of the implementation of the principles of academic integrity in the educational process of institutions of higher education of Ukraine are also exacerbated. The results of the survey on methods of combating academic plagiarism and the evaluation of scientific works on originality are presented. A series of events aimed at popularizing the principles of academic integrity is proposed and the feasibility of using anti-plagiarism programs in the educational process is substantiated.

Key words: academic integrity, plagiarism, academic plagiarism, educational process.

Постановка проблеми. Питання академічної доброчесності є дуже актуальним для України. Адже недопустимою є ситуація, коли наукові роботи (від курсових до докторських) виконуються на замовлення за гроші, коли студентські роботи передаються від курсу до курсу лише зі зміненими титульними сторінками, коли у наукових текстах перефразовують чужі думки та видаються за власні без посилання на їх справжнього автора, коли метою наукового дослідження є не нове наукове знання, а отримання вченого ступеню, і цей ряд можна продовжити. І абсолютно недопустимим є те, коли в суспільстві такий стан справ приймається за норму. Академічна культура включає усвідомлення кожним членом університетської спільноти – викладачем, студентом, адміністративним працівником – свого місця і обов'язків в загальному функціонуванні ЗВО; цінності і норми поведінки; звичаї та ділову практику; правила корпоративної культури; трудову і ділову етику.

Сьогодні через необхідність виконання великого обсягу письмових (для студентів) або науково-дослідних робіт (для науково-педагогічних працівників), відсутність чітких норм щодо оцінки оригінальності текстів, її зв'язку з оцінкою граматики письмової роботи, а також відкритість доступу до інформації, можливість швидкого її поширення через мережу питання боротьби з плагіатом є надзвичайно актуальним. Академічна нечесність – це корозія на живому організмі університету, а тому байдужність, апатія стосовно питань академічної нечесності не є нормальною поведінкою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародний центр академічної доброчесності при Ратлендському інституті етики, Університет Клемсон в Південній Кароліні, розробив документ «Фундаментальні цінності академічної доброчесності». За цим підходом, академічна доброчесність – це відданість академічної спільноти, та відповідність шести фундаментальним цінностям: чесності, довірі, справедливості, повазі, відповідальності й мужності [1].

Останні декілька років українська наукова та освітня спільнота все більше звертається до питань академічної доброчесності та впровадження міжнародних академічних стандартів. Американські ради з міжнародної освіти спільно з Міністерством освіти і науки України розпочали Проект Сприяння академічній доброчесності в Україні (Strengthening Academic Integrity in Ukraine Project – SAIUP) – це ініціатива, спрямована на системні зміни в українській вищій освіті: підвищення якості, створення умов для реалізації найбільш обдарованих студентів, покращення іміджу українських університетів [2]. Метою Проекту є донести до університетської спільноти значення академічної доброчесності і наслідки недотримання її постулатів.

Проект розрахований на 4 роки – це дозволить охопити ціле покоління студентів-бакалаврів, починаючи з їх першого року навчання в університеті і закінчуючи отриманням дипломів бакалавра. Саме це покоління випускників повинно стати носієм нових цінностей у вищій освіті, в науці та в суспільстві загалом.

Проект має чотири основні напрямки діяльності: просвітницька кампанія, практичний навчальний курс в університетах, поширення міжнародних практик в українських університетах, робота над нормативною базою і регулятивними механізмами.

У рамках Проекту на всеукраїнському та університетських рівнях регулярно проводяться заходи як для студентської, так і для викладацької спільноти. Зокрема, відбуваються тренінги із формування знань та навичок щодо планування, розробки та впровадження проектів з академічної доброчесності в університетах [3]. Використовуючи кращий досвід американських університетів, учасники виконують ситуативні вправи для розуміння принципів академічної доброчесності, знайомляться з сучасними засобами перевірки дипломних та інших робіт на плагіат, методами заохочення молоді до доброчесного навчання. Також читаються лекції [4-6], під час яких увага зосереджується на важливості Проекту для процесу навчання і повсякденного життя, видах академічної недоброчесності, їх наслідках для суспільства та інших актуальних питаннях.

Одним із інструментів дотримання академічної чесності є Кодекс честі, який приймають університети. Кодекс честі – це документ, який встановлює загальні моральні принципи та правила етичної поведінки осіб, що працюють і навчаються у ВНЗ. Метою Кодексу є формування в Університеті системи демократичних взаємин з високим ступенем етичної гідності між учасниками освітнього процесу і співробітниками та розвиток корпоративної культури університетської громади.

На сьогоднішній день все більше університетів прислухається до Проекту, приймаються Кодекси академічної доброчесності. Не виключенням є Київський національний університет технологій та дизайну (Кодекс честі ухвалено Вченою радою КНУТД від 07 березня 2018 р., протокол № 7) [7] та Луцький національний технічний університет (Кодекс честі ухвалено Вченою радою Луцького НТУ від 24 квітня 2018 р., протокол № 9) [8].

Постановка завдання. Лише сприйняття суспільством, усіма учасниками освітнього та наукового процесів принципів академічної доброчесності як глибинних цінностей є запорукою того, що українська освіта та наука позбудуться імітації, народжуватимуть нові ідеї та знання і будуть рівноправно включені у світовий процес наукової комунікації.

Об'єкти та методи дослідження. З метою визначення ступеня ознайомлення студентів та викладачів з сучасними вимогами оцінки робіт на оригінальність та виявлення їхнього ставлення до проблеми, що розглядається, у листопаді-грудні 2018 року серед студентів, аспірантів та викладачів двох ЗВО (Київського національного університету технологій та дизайну та Луцького національного технічного університету) було проведено опитування на тему «Плагіат. Норма чи шахрайство?». Участь в опитуванні взяли викладачі, аспіранти, та студенти.

Опитування було проведено у формі інтернет-анкетування з використанням загальнодоступного ресурсу Google Forms з умовою збереження анонімності. Інструмент дозволяє створювати та розсилати запрошення до анкетування на електронні адреси та сторінки соціальних мереж потенційних респондентів. Збереження результатів у форматі електронних таблиць дозволило провести аналіз та візуалізацію результатів у формі діаграм у середовищі MS Office [9].

Для формування питань та підбору відповідей, що відображають реальне ставлення респондентів до проблеми, було проведено попереднє опитування та аналіз, на основі якого було сформовано короткі, подані у доступній формі питання [10]. Для відповіді можна було обрати один чи декілька варіантів або запропонувати свій.

Ціллю опитування було не лише визначити ступінь ознайомлення з деякими основними вимогами кодексів академічної доброчесності, але й готовність до власної відповідальності за використання запозичень у своїх роботах без відповідного посилання на авторство. Для проведення

опитування було обрано спосіб вибіркового дослідження, який дозволив обрати з генеральної сукупності представників.

Анкету було сформовано з восьми коротких та легких для сприйняття пересічним респондентом питань. Вона містила коротку інформацію як про самих респондентів, так і про їх ставлення до плагіату у власних роботах та готовності до відповідальності. Відповіді на питання містили номінативні шкали.

Респондентам було запропоновано відповісти на такі питання:

- хто Ви (студент, викладач, аспірант), Ваш вік?
- чи знайомі Ви з поняттями «плагіат» та «академічний плагіат»?
- чи використовуєте Ви чужі праці для написання власних (без посилання на автора)?
- чи вважаєте Ви допустимим використання в своїх роботах запозичених праць без посилань на автора або джерело?
- чи треба контролювати роботи на плагіат та впроваджувати відповідальність?
- хто та яку відповідальність має нести за плагіат у студентських роботах?

Усі питання носили функцію обов'язкових для відповіді. У фінальній частині тесту було запропоновано висвітлення особисту думку.

Виклад основного матеріалу.

Вищезгаданими закладами вищої освіти реалізовано ряд проектів, спрямованих на популяризацію академічної доброчесності в освітньому товаристві. Зокрема, розроблено буклет-календар «Правила академічної доброчесності першокурсника», який поданий у формі річного календаря з використанням ігрового елементу рор-ап (календар) та правилами-порадами доброчесності (їх подано у ігровій формі з емоційним забарвленням). Ці правила отримує кожен студент при вступі до ЗВО.

Також здійснено інформаційно-просвітницьку кампанію серед студентів «Щеплення від плагіату», в рамках якої проведено 8 воркшопів, що містили коротку теоретичну інформацію про плагіат, види та вид відповідальності для студентів, основи академічного письма та виконання індивідуальних і групових вправ.

До реалізованих проектів також можна віднести проект SAIUP MOTIVATION CARDS, спрямований на спонукання людей до втілення власних ідей шляхом мотивування висловами відомих людей. Новий день – нова картка – нова можливість розпочати власну справу чи проект.

«Стікери доброчесності» – ще один, але не останній проект соціальної дії, що спрямований на учасників навчально-виховного процесу Луцького НТУ, метою якого є зміна їх поглядів на академічну доброчесність шляхом непрямого впливу на свідомість засобами візуалізації. Оригінальний дизайн та вдалий лозунг-заклик, який спонукає до дотримання принципів академічної доброчесності, стали основними критеріями оцінювання розроблених стікерів для визначення переможців.

Аналіз отриманих результатів опитування представлений на рис 1. Вік респондентів складав від 16 до 60 років.

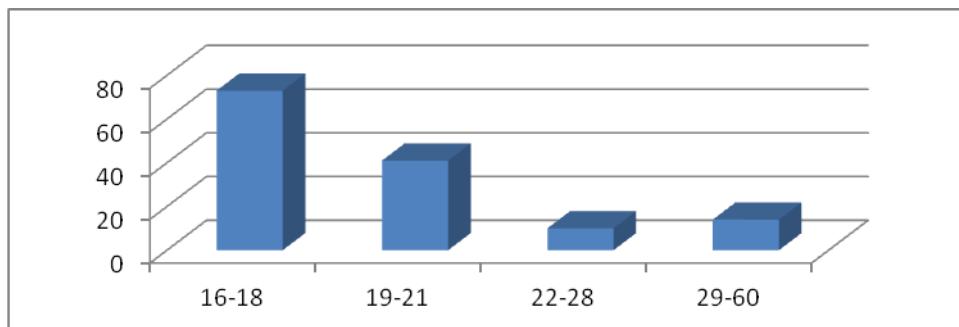


Рис. 1. Розподіл респондентів за віком

Всі респонденти зазначили, що знайомі з поняттям плагіату, та майже 53% опитуваних знайомі з поняттям академічного плагіату. Слід зауважити, що відсоток респондентів, знайомих із терміном «академічний плагіат», зростає зі збільшенням вікового показника: від 42% для респондентів 16-17 років до 65% – для респондентів 22-60 років.



Рис. 2. Діаграма розподілу відповідей респондентів на запитання «Чи використовуєте Ви чужі праці для написання своїх (без посилання на автора)»

Цікавим є, що для написання своїх робіт, у тій чи іншій мірі використовуються чужі доробки без посилання на авторство чи джерело: від 86% студентів молодших курсів (16-18 років) до 79% студентів старших курсів (19-21 рік). При цьому цей же показник для вікового показника 22-60 років складає 91%. А більша половина респондентів (69,9%) вважає допустимим використання в своїх роботах запозичення чужих праць без посилань на автора або джерело, в тому числі залежно від виду робіт (рис.3).



Рис. 3. Діаграма розподілу відповідей респондентів на запитання «Чи вважаєте Ви допустимим використання в своїх роботах запозичених праць без посилань на автора або джерело?»

Більше половини респондентів вказує на необхідність проведення контролю на плагіат студентських робіт. А відповідальність за використання чужих доробок у своїх дослідженнях покладають на студента 77% опитаних, а на викладача чи керівника роботи – 25%.

Важливим є те, що більше 90% респондентів виступають за введення відповідальності студентів за плагіат, порушення авторських прав та посягання на інтелектуальну власність інших осіб у формі попередження, а при повторному випадку – накладання штрафних санкцій (наприклад, зниження балу).

Оскільки плагіат у студентському середовищі становить загрозу з цілої низки причин, зокрема він не сприяє розвитку креативного мислення й творчих здібностей, спотворює реальну картину знань, вмінь і навичок, ускладнює процес оцінювання результатів, призводить до виникнення недобросовісної конкуренції у студентському та науковому середовищі, то це явище вкрай негативно сприймається світовою науковою спільнотою, а отже, його поширення створює перешкоди ефективній інтеграції у міжнародне освітнє й наукове середовище.

Тому доцільним є використання закладами вищої освіти технічних засобів, які створюють умови для швидкого виявлення плагіату. На сьогодні існує ряд програмних засобів та онлайн інтернет-сервісів, які використовують технології перевірки текстових документів на наявність запозичень із загальнодоступних мережевих джерел, такі як система світового рівня Turnitin (перевіряє текст на унікальність за допомогою своєї бази дипломних робіт, авторських текстів, монографій тощо, та у разі відсутності даного тексту в своїй базі доповнює ним базу, створюючи тим самим досить прості умови для виявлення джерел оригінального тексту), Advego Plagiatus (безкоштовна інтернет-програма перевірки дослідницьких робіт на унікальність та наявність в них

плагіату), Etxt Антиплагіат (програма для перевірки унікальності тексту, яка дозволяє провести детальний аналіз тексту і визначити оригінальність статті в процентному співвідношенні), Anti-Plagiarism (універсальний інструмент для боротьби з World Wide Web копіюванням-вставкою інформації з присвоєнням авторства).

Використання зазначених чи аналогічних програм при перевірці випускних кваліфікаційних студентських, науково-дослідних, дисертаційних робіт значно підсилило б якість освіти загалом і наукових досліджень зокрема. Так, у КНУТД використовується програма для перевірки тексту на унікальність – Anti-plagiarism.lnk, базове наповнення якої пов'язане з каталогом повнотекстових видань бібліотеки та доповнюється кожною новою роботою. Але подібними програмами на сьогодні зазвичай перевіряють лише випускові роботи.

Висновки.

На думку авторів, для забезпечення впровадження принципів академічної доброчесності в освітнє та наукове середовищі необхідно здійснювати заходи, спрямовані на її популяризацію. Окрім реалізації згаданих проєктів, проведення лекцій та тренінгів, доцільно поглиблено вивчати ряд навчальних дисциплін, таких як «Основи академічного письма», «Інтелектуальна власність» тощо, які б дозволили ще глибше формувати академічну культуру і викоринювати форми прояву академічної нечесності.

Оцінка результатів проведеного опитування вказує на необхідність здійснення роз'яснювальної роботи як серед викладачів, так і серед студентів, адже тема академічного плагіату і досі лишається не вирішеною в українських ЗВО. Окрім роз'яснень, необхідним є проведення комплексу заходів з підтримки принципів академічної доброчесності (методичне, інформаційне та матеріально-технічне забезпечення). Необхідно також поглибити використання програмного забезпечення для виявлення можливого плагіату та перевірки магістерських й інших науково-дослідних робіт на оригінальність.

Загалом, в закладах вищої освіти необхідно створити таке середовище, в якому б їхнє керівництво та науково-педагогічний персонал власним прикладом змогли б допомогти студенту створювати свої власні доробки та проєкти, що, безумовно, стимулювало б студентів займатись науковою діяльністю.

Література

1. Сацки В. Академічна доброчесність: міфічна концепція чи дієвий інструмент забезпечення якості вищої освіти? [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://education-ua.org/ua/articles/930-akademichna-dobrochesnist-mifichna-kontsepsiya-chi-dievij-instrument-zabezpechennya-yakosti-vishchoji-osviti>. – Назва з екрана.
2. Проєкт сприяння академічній доброчесності в Україні STRENGTHENING ACADEMIC INTEGRITY IN UKRAINE PROJECT – SAIUP [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://lutsk-ntu.com.ua/uk/akademichna-dobrochesnist>. – Назва з екрана.
3. В ЛНТУ в спільних тренінгах Проєкту SAIUP та програми "Активні громадяни" взяли участь викладачі і студенти [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://saiup.org.ua/novyny/v-lntu-v-spilnyh-treningah-proektu-saiup-ta-programy-aktivni-gromadyany-vzaly-uchast-vykladachi-studenty>. – Назва з екрана.
4. Лекція з академічної доброчесності у Луцькому НТУ [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://lutsk-ntu.com.ua/uk/news/lekciya-z-akademichnoyi-dobrochesnosti-u-luckomu-ntu>. – Назва з екрана.
5. Студентам Луцького НТУ роз'яснили, чому не можна плагіатити [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://lutsk-ntu.com.ua/uk/news/studentam-luckogo-ntu-roz-yasnili-chomu-ne-mozhna-plagiatiti>. – Назва з екрана.
6. Невпинно крокуємо до якісної освіти [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://knutd.edu.ua/pod-ta-publkat/news/12032>. – Назва з екрана.
7. Кодекс академічної доброчесності Київського національного університету технологій та дизайну [Електронний ресурс] // Режим доступу: https://knutd.edu.ua/files/dostupdopi/kodeks_akadem_dobrochesnosti_knutd.PDF. – Назва з екрана.
8. Кодекс честі Луцького НТУ [Електронний ресурс] // Режим доступу: lutsk-ntu.com.ua/uk/kodeks-chesti-luckogo-ntu. – Назва з екрана.
9. Ковальчук В. Н. Практика використання ІКТ-засобів у педагогічному експерименті: Інтернет анкетування / В. Н. Ковальчук // Інформаційні технології і засоби навчання. - 2013. - Т. 35, вип. 3. - С. 135-152. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN_2013_35_3_16
10. Клайн П. Введение в психометрическое проектирование. Справочное руководство по конструированию тестов. / П. Клайн. – Киев : ПАН Лтд, 1994. – 184 с.

Рецензенти:

Панасюк І.В., д.т.н., професор кафедри теплоенергетики, ресурсоощадності та техногенної безпеки Київського національного університету технологій та дизайну

Герасимчук О.П., к.т.н., доцент кафедри галузевого машинобудування та лісового господарства Луцького НТУ

Стаття надійшла до редакції 07.12.2018

УДК 693.542.4

М.Г. Сур'янінов¹, Д.В. Лазарева¹, В.В. Чабан²¹Одеська державна академія будівництва та архітектури²Київський національний університет технологій та дизайну

ВИБІР КОНСТРУКТИВНОГО РІШЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНОГО СТАБІЛІЗАТОРА ДИНАМІЧНОГО НАТЯГУ НИТОК ОСНОВИ ШЛЯХОМ МОДАЛЬНОГО АНАЛІЗУ В ПАКЕТІ ANSYS

У роботі розглядається конструкція високочастотного стабілізатора динамічного натягу ниток основи у формі тонкої трикутної пластини з вирізом при змінній кількості ребер жорсткості. Розв'язок завдання про вільні коливання такої системи можна одержати тільки чисельними методами. Завдання вирішується методом скінченних елементів із застосуванням програми ANSYS. Досліджено шість різних конструктивних варіантів високочастотного стабілізатора. У вихідній моделі варіювалася кількість ребер жорсткості і їх довжина. Моделювання виконане таким чином, що довжину кожного ребра можна змінювати від нуля, що відповідає відсутності відповідного ребра, до граничного значення. Визначені перші п'ять власних частот і форм коливань. Аналіз результатів показує, що власна частота коливань досягає свого максимального значення при наявності трьох підкріплювальних ребер максимальної довжини.

Ключові слова: високочастотний стабілізатор, трикутна пластинка, метод скінченних елементів, власна частота, форма коливань, ANSYS.

Н.Г. Сурьянинов, Д.В. Лазарева, В.В. Чабан

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СТАБИЛИЗАТОРА ДИНАМИЧЕСКОГО НАТЯЖЕНИЯ НИТОК ОСНОВЫ ПУТЕМ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ПАКЕТЕ ANSYS

В работе рассматривается конструкция высокочастотного стабилизатора динамического натяжения ниток основы в форме тонкой треугольной пластины с вырезом при переменном количестве ребер жесткости. Решение задачи о свободных колебаниях такой системы можно получить только численными методами. Задача решается методом конечных элементов с применением программы ANSYS. Исследованы шесть различных конструктивных вариантов высокочастотного стабилизатора. В исходной модели варьировалось количество ребер жесткости и их длина. Моделирование выполнено таким образом, что длину каждого ребра можно изменять от нуля, что соответствует отсутствию соответствующего ребра, до предельного значения. Определены первые пять собственных частот и форм колебаний. Анализ результатов показывает, что собственная частота колебаний достигает своего максимального значения при наличии трех подкрепляющих ребер максимальной длины.

Ключевые слова: высокочастотный стабилизатор, треугольная пластинка, метод конечных элементов, собственная частота, форма колебаний, ANSYS.

M.G. Surianinov, D.V. Lazareva, V.V. Chaban

CHOICE OF A CONSTRUCTIVE SOLUTION OF A HIGH-FREQUENCY STABILIZER OF DYNAMIC TENSION OF A WARP THREADS BY MEANS OF A MODAL ANALYSIS IN ANSYS PACKAGE

The paper discusses the design of a high-frequency stabilizer of dynamic tension of warp threads in the form of a thin triangular plate with a notch with a variable number of stiffeners. The solution of the problem of free oscillations of such a system can be obtained only by numerical methods. The problem is solved by the finite element method using the ANSYS program. Studied six different design options for high-frequency stabilizer. In the initial model, the number of stiffeners and their length varied. The simulation is performed in such a way that the length of each edge can be changed from zero, which corresponds to the absence of the corresponding edge, to the limit value. The first five natural frequencies and oscillation modes are determined. Analysis of the results shows that the natural frequency of oscillation reaches its maximum value in the presence of three reinforcing ribs of maximum length.

Keywords: high-frequency stabilizer, triangular plate, finite element method, natural frequency, vibration shape, ANSYS.

Introduction. An analysis of the designs of the warp knitting and sewing machines showed that, as a stabilizer of dynamic tension of the warp threads (SDTWT), mainly passive stabilizers are used, the structures of which are based on an elastic element. Analytical studies of passive SDTWT confirmed the validity of the requirements for the operating parameters of passive SDTWT - to have the maximum possible natural frequency of oscillations with a relatively (comparable with the stiffness of the warp threads in an elastic refueling system) low stiffness [1 - 4]. These requirements identified the main directions of improvement of passive SDTWT - creation of high-frequency structures.

Problem formulation. The basis of the existing design solutions used to increase the natural frequency, is to reduce the mass of moving elements of the stabilizer. At the same time, a way of

increasing the rigidity of structures, which directly follows from the well-known formula seems to be promising - [5 – 7]

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

where ω — natural frequency; c — stiffness.

Moreover, it is proposed to increase the rigidity of the stabilizer by the arrangement of stamped stiffeners, because this approach does not increase the mass of the system.

The paper considers the design of a high-frequency stabilizer of dynamic tension of warp threads (SDTWT) in the form of a thin triangular plate with a notch with a variable number of stiffeners (Fig. 1).

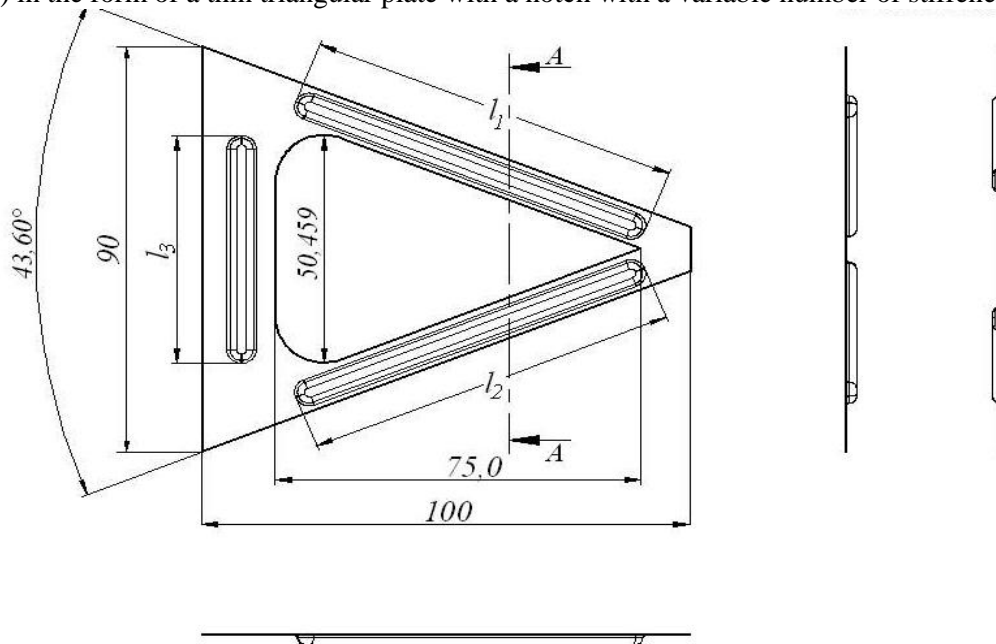


Fig. 1. Model of high-frequency SDTWT

Research results. The solution of the problem of free oscillations of such a system can be obtained only by numerical methods, and the most effective, in our opinion, is the finite element method. Currently, there are a large number of computer programs that implement this method. Among them, the authors selected the ANSYS package [8–9], the capabilities of which allow the following types of dynamic calculations to be performed: transient dynamics, modal analysis, response to harmonic influence, spectral analysis, and response to random vibration.

Modal analysis allows you to determine the natural frequencies and mode shapes. In addition, it is used as a reference for other, more detailed dynamic calculations, such as non-stationary dynamic analysis or the response of the system to harmonic effects.

In ANSYS, modal analysis is a linear procedure. Any non-linearities like plasticity or gap-contact elements are ignored, even if they are specified. Four methods are available to detect natural modes of vibration, including damping.

When performing a modal analysis, the Young's modulus and the density of the material, which is assumed to be linear, isotropic, or orthotropic, with properties depending or independent of temperature are set.

When defining eigenmodes of vibration, four methods can be used: short-cut, subspace, asymmetric (for problems with an asymmetric matrix, for example, when the fluid interacts with the structure) and decrement (when friction cannot be neglected, for example, when analyzing movement on a supporting surface).

For most applications, you need to choose between two methods: short-cut and subspace. The first of them works faster, since it uses a shortened (condensed) matrix system to obtain a solution. However, compared with the second method, it is less accurate.

The file of calculation results contains natural frequencies and shapes forms, as well as corresponding stresses and forces.

When determining the natural frequencies and modes of oscillations of a structure, it is assumed that free continuous oscillations occur [10]:

$$\overline{M}\ddot{\overline{u}} + \overline{K}\overline{u} = 0 \quad (1)$$

Note that the stiffness matrix of the structure \overline{K} may include the effect of preloading. For a linear system, the free oscillations will be harmonic:

$$\overline{u} = \overline{\varphi}_i \cos \omega_i t, \quad (2)$$

where $\overline{\varphi}_i$ – eigenvector representing the i -th form of oscillations;

ω_i – i -th natural circular eigenfrequency (radians per unit time);

t – time.

Thus, the matrix equation (1) takes the following form:

$$\left(-\omega_i^2 \overline{M} + \overline{K}\right) \overline{\varphi}_i = 0. \quad (3)$$

This equation has a solution, in addition to the trivial $\overline{\varphi}_i = 0$, only when the determinant of this system $\left(-\omega_i^2 \overline{M} + \overline{K}\right)$ is zero, that is:

$$\left|-\omega_i^2 \overline{M} + \overline{K}\right| = 0. \quad (4)$$

The last equation is the eigenvalue problem [11 - 12]. The solution of equation (4), if n is the order of the matrix, is the characteristic polynomial of the n -th order, which has n roots: $\omega_1^2, \omega_2^2 \dots \omega_n^2$, where n is the number of degrees of freedom. These roots are eigenvalues of the equation. The eigenvectors $\overline{\varphi}_i$ are obtained by substituting the obtained roots ω_i^2 into equation (3). The eigenvalue ω_i^2 determines the eigenfrequency of the system $\sqrt{\omega_i^2}$, and the eigenvector $\overline{\varphi}_i$ defines the corresponding form of oscillations (displacement of the system).

The values of the natural cyclic frequencies Ω and the natural technical frequencies f are related by the following relationship:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \quad (5)$$

where f_i – i -th technical eigenfrequency (cycles per unit time).

Usually, the eigenvector $\overline{\varphi}_i$ is called normalized if the following equality holds (reflecting the orthogonality property of the forms of natural oscillations):

$$\overline{\varphi}_i^T \overline{M} \overline{\varphi}_i = 1. \quad (6)$$

In another case, the eigenvector $\overline{\varphi}_i$ is normalized from the condition that its largest components are equal to one. The condition of the orthogonality of the forms of oscillations can be explained as the equality to zero of the forces of inertia of the i -th form of oscillations on the displacements of the k -th form of oscillations.

When using the method of frequency condensation (reduction of degrees of freedom), the n eigenvectors can then be expanded at the “expansion” stage to the full set of modal degrees of freedom of the structure:

$$\overline{\varphi}_{si} = -\left[\overline{K}_{ss}\right]^{-1} \left[\overline{K}_{sm}\right] \overline{\varphi}_i, \quad (7)$$

where $\overline{\varphi}_{si}$ — the vector of excluded (auxiliary) degrees of freedom of the i -th mode (the auxiliary degrees of freedom are those degrees of freedom that will be condensed to reduce the dimension of the system);

$\left[\overline{K}_{ss}\right], \left[\overline{K}_{sm}\right]$ — submatrices of stiffness with respect to auxiliary degrees of freedom and the connection of auxiliary degrees of freedom with those held respectively;

$\overline{\varphi}_i$ — vector of the held (basic) degrees of freedom of the i -th mode.

The model is approximated by the standard Shell63 finite element. The element is defined by four nodes, four values of thickness (in this case it is a constant value), the stiffness of the elastic base and the properties of an orthotropic material. The direction of orientation of an orthotropic (in general) material is related to the coordinate system of the element. The x-axis of the coordinate system can be rotated through a certain angle.

The work of the element is based on the Kirchhoff – Love theory.

6 different design variants of high-frequency SDTWT were investigated (Fig. 1).

In the initial model, the number of stiffeners and their length (l_1, l_2, l_3) varied. The simulation is performed in such a way that the length of each edge can be changed from zero (which corresponds to the absence of the corresponding edge) to the limiting value:

$$l_1^{\max} = 77\text{MM}, l_2^{\max} = 77\text{MM}, l_3^{\max} = 60,28\text{MM}.$$

SDTWT options investigated:

- option 1: $l_1 = l_2 = 77\text{MM}, l_3 = 0$;
- option 2: $l_1 = l_2 = 38,5\text{MM}, l_3 = 0$;
- option 3: $l_1 = l_2 = 77\text{MM}, l_3 = 60,28\text{MM}$;
- option 4: $l_1 = l_2 = 38,5\text{MM}, l_3 = 30,14\text{MM}$;
- option 5: $l_1 = l_2 = l_3 = 0$ (triangle plate without ribs);
- option 6: triangle plate without ribs and notch.

The number of frequencies and vibration forms that can be obtained as a result of the calculation in the ANSYS program is practically unlimited, however, it is obvious that higher frequencies can be of only theoretical interest. Therefore, Table 1 shows the values of only the first five natural frequencies (technical and cyclic) for each of the calculation options.

Table 1

№№ opt.	Eigen frequency									
	Technical, Hz					Cyclic, s^{-1}				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
1	66,04	502,08	779,65	1133,7	1676,0	414,9	3154,7	4898,7	7123,2	10530,6
2	46,44	271,58	393,40	621,47	712,54	291,8	1706,4	2471,8	3904,8	4477,0
3	72,21	548,7	827,56	1185,7	1835,6	453,7	3447,6	5199,7	7450,0	11533,4
4	46,77	275,52	397,55	642,86	714,16	293,9	1731,1	2497,9	4039,2	4487,2
5	42,67	199,86	243,18	536,98	585,61	268,1	1255,8	1527,9	3373,9	3679,5
6	55,60	250,91	265,25	624,63	682,75	349,3	1576,5	1666,6	3924,7	4289,8

Table 1 analysis shows that the natural frequency of oscillation reaches its maximum value ($\omega_1 = 453,7c^{-1}$) in the presence of three reinforcing ribs of maximum length ($l_1 = l_2 = 77\text{MM}, l_3 = 60,28\text{MM}$). In this case, the mass of the plate (on the basis of the value $\rho = 7800\text{kg} / \text{m}^3$) is 10.362846 grams (Table 2).

Note that the ANSYS program automatically calculates the mass of the plate for each of the options considered, and minor differences in the numerical values of the mass are due to the fact that the program perceives the edges as structural elements, not taking into account that these edges are obtained by stamping, without the use of additional material.

Table 2

Plate volume and mass		
№№ of option	Plate volume, mm^3	Plate mass, g
1	1275.50	9,94890
2	1208.30	9,42474
3	1328.57	10,362846
4	1232.53	9,613734
5	1140.17	8,893326
6	2000.00	15,6

Forms of natural oscillations corresponding to the first two eigenfrequencies given in Table 1 are shown in Fig. 2-7.

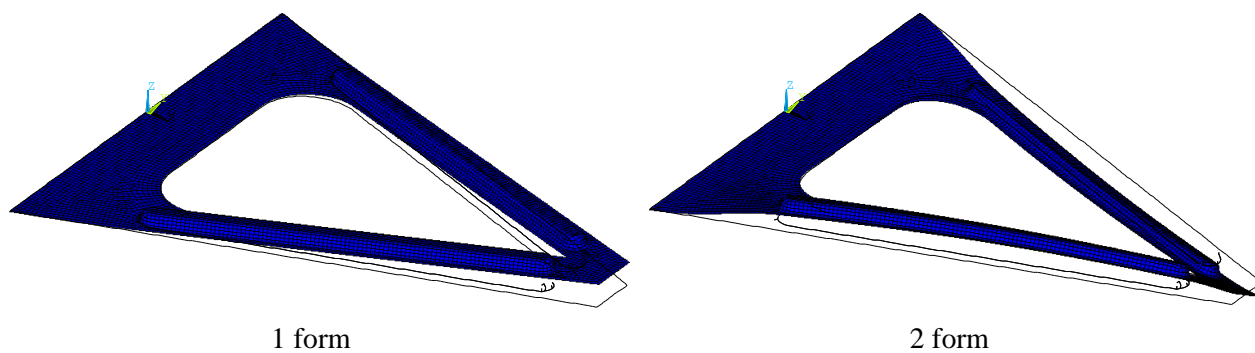


Fig. 2. Oscillation forms of the first calculation option

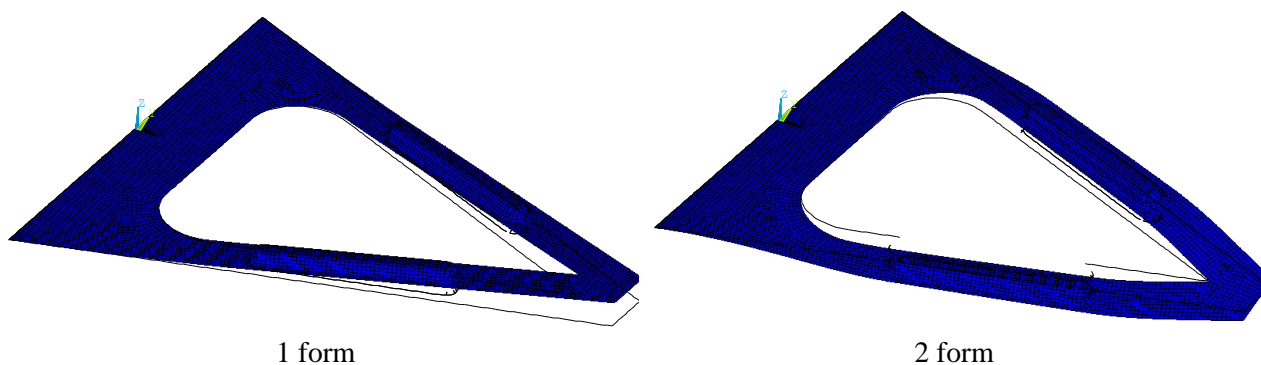


Fig. 3. Oscillation forms of the second calculation option

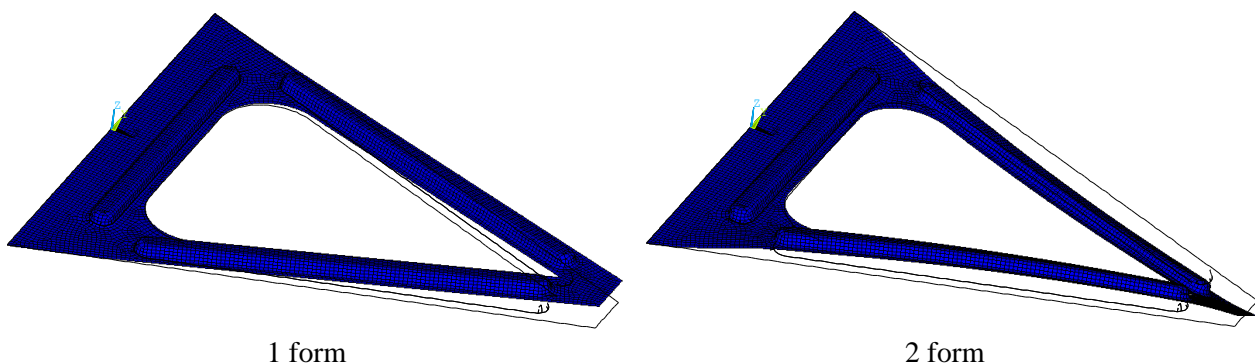


Fig. 4. Oscillation forms of the third calculation option

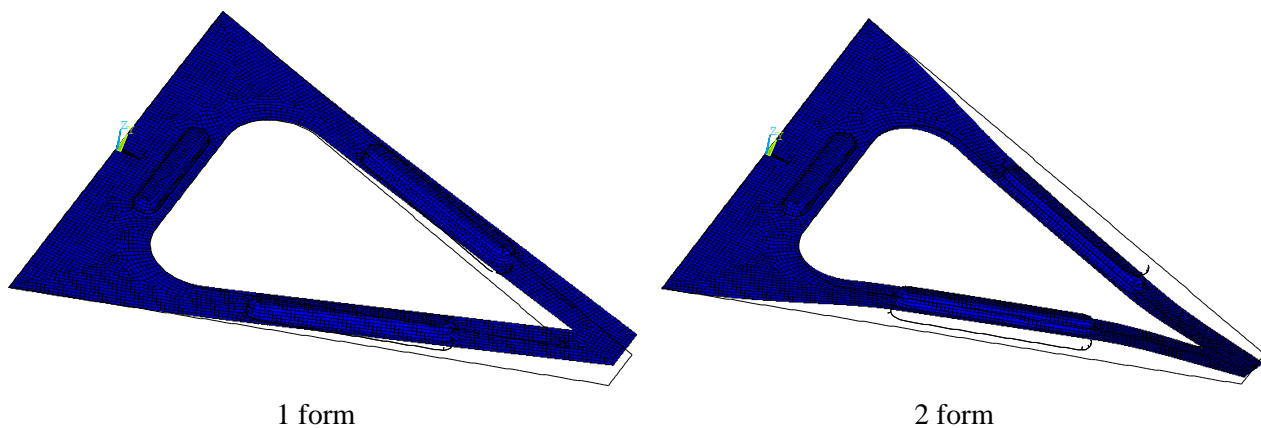


Fig. 5. Oscillation forms of the fourth calculation option

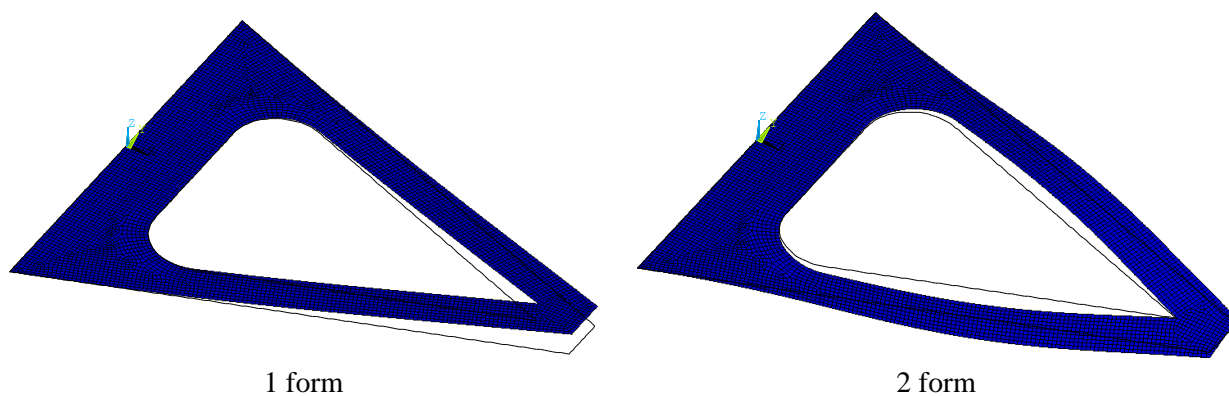


Fig. 6. Oscillation forms of the fifth calculation option

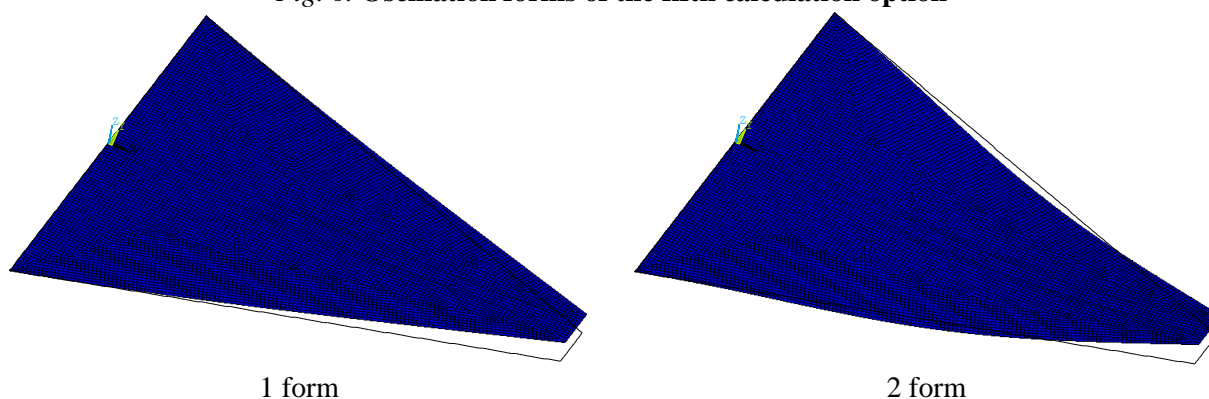


Fig. 7. Oscillation forms of the sixth calculation option

Conclusions. In all the considered variants of calculation, the first form of oscillations is flexural, and the other four forms are flexural-twisting.

Table 1 analysis shows that the natural frequency of oscillation reaches its maximum value ($\omega_1 = 453,7c^{-1}$) in the presence of three reinforcing ribs of maximum length ($l_1 = l_2 = 77MM, l_3 = 60,28MM$).

References

1. CHaban V.V. Dinamika osnovov'yazal'nih mashin /V.V. CHaban, L.A. Bakan, B.F. Pipa – K.: KNUTD, 2012. – 287 s.
2. Pipa B.F. Dinamika privodu osnovov'yazal'nih mashin /B.F. Pipa, V.V. CHaban //Visnik HNU. – 2007. – № 6. – S.11-14.
3. CHaban V.V. Analiz podhodov k raschetu vysokochastotnogo stabilizatora dinamicheskogo natyazheniya nitej osnovy //Vestnik SPGUTD. Dizajn. Materialy. Tekhnologii (S-Peterburg). – 2013. – № 1(26). – S. 45-49.
4. Paraska G.B. Stabilizaciya natyagu nitok osnovi na v'yazal'nih mashinah: monografiya / G.B. Paraska. — Hmel'nic'kij: HNU, 2012. — 275 s.
5. Sur'yaninov M. G. Teoretichni osnovi dinamiki mashin: Uchb. posibnik / M. G. Sur'yaninov, O. F. Dashchenko, P. O. Bilous, G. O. Obors'kij // Pid red. M.G. Sur'yaninova. — 2-e vid., perer. i dop. — Odessa: Astroprint, 2008. — 412 s.
6. Babakov I. M. Teoriya kolebanij / I. M. Babakov — M.: Nauka, 1968. — 560 s.
7. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebanij / Biderman V.L. — M.: Vysshaya shkola, 1980. — 408 s.
8. Dashchenko A. F. ANSYS v zadachah inzhenernoj mekhaniki / A. F. Dashchenko, D. V. Lazareva, N. G. Sur'yaninov / Izd. 2-e, pererab. i dop. Pod red. N. G. Sur'yaninova. — Odessa. — Pal'mira, 2011. — 505 s.
9. Fedorova N.N. Osnovy raboty v ANSYS 17 / N.N. Fedorova, S.A. Val'ger, M.N. Danilov, YU.V. Zaharova — M.: DMK Press, 2017. — 210 s.
10. Vasilenko M.V. Teoriya kolivan' i stijkosti ruhu / M.V. Vasilenko, O.M. Aleksejchuk — K.: Vishcha shk., 2004. — 525 s.
11. Myshkis A.D. Matematika dlya VTUZov. Special'nye kursy. — M.: Nauka, 1971. — 632 s.
12. Rajs Dzh. Matrichnye vychisleniya i matematicheskoe obespechenie. — M.: Mir, 1984. — 264 s.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК: 615.47

В.С. Топчий, Т.В. Жемчужкина, Т.В. Носова*Харьковский национальный университет радиоэлектроники***СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ЭМГ-СИГНАЛА С ЦЕЛЬЮ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

В данной статье исследуется зависимость набора параметров фазового портрета ЭМГ-сигнала от возраста, пола и диагноза обследуемых параметрическими и непараметрическими методами статистического анализа. Работа проводилась на основе результатов обследования в четырех группах пациентов: практически здоровые без жалоб; условно здоровые с жалобами на боли в спине; вертебрологические пациенты; пациенты, страдающие сколиозом.

Ключевые слова: мышца, статистика, фазовый портрет, электромиограмма, эллипс.

В.С. Топчий, Т.В. Жемчужкина, Т.В. Носова**СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ЕМГ-СИГНАЛУ З МЕТОЮ ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ ОПОРНО-РУХОВОГО АПАРАТУ**

В даній статті досліджується залежність набору параметрів фазового портрета ЕМГ-сигналу від віку, статі та діагнозу обстежуваних параметричними та непараметричними методами статистичного аналізу. Робота проводилася на основі результатів обстеження в чотирьох групах пацієнтів: практично здорові без скарг; умовно здорові зі скаргами на болі в спині; вертебрологічні пацієнти; пацієнти, які страждають на сколіоз.

Ключові слова: м'яз, статистика, фазовий портрет, електроміограма, еліпс.

V. Topchii, T. Zhemchuzhkina, T. Nosova**STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETERS OF EMG-SIGNAL PHASE PORTRAIT FOR DIFFERENTIATION OF MUSCULOSKELETAL SYSTEM DISEASES**

This article examines the dependence of the set of parameters of the phase portrait of an EMG signal on age, sex, and the diagnosis of the examined by methods of statistical analysis. The work is carried out on the basis of the results of the examination in four groups of patients: practically healthy without complaints; conditionally healthy with complaints of back pain; vertebral patients; patients with scoliosis. The studies were conducted in collaboration with the laboratory of pathophysiology of the Institute of Spine and Joint Pathology named after prof. M.I. Sitenko of National Academy of Medical Sciences of Ukraine. The study was performed with 102 people of both sexes aged 18 to 76 were examined.

Key words: muscle, statistics, phase portrait, electromyogram, ellipse.

Постановка проблеми. Опорно-двигательный аппарат человека – это комплекс, состоящий из костей, суставов, связок, сухожилий и мышц, образующих каркас, придающий форму организму, дающий ему опору, обеспечивающий защиту внутренних органов и возможность передвижения в пространстве. При этом кости и суставы составляют пассивную часть опорно-двигательного аппарата, а мышцы, способные к сокращению и изменению положения костей в пространстве, – активную [1].

Патологии опорно-двигательного аппарата имеют значительную распространенность. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) различными заболеваниями опорно-двигательного аппарата страдает почти 80% населения. Причем большинство – трудоспособного возраста от 30 до 50 лет. В различных странах частота данной патологии колеблется от 69 до 3467 случая на 100 000 населения в год. В Украине уровень заболеваемости составляет 3182 на 100 000 населения [2]. Поскольку многие из заболеваний опорно-двигательного аппарата протекают хронически и нередко приводят к полной потере трудоспособности, то их своевременная диагностика и, при необходимости, оперативное вмешательство [3] является одним из актуальных вопросов современной медицины.

Компьютерные системы, использующие специализированное программное обеспечение, существенно расширяют диагностические возможности современной медицины [4-6]. Это касается и электромиографии – метода исследования опорно-двигательного аппарата человека посредством регистрации электрических потенциалов мышц. Электромиографические исследования позволяют не только установить характер заболевания, проводить его топическую диагностику, но и объективно контролировать эффективность лечения, прогнозировать время и этапы восстановления. Поверхностная электромиография является безопасной и совершенно безболезненной. Кроме того, она не требует сложного аппаратного обеспечения, кроме электродов и персонального компьютера, снабженного специализированным программным обеспечением.

Использование методов нелинейной динамики является перспективным путем создания нового программного обеспечения компьютерных систем, позволяющего расширить диагностические возможности оценки биомедицинских сигналов. Метод фазовых портретов является существенным дополнением к традиционным методам, которые рассматривают сигналы как линейные стационарные, а потому не дают возможности детально проследить и численно охарактеризовать динамику изменения структуры сигнала во времени. Поэтому актуальной является проблема получения информативных параметров фазового портрета электромиографического сигнала, характеризующих состояние мышечной системы в норме и при развитии патологии.

Анализ последних исследований и публикаций. Боль в области поясничного отдела позвоночника является мультифакториальной проблемой, включающей патоанатомические, нейрофизиологические, соматические и психосоциальные аспекты. Потенциальным источником боли считается первичное микрповреждение элемента позвоночного двигательного сегмента (межпозвоночного диска, замыкательной пластинки или сухожилия), которое продуцирует микрповреждение связочных коллагеновых структур и рефлекторную повышенную возбудимость многораздельных мышц, направленную на защитную фиксацию сегмента и, таким образом, ускорение репаративных процессов. В то же время чрезмерная жесткость многораздельных мышц изменяет уровень стимуляции их мышечных механорецепторов, что уменьшает амплитуду мышечной активации во время свободного сокращения. В результате развивается мышечная дисфункция, приводящая в конечном итоге к ухудшению физического состояния мышц, т. е. к снижению их силы, выносливости и нарушению контроля активных движений с изменением амплитуды и частоты мышечного сокращения [7].

Поверхностная электромиография является относительно простым и недорогим, но при этом достаточно эффективным методом диагностики заболеваний у пациентов с жалобами на боли в спине [8]. Результаты теста на выносливость при исследовании различий электромиографических сигналов здоровых людей и пациентов, страдающих хроническими болями в спине, показали у вторых менее выраженные признаки усталости относительно сигнала ЭМГ в состоянии покоя [9].

На сегодняшний день классификацию заболеваний по результатам поверхностной электромиографии производят преимущественно с помощью методов спектрально-корреляционного анализа. Важным критерием для их применения является стационарность сигнала. С помощью теста Дики-Фуллера было установлено, что методы спектрально-корреляционного анализа целесообразно применять лишь на определенных коротких сегментах сигнала, которые являются стационарными, но полностью зарегистрированный сигнал ЭМГ является нестационарным. С учетом этого для диагностики заболеваний по результатам поверхностной электромиографии рекомендуется применять методы нелинейной динамики [10-11].

Постановка задачи. Цель работы заключается в том, чтобы на основе данных геометрического анализа фазовых портретов поверхностных электромиограмм выявить статистически достоверно различающиеся параметры фазовых портретов для следующих групп обследуемых:

- практически здоровые добровольцы без жалоб;
- условно здоровые с жалобами на боль в спине;
- вертебрологические пациенты;
- пациенты, страдающие сколиозом.

Задачами исследования являются:

- расчет параметров фазовых портретов ЭМГ-сигналов, полученных в указанных выше группах, и формирование на их основе выборки;
- анализ вероятности различий параметров фазового портрета ЭМГ-сигнала исследуемых групп относительно возрастного признака;
- анализ вероятности различий параметров фазового портрета ЭМГ-сигнала исследуемых групп относительно полового признака;
- анализ вероятности различий параметров фазового портрета ЭМГ-сигнала между группами здоровых, условно здоровых, вертебрологических пациентов и пациентов, страдающих сколиозом.

Изложение основного материала. Исследования проводились в сотрудничестве с лабораторией патофизиологии Института патологии позвоночника и суставов им. М.И. Ситенко НАМН Украины. Для выполнения поставленных задач было обследовано 102 человека обоих

полов в возрасте от 18 до 76 лет. Регистрация электромиограмм проводилась на 4-канальном компьютерном электромиографе Нейро-ЭМГ (Нейрософт). Поверхностные электроды размещали на разгибателе туловища на 2-3 см вправо и влево от срединной линии спины, на уровне пятого поясничного позвонка тела человека. Для дальнейшей обработки и анализа сигнал передавался на персональный компьютер в виде звукового файла (формат .wave) [12].

ЭМГ-сигнал представляет собой объемный процесс, то есть обладает вектором, который меняет свое направление во времени и пространстве. Построение фазового портрета позволяет восстановить траектории данного вектора и анализировать его нелинейные характеристики. При построении фазового портрета используется система координат, в которой по оси абсцисс откладываются значения переменной, а по оси ординат значения той же переменной с некоторой задержкой. Величина задержки τ выбирается равной времени первого спада автокорреляционной функции сигнала до нуля.

Геометрический метод анализа позволяет получить количественные показатели фазового портрета путем его аппроксимации какой-либо геометрической фигурой. В данной работе полученный фазовый портрет ЭМГ-сигнала аппроксимируется эллипсом, а затем производится расчет его параметров:

- площадь эллипса S ;
- размер большой полуоси a ;
- размер малой полуоси b ;
- коэффициент эксцентриситета e ;
- угол наклона большой полуоси относительно оси абсцисс ϕ ;
- сдвиг центра эллипса относительно начала координат r .

При построении эллипса по крайним точкам фазового портрета часть эллипса охватывает пустое фазовое пространство. Для решения этой проблемы выполняется построение второго эллипса, охватывающего заданный процент точек фазового портрета (рис. 1). Затем так же производится расчет его параметров:

- площадь эллипса $S1$;
- размер большой полуоси $a1$;
- размер малой полуоси $b1$;
- коэффициент эксцентриситета $e1$ [13].

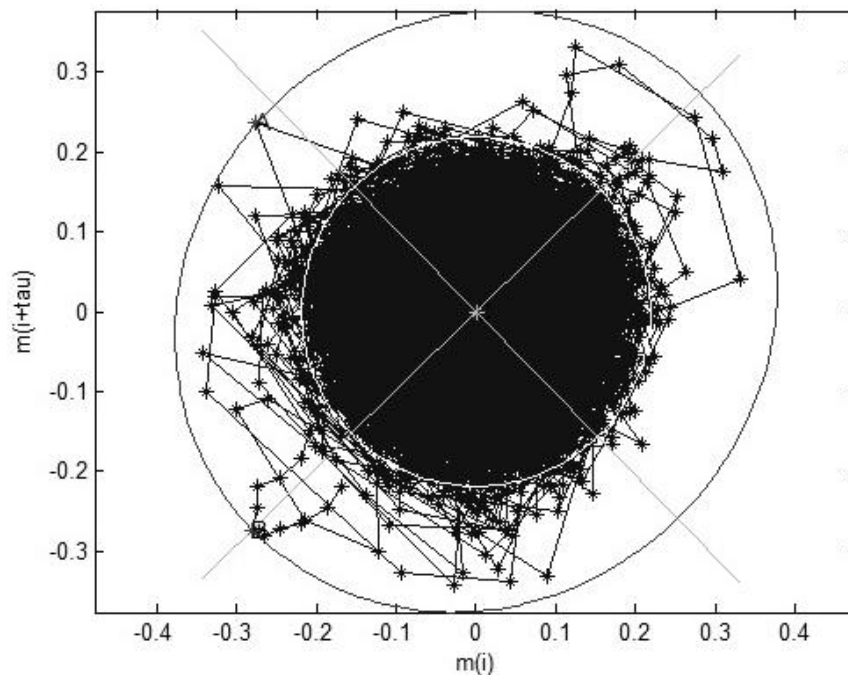


Рис. 1. Фазовый портрет ЭМГ-сигнала с двумя аппроксимирующими эллипсами: полным и процентным (99,9% точек)

Таким образом, состояние каждого обследуемого в группе характеризовалось десятью параметрами фазового портрета: $\phi_i, r, a, b, S, e, a1, b1, S1, e1$.

Геометрический метод анализа фазового портрета ЭМГ-сигнала был реализован в программной среде MatLab. После получения параметров фазового портрета электромиограмм были сформированы выборки для статистической обработки и выявления статистически значимых связей между группой, к которой относится пациент, и каждым показателем фазового портрета, а также половым и возрастным признаком. Расчеты проводились с помощью пакета SPSS Statistics 21.0.

Среди методов оценки достоверности различают параметрические и непараметрические методы. Параметрические критерии применяются для числовых данных, когда закон распределения нормальный. Для статистического анализа достоверности различия показателей фазового портрета ЭМГ-сигнала в соответствии с диагнозом, полом и возрастом обследуемых были выбраны критерий Колмогорова-Смирнова, параметрический t-критерий Стьюдента, а также непараметрический U-критерий Манна-Уитни.

Критерий Колмогорова-Смирнова основан на сравнении рядов накопленных частот двух независимых выборок. Он включает в себя проверку всех видов различия распределений, в особенности различия средних положений (среднее значение, медиана), рассеяния, асимметрии и эксцесса, т.е. любых различий, любых параметров, без конкретизации каких именно. Нулевая гипотеза однородности говорит об идентичности двух функций распределения. Принятие этой гипотезы автоматически означает и равенство всех соответствующих параметров этих распределений. Однако отклонение нулевой гипотезы и принятие альтернативной гипотезы не отвечает на вопрос о том, какие именно параметры не равны в сравниваемых распределениях.

Параметрический t-критерий Стьюдента используется для определения статистической значимости различий средних величин. Может применяться как в случаях сравнения независимых выборок, так и при сравнении связанных совокупностей. Для применения t-критерия Стьюдента необходимо, чтобы исходные данные имели нормальное распределение. В случае применения двухвыборочного критерия для независимых выборок также необходимо соблюдение условия равенства дисперсий. Если рассчитанное значение t-критерия Стьюдента равно или больше критического, делаем вывод о статистической значимости различий между сравниваемыми величинами. Если значение рассчитанного t-критерия Стьюдента меньше критического, значит, различия сравниваемых величин статистически не значимы.

Непараметрический U-критерий Манна-Уитни используется для сравнения двух независимых выборок по уровню какого-либо признака, измеренного количественно. Метод основан на определении того, достаточно ли мала зона перекрещивающихся значений между двумя вариационными рядами (ранжированным рядом значений параметра в первой выборке и таким же во второй выборке). Чем меньше значение критерия, тем вероятнее, что различия между значениями параметра в выборках достоверны.

Каждый критерий значимости различий проходит следующие этапы:

- определение используемой статистической модели. Здесь выдвигают некоторый набор предпосылок относительно закона распределения случайной величины и его параметров;
- выбор критерия, который подходит к выдвинутой статистической гипотезе;
- выбор уровня значимости α в зависимости от требуемой надежности выводов;
- определение критической области для проверки нулевой гипотезы. Если значение критерия превышает эту область, то гипотеза отклоняется;
- расчет значения выбранного критерия для имеющихся данных;
- рассчитанное значение критерия сравнивается с критическим и принимается решение о принятии или отклонении нулевой гипотезы.

Анализ показателей фазового портрета ЭМГ-сигнала в зависимости от возраста проводили в четырех группах обследуемых согласно классификации ВОЗ:

- A1 – молодой возраст (18-44 года);
- A2 – средний возраст (45-59 лет);
- A3 – пожилой возраст (60-74 года);
- A4 – старческий возраст (75-90 лет).

Проведенные расчеты вероятности различия между показателями фазового портрета ЭМГ-сигнала и возрастом пациента для групп A1, A2, A3, A4 показали, что разница показателей между возрастными группами от 18 до 76 лет не является статистически значимой для всех

исследуемых параметров ($p > 0,05$) во всех группах обследуемых. Это позволяет проводить дальнейший анализ электромиограмм, не учитывая возрастной принадлежности обследуемого.

Анализ показателей фазового портрета ЭМГ-сигнала в зависимости от пола проводили в четырех группах обследуемых:

- B1 – практически здоровые добровольцы без жалоб (16 женщин; 16 мужчин);
- B2 – условно здоровые с жалобами на боль в спине (9 женщин; 11 мужчин);
- B3 – вертебрологические пациенты (9 женщины; 11 мужчин);
- B4 – пациенты, страдающие сколиозом (16 женщин; 14 мужчин).

Проведенные расчеты вероятности различия между показателями фазового портрета ЭМГ-сигнала и полом пациента для группы B1, B2, B3 и B4 показали, что разница показателей ЭМГ-сигналов между женщинами и мужчинами не является статистически значимой для всех исследуемых параметров ($p > 0,05$) во всех группах. Это позволяет проводить дальнейший анализ электромиограмм, не учитывая половой принадлежности обследуемого.

Анализ показателей фазового портрета ЭМГ-сигнала в зависимости от диагноза проводили в четырех группах обследуемых:

- B1 – практически здоровые добровольцы без жалоб (32 миограммы);
- B2 – условно здоровые с жалобами на боль в спине (20 миограмм);
- B3 – вертебрологические пациенты (20 миограмм);
- B4 – пациенты, страдающие сколиозом (30 миограмм).

При определении различий среди показателей фазового портрета ЭМГ-сигнала между пациентами без патологий и с патологиями опорно-двигательного аппарата, получили следующие результаты:

- разница показателей ЭМГ-сигнала между группами B1 и B2 не является статистически значимой ($p > 0,05$);
- разница показателей ЭМГ-сигнала между группами B1 и B3, B1 и B4 является статистически значимой ($p < 0,05$), кроме показателей r , e и $e1$ ($p > 0,05$);
- разница показателей ЭМГ-сигнала между группами B2 и B3, B2 и B4 является статистически значимой ($p < 0,05$), кроме показателей r , e и $e1$ ($p > 0,05$);
- разница показателей ЭМГ-сигнала между группами B3 и B4 является статистически значимой ($p < 0,05$), кроме показателей r , e и $e1$ ($p > 0,05$).

Выводы. Провели статистическую обработку выборок для выявления статистически значимых связей параметров фазового портрета ЭМГ-сигнала с возрастом и полом обследуемого. Статистически достоверных различий не выявлено.

Провели статистическую обработку выборки для выявления статистически значимых связей между группой, к которой относится пациент, и каждым показателем фазового портрета. Группы практически здоровых пациентов без жалоб и условно здоровых с жалобами на боль в спине по каждому параметру фазового портрета статистически достоверно не различаются. Однако между пациентами без патологий, вертебрологическими пациентами и пациентами, страдающими сколиозом, выявлено статистически достоверное различие по семи параметрам фазового портрета: ϕ , a , b , S , $a1$, $b1$, $S1$.

Перспективой работы является построение моделей для классификации пациентов по параметрам фазовых портретов данных поверхностной электромиографии.

Список использованных источников:

1. Платонов И. В. Мышцы и суставы. Опорно-двигательный аппарат / И. В. Платонов. – СПб.: Амфора, 2012. – 62 с.
2. Число выбывших из стационара с диагнозом болезни опорно-двигательного аппарата [Электронный ресурс] / Атлас здоровья в Европе. – Режим доступа: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0012/97599/E91713R.pdf/ 01.10.2018 г. – Загл. с экрана.
3. Аврунин О. Г. Принципы компьютерного планирования функциональных оперативных вмешательств / О. Г. Аврунин // Технічна електродинаміка. – 2011. – Ч 2. – С. 293-298.
4. Шамраева Е. О. Выбор метода сегментации костных структур на томографических изображениях / Е. О. Шамраева, О. Г. Аврунин // Бионика интеллекта: информация, язык, интеллект. – 2006. – № 2 (65). – С. 83-87.
5. Аврунин О. Г. Опыт разработки биомедицинской системы цифровой микроскопии / О. Г. Аврунин // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т.8. – № 1. – С. 46-52.

6. Шамраева Е. О. Построение моделей черепных имплантов по рентгенографическим данным / Е. О. Шамраева, О. Г. Аврунин // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4, С. 441-443.
7. Спектральный анализ электромиограмм мышц спины при дегенеративных заболеваниях позвоночника / А. Г. Скиданов, Д. Р. Дуплий, В. А. Колесниченко, В. А. Радченко. // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2015. – №1. – С. 98–105.
8. Geisser M. E. Surface electromyography and low back pain / M. E. Geisser // Biofeedback. – 2007. – Vol. 35 (1). – P. 13-16.
9. Surface electromyography of the paravertebral muscles in patients with chronic low back pain / M. Kramer, V. Ebert, L. Kinzl [et al.]. // Arch. Phys. Med. Rehabil. – 2005. – Vol. 86. – P. 31-36.
10. Classification of back muscle impairment based on the surface electromyographic signal / S. H. Roy, C. J. De Luca, M. S. Emley [et al.]. // Journal of rehabilitation research and development. – 1997. – Vol. 34 (4). – P. 405-414.
11. Щодо застосовності методів аналізу електроміографічних сигналів / Ю. С. Шпакович, Т. В. Жемчужкіна, Т. В. Носова // Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії: матеріали першої міжуніверситетської науково-практичної конференції з міжнародною участю, 26-27 квіт. 2017 р. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 85-86.
12. Статистический анализ спектральных характеристик ЭМГ-сигнала с целью дифференцирования поясничных болей / Т. В. Жемчужкина, Т. В. Носова, Я. В. Носова [и др.]. // Бионика интеллекта. – 2015. – №2 (85). – С. 105-108.
13. Компьютерная система анализа состояния опорно-двигательного аппарата на основе фазовых портретов ЭМГ / В. С. Топчий, Т. В. Жемчужкина, Т. В. Носова // Физические процессы и поля технических и биологических объектов: материалы XVI Международной научно-технической конференции, 3-5 ноя. 2017 г. – Кременчуг: КрНУ, 2017. – С. 87-89.

Рецензенты:

Аврунин О.Г., заведующий кафедрой Биомедицинской инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, д.т.н., профессор;

Мустецов Н.П., профессор кафедры Физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, к.т.н, профессор.

Стаття надійшла до редакції 07.11.2018

УДК 331.452.

В.І. Федорчук-Мороз, О.О. Вісин

Луцький національний технічний університет

ШЛЯХИ ПОДОЛАННЯ ШКІДЛИВОЇ ДІЇ ВІБРАЦІЇ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ

Розглянуто шкідливий вплив виробничої вібрації на працівників при роботі з вібраційними інструментами. Встановлено основні пріоритетні проблеми профілактики професійних захворювань у працівників та запропоновано напрями робіт, спрямованих на зниження рівня вібрації.

Ключові слова: виробнича вібрація, шкідлива дія вібрації, гранично допустимі норми, санітарні норми і правила.

В.И. Федорчук-Мороз, Е.А. Висын**ПУТИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ**

Рассмотрено вредное воздействие производственной вибрации на работников при работе с вибрационными инструментами. Установлено основные приоритетные проблемы профилактики профессиональных заболеваний у работников и предложены работы, направленные на снижение уровня вибрации.

Ключевые слова: производственная вибрация, вредное воздействие вибрации, предельно допустимые нормы, санитарные нормы и правила.

V. Fedorchuk-Moroz, O. Visyn**WAYS OF OVERCOMING THE HARMFUL EXPOSURE OF VIBRATION IN THE PRODUCTION PROCESS**

The harmful influence of industrial vibration on workers at work with vibration tools is considered. The main priority problems of prevention of occupational diseases in the workers were established, and the directions of work aimed at reducing the level of vibration were proposed.

Some of the production processes are closely related to vibration oscillations. Vibration can be called shaking the entire body or its individual components in the case of certain production processes. The source of vibration is pneumatic, mechanical, as well as electrical equipment and instruments of a rotating or percussion type. Production vibration, which is characterized by significant amplitude and duration of action, causes irritability, insomnia, headache, pain in the hands of people dealing with a vibrating instrument.

Considering that a person spends a significant part of his life at work, consider what kind of damage is caused by "production" vibration. It belongs to the most widespread and most harmful physical factors that lead to the development of syndromes of vibration pathology with persistent decline or total disability. It was established that one of the priority problems of prevention of occupational diseases, which subsequently leads to an accident and / or accident, is the creation of comfortable working conditions for workers, which meet the requirements of legislative and normative acts.

Keywords: industrial vibration, the harmful effects of vibration, the maximum permissible norms, sanitary norms and rules

Постановка проблеми. Деякі з виробничих процесів тісно пов'язані із вібраційними коливаннями. Вібрацією можна назвати тремтіння усього тіла чи окремих його складових у разі проведення певних виробничих процесів. Джерелом походження вібрації вважається пневматичне, механічне, а також електричне обладнання та інструменти обертового або ударного типу. Виробнича вібрація, що характеризується значною амплітудою і тривалістю дії, викликає у працюючих дратівливість, безсоння, головний біль, ниючий біль в руках людей, що мають справу з віброючим інструментом. При тривалому впливі вібрації перебудовується кісткова тканина: на рентгенограмах можна помітити смуги, схожі на сліди перелому - ділянки найбільшої напруги, де розм'якшується кісткова тканина. Зростає проникність дрібних кровоносних судин, порушується нервова регуляція, змінюється чутливість шкіри. При роботі з ручним механізованим інструментом може виникнути акроасфіксія (симптом мертвих пальців) - втрата чутливості, побіління пальців, кистей рук. При дії загальної вібрації більш виражені зміни з боку центральної нервової системи: з'являються запаморочення, шум у вухах, погіршення пам'яті, порушення координації рухів, вестибулярні розлади, схуднення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зважаючи на те, що людина проводить значну частину свого життя на роботі, розглянемо, якої шкоди завдає «виробнича» вібрація. Вона належить до найпоширеніших і найшкідливіших фізичних чинників, які призводять до розвитку синдромів вібраційної патології зі стійким зниженням або повною втратою працездатності. Встановлено, що однією з пріоритетних проблем профілактики професійних захворювань, які згодом призводять до нещасного випадку та/або аварії, є створення для працівників комфортних умов праці, що відповідають вимогам законодавчих та нормативних актів. Серед майже 300

нормативних документів стосовно шуму та вібрації, які є чинними в Україні тільки 50 документів стосуються безпосереднього впливу та шкідливої дії на організм людини [1].

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – дослідити види і шкідливу дію вібрації. Зменшення дії вібрації на виробництві є одними із найактуальніших завдань, які надзвичайно важко вирішуються. Причиною цьому є окремі конструкторські недоробки, підбір низькодемпфуючих матеріалів, облицювання технологічного устаткування малоефективними різноманітними віброзвукопоглинальними покриттями.

У світовій практиці є достатньо напрямів робіт щодо зниження рівня вібрації та шуму, до яких належать розробки, спрямовані на створення малозумних агрегатів, машин, двигунів і високоефективних вібро- та звукопоглинальних матеріалів і конструкцій на основі різних полімерних сполук і металосплавів з високим рівнем демпфірування і можливість їхнього застосування в діапазоні частот від 0 до 8000 Гц при температурах від 20 до +1800С в умовах агресивних середовищ.

Викладення основного матеріалу. Саме виробнича вібрація може бути зумовлена недостатньо сильною віброізоляцією та амортизацією обладнання та сільськогосподарських і транспортних машин. Щодо характеру впливу, вібраційні процеси бувають локальними та загальними. Тіло, що цілісно піддається тремтінню відноситься до загального типу, а окремі його елементи (ноги, руки) – до локальної [2].

Вібраційна хвороба – професійне захворювання, що спричинюється тривалою дією вібрації на організм людини. Строки розвитку та гострота захворювання залежать від спектральних характеристик вібрацій. Основні прояви хвороби: зміна тону судин, обміну в нервово-м'язовій та кістковій системах, зменшення кровозабезпечення тканин, порушення регуляції серцево-судинної та нервової систем. Характерні скарги: оніміння кінцівок, побіління пальців, біль, відчуття холоду, слабкість в руках, порушення чутливості; нерідко стомлюваність, нерізкі головні болі, підвищена дратівливість, порушення сну. При лікуванні «вібраційної хвороби» ефективні медикаменти і фіз. методи лікування, що поліпшують кровозабезпечення і обмінні процеси в нервово-м'язовій системі. Рекомендуються спазмолітики, вітаміни групи В, гангліоблокатори, лікувальна гімнастика, масаж, теплові процедури, сірководневі, радонові ванни та інш.

При роботі в умовах вібрацій продуктивність праці знижується, зростає кількість травм. Досить часто на робочих місцях вібрації перевищують допустимі значення, а в деяких випадках вони близькі до граничних.

Зазвичай у спектрі вібрації переважають низькочастотні вібрації, які негативно діють на організм. Деякі види вібрації несприятливо впливають на нервову і серцево-судинну системи, вестибулярний апарат. Найбільш шкідливий вплив на організм людини надає вібрація, частота якої збігається з частотою власних коливань окремих органів, приблизні значення яких такі (Гц): шлунок - 2 ... 3; нирки - 6 ... 8; серце - 4 ... 6; кишечник - 2 ... 4; вестибулярний апарат - 0,5 .. 1, 3; очі - 40 ... 100 і т.д.

Організму людини вібрація передається в момент контакту з віброуючим об'єктом: при дії на кінцівки виникає локальна вібрація, а на все тіло - спільна. Локальна вібрація вражає нервово-м'язові тканини і опорно-руховий апарат і призводить до спазмів периферичних судин. При тривалих і інтенсивних вібраціях в деяких випадках розвивається професійна патологія (до неї частіше призводить локальна вібрація): периферична, церебральна або церебрально-периферична вібраційна хвороба. В останньому випадку спостерігаються зміни серцевої діяльності, загальне збудження або, навпаки, гальмування, стомлення, поява болю, відчуття трясіння внутрішніх органів, нудота. У цих випадках вібрації впливають і на кістково-суглобовий апарат, м'язи, периферійний кровообіг, зір, слух. Місцеві вібрації викликають спазми судин, які розвиваються з кінцевих фаланг пальців, поширюючись на всю кисть, передпліччя, і охоплюють судини серця.

Тіло людини розглядається як поєднання мас з пружними елементами. В одному випадку це все тулуб з нижньою частиною хребта і тазом, в іншому - верхня частина тулуба в поєднанні з верхньою частиною хребта, нахиленою вперед. Для стоїть на віброуючій поверхні людини існують 2 резонансних піка на частотах 5 ... 12 і 17 ... 25 Гц, хто сидить на частотах 4 ... 6 Гц. Для голови резонансні частоти знаходяться в області 20 ... 30 Гц. У цьому діапазоні частот амплітуда коливань голови може перевищувати амплітуду коливань плечей в 3 рази. Коливання внутрішніх органів, грудної клітки і черевної порожнини виявляють резонанс на частотах 3,0 ... 3,5 Гц. [2].

Максимальна амплітуда коливань черевної стінки спостерігається на частотах 7 ... 8 Гц. Зі збільшенням частоти коливань їх амплітуда при передачі по тілу людини послаблюється. У положенні стоячи і сидячи ці ослаблення на кістках тазу рівні 9 дБ на октаву зміни частоти, на

грудях і голові - 12дБ, на плечі -12 ... 14 дБ. Ці дані не поширюються на резонансні частоти, при дії яких відбувається не послаблення, а збільшення швидкості коливань.

У виробничих умовах ручні машини, вібрація яких має максимальні рівні енергії (максимальний рівень віброшвидкості) у смугах низьких частот (до 36 Гц), викликають вібраційну патологію з переважним ураженням нервово-м'язової тканини та опорно-рухового апарату. При роботі з ручними машинами, вібрація яких має максимальний рівень енергії у високочастотній області спектру (вище 125 Гц), виникають головним чином судинні розлади. При впливі вібрації низької частоти захворювання виникає через 8 ... 10 років, а при дії високочастотної вібрації - через 5 років і раніше. Загальна вібрація різних параметром викликає різну ступінь вираженості змін нервово й системи (центральної і вегетативної), серцево-судинної системи і вестибулярного апарату.

Щодо нормативного регулювання, то у нас діють Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації, що затверджені постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 р. № 39 [3].

Санітарні норми поширюються на загальну та локальну вібрацію, що впливає на людину у процесі трудової діяльності, за винятком робіт на залізничному, водному та повітряному транспорті, де санітарні норми регламентуються відповідними документами.

Санітарні норми регулюють: градацію відповідних коливань в умовах виробництва; методику гігієнічного оцінювання вібрацій; відповідні параметри, на які встановлюються певні норми і їх дозволені величини; критерії до вимірів на робочому місці; профілактичні заходи.

За способом передачі на тіло людини розрізняють загальну та локальну вібрацію. Загальна вібрація передається на тіло людини, яка сидить або стоїть, переважно через опорні поверхні. Локальна вібрація передається через руки працюючих при контакті з ручним механізованим інструментом, органами керування машинами і обладнанням, деталями, які обробляються та ін. (далі обладнання, яке вібрує).

Вібрацію загальної дії, відповідно до джерела її походження, ділять на наступні категорії:

1. Транспортна вібрація – коливання, що оказують вплив на людину, яка знаходиться в умовах робочих місць причіпних чи самохідних машин. Сюди відносять транспортні засоби, що коливаються під час руху по дорогах чи іншій місцевості, а також у процесі їх розробки. Серед осередків транспортної вібрації знаходяться: промислове та сільськогосподарське самохідне устаткування (комбайни); вантажні автомобілі (сюди відносять скрепери, тягачі, грейдери а також котки); транспорт гірничошахтний що відноситься до самохідного рейкового, наприклад машини для вбирання снігу.

2. Транспортно-технологічна вібрація належить до другої категорії, що здійснює вплив на робітника в безпосередніх робочих умовах, де рухливість дуже обмежена. Таке устаткування здійснює рух лише по спеціальним поверхням на виробництві, в умовах робочих майданчиків. До осередків таких коливань можна віднести робочі екскаватори, наприклад, роторного виду, будівельна та промислова кранова техніка, устаткування для загрузки мартенів, комбайни гірничого призначення, бурильні каретки самохідного типу, укладчики бетону, шляхові машини та інше устаткування.

3. Технологічна вібрація належить до III категорії впливу на людину в робочих умовах. Вона здатна поширюватися на устаткування стаціонарного призначення та на робочі поверхні, яким не властиве дрижання. Джерелами коливань такої дії можуть бути метало- та деревообробне устаткування, робочі верстати, різноманітне ковальське та пресувальне обладнання, еkleктичні та ливарні машини, установки стаціонарного електричного виду дії, вентилятори та насоси. Сюди відноситься бурові агрегати для впорядкування свердловин, різноманітні машини для тваринництва, верстати та установки для очищення зерна і його сортування (сушарні), будівельне обладнання (не враховуючи бетоноукладчики), устаткування нафтохімічної та хімічної галузей і т.д. [2].

Відповідно до місця поширення, загальні технологічні коливання поділяють на такі:

- ті, що виникають в умовах постійного робочого місця на підприємствах;
- в умовах їдалень, побутових та складських приміщень, де не властива виробнича вібрація як така;
- на місцях конструкторських бюро, заводоуправліннях, медпунктах, лабораторіях, у робітничих приміщеннях, пунктах для учбових та обрахункових цілей, приміщеннях контор, а також у робочих кімнатах для спеціалістів розумової праці.

За типом утворення локальні коливання поділяють на такі: від механізованого ручного інструментарію та елементів керування відповідним обладнанням та машинною технікою; інструментів ручного використання без двигунів та складових, що знаходяться в обробці. Щодо напрямку поширення, виділяють виробничу вібрацію з урахуванням відповідних осей (X_3, Y_3, Z_3) системи координат ортогонального типу: ту, що поширюється перпендикулярно опорним площинам тіла у вертикальному напрямі – вісь Z_3 ; що відчувається у поздовжньо-горизонтальному напрямку, наприклад, груди-спина – X_3 ; поперечно-горизонтального типу дії: від плеча до плеча – Y_3 . За самим напрямом впливу локальні коливання характеризуються включенням осей (X_l, Y_l, Z_l) ортогональної системи координат: та, що діє поздовжньо осі X_l , яка становить паралель відносно осі місця охоплення джерел коливання, (наприклад, кермового колеса, держака, елементів керування) що перебувають в руках людини; діюча поздовжньо осі Z_l , яка становить паралель із зоною передпліччя руки робітника та Y_l осі; перпендикулярна до осей Z_l та X_l [3].

За часовими характеристиками загальні та локальні вібрації поділяють на:

- постійні, для яких величина віброприскорення або віброшвидкості змінюється менше ніж у 2 рази (менше 6 дБ) за робочу зміну;
- непостійні, для яких величина віброприскорення або віброшвидкості змінюється не менше ніж у 2 рази (6 дБ і більше) за робочу зміну.

Непостійні вібрації поділяють на:

- коливні, рівні яких безперервно змінюються в часі;
- переривчасті, коли контакт з вібрацією в процесі роботи переривається, причому довжина інтервалів, під час яких має місце контакт, становить більше 1с;
- імпульсні, що складаються з одного або кількох вібраційних впливів (наприклад, ударів), кожен довжиною менше ніж 1 с, при частоті їх дії менше ніж 5,6 Гц.

Гігієнічна оцінка вібрації, яка діє на людину у виробничих умовах, здійснюються за допомогою таких методів:

- частотного (спектральною) аналізу її параметрів;
- інтегральної оцінки по спектру частот параметрів, що всмоктуються;
- дози вібрації

При дії постійної локальної та загальної вібрації параметром, що нормується, є середньоквадратичне значення віброшвидкості (V) та віброприскорення (a) або їх логарифмічні рівні у дБ в діапазоні октавних смуг із середньо геометричними частотами.

Слід зазначити, що апаратура для здійснення вимірів має відповідати нормам чинного законодавства. Нормативна методологія при вимірюванні виробничих коливань: На самому початку вимірів та в їх кінці здійснюють електричне чи механічне калібрування апаратури для вимірів. Отримана різниця між ними не повинна бути вищою за 1 дБ. Виробничий шум та вібрація підлягають вимірам у реальних виробничих умовах застосування обладнання. Для оцінювання нового устаткування, вимірювання проводять на налагодженому активному обладнанні, що працює у технологічному чи паспортному режимах. Процес вимірювань здійснюють через рівні часові відрізки або без перерв. Має бути проведено не менше 3-х вимірювань. У процесі виміру, скорегованого щодо частоти значення вібраційних параметрів та спектрів, коли отримана розбіжність між значеннями виходить більше 3-х дБ, здійснюють 2 нових виміри. Далі, за отриманою різницею між мінімальним та максимальним рівнями, підраховують «К» коефіцієнт.

Точки вимірювання локальної вібрації обирають у місці контакту оператора з поверхнею, яка вібрує. Вібродатчик встановлюють на рівній, гладкій поверхні за допомогою шпильки М5 на різьбі (попередньо висвердлюється отвір і нарізається різьба). У разі неможливості кріплення вібродатчика шпилькою дозволяється використовувати перехідний елемент у вигляді хомута, струбцини та ін.

Якщо місце контакту має покриття з еластичного матеріалу, або рукоятка не має жорсткої основи, то вібродатчик кріплять на металеву пластину розміром 50 x 25 x 08 мм зі шпилькою.

Маса перехідного елемента не повинна перевищувати 10% маси інструменту (деталі що обробляються), а маса вібродатчика - 65 г.

При проведенні приймальних випробувань інструментів вимірювання вібрації проводять по трьох осях (X_n, Y_n, Z_n) ортогональної системи координат. Якщо значення вібрації по одній з осей перевищує її значення по другій осям на 6 дБ (у 2 рази) і більше, то цей напрям вказується у паспорті на машину і по ньому проводять виміри при наступному контролі. Вимірювання проводять в реальних умовах експлуатації. Час усереднення приладу повинен бути не менше 1 с.

При вимірюванні імпульсної вібрації визначають максимальне значення віброприскорення або його логарифмічний рівень при виконанні не менше ніж 10 ударів або за час роботи не менш ніж очна хвилина. Визначають кількість вібраційних імпульсів за робочу зміну за даними хронометражу або розрахунковим виміром. Розрахунок ведуть за час роботи не менше 3 разів з інтервалом часу не менш ніж 5 хвилин.

При тривалості зміни 7 годин гранично допустимі коректовані та еквівалентні коректовані рівні локальної вібрації дорівнюють значенням для 8-годинної тривалості зміни.

При 6-годинній тривалості зміни ці показники дорівнюють для вібро-швидкості 113 дБ ($2,3 \times 10^{-2}$ м/с), а віброприскорення -78 дБ ($2,3$ м/с²).

Робота в умовах дії локальної вібрації, що перевищує гранично допустиму більш ніж на 12 дБ, не дозволяється [4].

Окрім норм також необхідно дотримуватись певних правил. До обладнання, що вібрує, відноситься обладнання, під час роботи з яким виникає вібрація, що становить не менше 20% від значення допустимих величин віброшвидкості та віброприскорення.

До експлуатації повинно допускатися тільки справне обладнання, що відповідає вимогам даних норм. У технічному паспорті на обладнання, що вібрує, повинна бути вказана максимальна сила натискання, яка потрібна для роботи машин у паспортному режимі, та вага машини, що припадає на руки працюючого.

Ручні машини, що проектується та експлуатуються, повинні відповідати вимогам даних Санітарних норм та правил та нормативно-технологічних документів. Вага ручної машини, її частин, пристосувань, оброблюваної деталі, яка сприймається обома руками працюючого, повинна бути не більше ніж 100 Н. Машина, що важить понад 60 Н (включаючи масу вставного інструменту, рукоятки, що приєднується, шлангів, тощо) повинна мати підтримуючі пристрої. Сила натискання, що необхідна для роботи ручної машини у паспортному режимі, не повинна перевищувати для одноручної машини 100 Н та для дворучної - 200 Н. Держаки ручних машин, пристроїв, а також органів керування повинні мати форму, зручну для роботи і не викликати охолодження рук. Місця контакту з долоневою поверхнею повинні мати покриття з коефіцієнтом тепловіддачі не більш ніж 5×10 Вт/м град або повинні бути цілком виготовлені з матеріалів з коефіцієнтом теплопровідності не більш ніж 0,5 Вт/м•град. Вихлопи стисненого повітря чи відпрацьованого пару повинні бути спрямовані таким чином, щоб не відбувалося обдування рук та забруднення зони дихання працюючого.

Використання обладнання, що вібрує, не за призначенням та в режимах, що відрізняються від паспортних, не дозволяється. Проведення надручних робіт з обладнанням, яке вібрує, забороняється. Роботи з обладнанням, що вібрує, слід проводити у зачинених опалюваних приміщеннях, при оптимальних параметрах температури по відносній вологості, швидкості руху повітря з урахуванням важкості роботи та періоду року.

Для роботи з обладнанням, що вібрує, на відкритому повітрі у холодний період року у помірному кліматі для періодичного зігрівання працюючих, повинні передбачатися спеціальні приміщення з опаленням, та оптимальними параметрами температури, відносної вологості, швидкості руху повітря [4].

Площа приміщень для зігрівання визначається з розрахунку $0,1$ м² на одного працюючого у найбільш численну зміну, але вона повинна бути не менш ніж 12 м²; приміщення повинно знаходитися не далі ніж 150 м від місця виконання робіт.

Раціональний режим праці робітників вібронебезпечних професій встановлюється для конкретного робочого місця або виконання конкретних технологічних операцій, якщо вібрація перевищує гранично допустимі рівні не більше ніж на 12 дБ.

Раціональний режим праці може бути внутрішньозмінним, залежно від часової структури робочої зміни або робочих циклів (днів, вахт, тижнів)

В залежності від перевищення гранично допустимого рівня, вібрації за допомогою таблиці 10 визначається допустимий сумарний час дії вібрації за 8-годинну робочу зміну.

До організаційно-технічних заходів відносяться [4]:

- зменшення вібрації у джерелі вимкнення конструктивними і технологічними методами при розробці нових та модернізації існуючих машин;

- зменшення вібрації на шляху розповсюдження засобами віброізоляції та вібропоглинання, наприклад, за рахунок застосування спеціальних сидінь, майданчиків з пасивною пружинною ізоляцією, гумових, поролонових та ін. вібропоглинаючих матеріалів, мастил тощо;

- перевірка наявності вібраційних характеристик у паспортах на машини, які щойно надійшли, а при відсутності їх та у разі необхідності, проведення вхідного контролю;
- своєчасне проведення планового та попереджувального ремонту машин з обов'язковим післяремонтним контролем вібраційних характеристик,
- використання машин відповідно до їх призначення, передбаченого нормативно-технічною документацією;
- своєчасне проведення ремонту профілів шляхів та поверхонь для переміщення машин, їх покриттів, кріплень підтримуючих конструкцій та ін., що впливають на вібраційні характеристики машин;
- виключення контакту працюючих з поверхнями, що вібрують за межами робочого місця чи робочої зони (встановлення захисних засобів, сигналізації, блокування, попереджувальних написів і т.д.);
- не дозволяється обладнання постійних робочих місць безамортизуючих сидінь;
- до експлуатації повинні допускатися тільки справні машини, що відповідають вимогам даних норм.

Комплекс лікувально-профілактичних заходів містить:

- професійні і профілактичні огляди;
- режим праці;
- вітамінізацію;
- організацію профілактичного відпочинку;
- лікувальна гімнастика та масаж рук;
- використання засобів індивідуального захисту,

До роботи операторами машин допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд, мають відповідну кваліфікацію, склали технічний мінімум правил охорони праці та ознайомлені з характером впливу вібрації на організм.

Оператори машин, які зазнають у промесі трудової діяльності впливу вібрації, підлягають щорічним періодичним медичним оглядам.

З метою підвищення стійкості організму операторів машин слід проводити: вітамінопрофілактику (вітамін С, В1 та нікотинова кислота) два рази на рік протягом чотирьох тижнів у осінній та весняний періоди – жовтень-листопад та лютий-березень, курси масажу, який виконує масажист, і лікувальної гімнастики (за призначенням лікаря).

Для профілактичного лікування та відпочинку працюючих, в тому числі і зайнятих у вібронезбезпечних професіях, на підприємствах повинні бути організовані профілакторії, кабінети психологічного розвантаження і кімнати, де працюючи обов'язково проводять масаж рук під струменем теплого повітря або сухий обігрів та мікромасаж на спеціальному обладнанні.

У нормативній документації на машини, які створюють вібрацію, розробником вказуються технічні норми вібрації. Норми вібрації вносяться до технічних умов на конкретну машину та паспорт.

У нормативній документації на машини визначаються умови, в яких установлені технічні норми вібрації та методи контролю вібраційних характеристик (ВХ) машин. [5]

Ці процеси здатні завдати серйозної шкоди людському здоров'ю, у тому числі: струс мозку; порушення у серцевому функціонуванні; розлади нервової та судинної систем; приступи перетоми тощо.

Нав'язливий виробничий шум та вібрація частотою більше ніж 200 Гц серйозно виснажують хитку нервову систему та викликають збільшене психічне навантаження.

Висновки. Санітарні норми є обов'язковими для всіх, відомств, підприємств, об'єднань, організацій, установ, незалежно від відомчої приналежності та форм власності, а також організацій, громадян, які проектують, виготовляють та експлуатують вібронезбезпечне устаткування, механізми і інструменти, які розробляють та впроваджують заходи щодо зниження шкідливого впливу виробничих вібрацій, а також які виконують державний санітарний нагляд за умовами праці.

Вимоги норм повинні бути враховані у нормативно-технічних документах: стандартах, будівельних нормах, технічних умовах, інструкціях, методичних вказівках та ін., які регламентують конструктивні та експлуатаційні вимоги до вібронезбезпечних машин, устаткування, обладнання та інструменту, технологічних процесів і регламентів, зарубіжних виробів [5].

Всі вони виступають гарантом експлуатаційних та конструктивних вимог відносно вібронебезпечного обладнання, машин, інструментів, технологічних розробок та зарубіжних виробів. Відомча документація має бути відповідною положенням перерахованих норм.

Особливу увагу працезохоронних органів слід звернути на діагностування машин, механізмів і обладнання на наявність шумів, вібрацій і інших конструктивних особливостей з послідувачим нормуванням робочих процесів з метою захисту персоналу, що їх обслуговує.

Для захисту від негативної дії вібрації слід практикувати застосування із зниженою вібрацією обладнання, вібропоглинання, оснащення вібронебезпечних машин і технологій засобами дистанційного телеавтоматичного управління.

Разом з суворим контролем дотримання порядку проходження медичних оглядів працюючих працезохоронні заходи в господарстві повинні включати проведення лабораторних досліджень умов праці, атестацію робочих місць на відповідність нормативним актам про охорону праці в порядку і строки, що встановлюються законодавством, в життя за їх підсумками заходів щодо усунення небезпечних і шкідливих для здоров'я виробничих факторів.

Список використаних джерел:

1. Каталог нормативних документів 2011 : у 3-х т. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2011. – Т. 1–3.
2. Виробничий шум та вібрація // Довідник спеціаліста служби охорони праці. № 4, 2017. - С.34-54. Режим постійного доступу: <https://www.sop.com.ua/article/193-virobnichiy-shum-ta-vbratsya>.
3. ДСН 3.3.6.0.39 - 99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. К. 1999 р.
4. Білінський Б. О. Вібрація як фактор зниження працездатності людини / Б. О. Білінський, О. Л. Мірус, О. О. Тригуба // Матеріали міжнар. наук конф., 19–21 листопада 2008 р. : зб. наук. праць. – К. : НТУУ і ДУ «ННДПБООП», 2008. – С. 44–46.
5. Єсипенко А. Розроблення переліку профілактичних заходів щодо поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища. / А. Єсипенко // На допомогу спеціалісту з охорони праці, № 4, 2012. – С.36–40.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2018

УДК 621:658.562.3/6

Д.С. Фоменко

Одеський національний політехнічний університет

КОНТРОЛЬ ДИНАМІЧНОЇ НЕВРІВНОВАЖЕНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ

У роботі проведено аналіз методів контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання. Приведена методика контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання дозволяє розрахувати невірноважену силу і момент в залежності від масово-геометричних і кінематичних характеристик, оцінити якість їх виготовлення за величиною кутового відхилення головної центральної осі інерції від геометричної осі обертання, привести до однієї рівнодіючої при наявності невірноваженості в декількох перетинах, що дає можливість побудувати метод автоматичного контролю.

Ключові слова: динамічна невірноваженість, контроль, металеві тіла обертання.

Літ. 7.

Д.С. Фоменко

Одесский национальный политехнический университет

**КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ
ВРАЩЕНИЯ**

В работе проведен анализ методов контроля динамической неуравновешенности металлических тел вращения. Приведенная методика контроля динамической неуравновешенности металлических тел вращения позволяет рассчитать неуравновешенную силу и момент в зависимости от массово-геометрических и кинематических характеристик, оценить качество их изготовления по величине углового отклонения главной центральной оси инерции от геометрической оси вращения, привести к одной равнодействующей при наличии неуравновешенности в нескольких пересечениях, что дает возможность построить метод автоматического контроля.

Ключевые слова: динамическая неуравновешенность, контроль, металлические тела вращения.

D.S. Fomenko

Odessa National Polytechnic University

CONTROL OF DYNAMIC UNBALANCE OF METAL BODIES OF REVOLUTION

The paper analyzes the methods of controlling the dynamic unbalance of metal bodies of revolution. The given methodology of controlling the dynamic unbalance of metal bodies of revolution allows calculating the unbalanced force and moment depending on mass geometric and kinematic characteristics, evaluating the quality of their production by the magnitude of the angular deviation of the main central inertia axis from the geometric axis of rotation, reducing to one resultant force in case of unbalance in several sections, which makes it possible to build an automatic control method. On the basis of the above-mentioned methodology of control of dynamic unbalance, one can determine the values of the unbalanced forces and moment caused by an unbalance of controlled metallic bodies of revolution, with subsequent development of methods and control theory.

Keywords: dynamic unbalance, control, metal bodies of revolution.

Постановка проблеми. Як відомо [1-3] динамічна невірноваженість металевих тіл обертання характеризується наявністю як статичної, так і моментної невірноваженості, коли відмінні від нуля і головний вектор дисбалансів, і головний момент дисбалансів. При динамічній невірноваженості металевих тіл обертання вісь їх обертання і одна з головних осей інерції або перетинаються поза центром мас, або перехрещуються в просторі.

Металеві тіла обертання, що мають великі кутові швидкості, повинні бути добре врівноважені щоб уникнути биття, вібрації, порушення центрування і підвищення навантаження на опорні деталі. Розрізняють три види невірноваженості [2, 4]:

- невірноваженість, що викликається зміщенням центру ваги деталі щодо осі обертання, при якій сила інерції приводиться до однієї рівнодіючої відцентрової сили. Така невірноваженість характерна для деталей з незначною осьовою довжиною в порівнянні з діаметром (маховики, шків, зубчасті колеса) і усувається статичним (одноплосинним) балансуванням;

- невірноваженість, при якій сили інерції приводяться до рівнодіючої пари сил, що створює відцентровий момент інерції щодо осі обертання;

- невірноваженість, при якій сили інерції приводяться до рівнодіючої сили і до пари сил.

Другий і третій види невірноваженості характерні для деталей, що мають значну довжину в порівнянні з діаметром (ротори) і усуваються динамічним (двоплосинним) балансуванням, при якому одночасно зменшуються статична і моментна невірноваженості. На практиці, динамічне балансування являє собою процес перевірки розподілу мас металевих тіл обертання і, при

наявності дисбалансів, зміна цього розподілу відбувається за допомогою коригувальних мас до досягнення допустимого значення дисбалансу.

Металеві тіла обертання більшості відомих машин на робочих частотах можна розглядати, як жорсткі і застосовувати до них методи динамічного балансування, регламентовані ГОСТ ІСО 1940-1. Дані методи передбачають усунення головного вектора дисбалансів – установкою корегуючої маси в одній площині корекції і усунення головного моменту дисбалансів – розподілом мас у двох площинах корекції. Також застосовується і ГОСТ 31320, який передбачає кілька методів динамічного балансування.

Сучасні методи динамічного балансування металевих тіл обертання засновані на пропорційності амплітуди і фази вібрації чинного дисбалансу. Іншими словами, вимірюючи вібраційні характеристики металевих тіл обертання, можна точно визначити величину і місце установки коригувальних мас в обраних площинах корекції [1, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для випадку якщо контрольоване металеве тіло обертання встановлено в базове пристосування так, що вісь обертання його зафіксована, то всі існуючі методи контролю зводяться до двох великих груп. У першій групі сили прикладаються до маси металевих тіл обертання і відбувається реєстрація виникаючих кутових поворотів. У другій групі методів змінюють кутове положення металевих тіл обертання і проводять реєстрацію виникаючих при цьому неврівноважених інерційних сил.

У першій групі – сили, які прикладаються до маси металевих тіл обертання – це або сила тяжіння (постійна), або сила інерції (найчастіше змінюється за гармонійним законом). Використання сили тяжіння, що повертає неврівноважену деталь в базовому пристосуванні, є одним з найбільш старих методів визначення статичної неврівноваженості, що застосовуються всюди, де не потрібна висока точність [2, 4, 5].

Базовою поверхнею металевого тіла обертання поміщають на горизонтальну або похилу плиту (або ножі); дисбаланс (неспівпадіння центру мас з геометричною віссю) проявляється у вигляді крутного моменту, що діє до тих пір, поки вони не урівноважаться і центр мас не займе крайнє нижнє положення на горизонтальній плиті. Якщо скачувати металеве тіло обертання по похилій плиті, крутний момент від неврівноваженої сили алгебраїчно додається моменту кочення і тим самим впливає на кутове прискорення тіла. Перевагою методу контролю є відсутність джерел шкідливих вібрацій, простота реалізації і можливість автоматизації; недоліком методу контролю є невисока точність горизонтального способу через зменшення крутного моменту в міру заняття металевим тілом крайнього положення [4-6].

Більш високу точність і продуктивність дає метод накладення замість постійної сили тяжіння змінних сил інерції (метод лінійних і кутових коливань). Контрольоване металеве тіло обертання закріплюється на опорах і за допомогою віброприводу повідомляють йому лінійні (за координатою) або кругові (за двома координатами із зсувом фаз в 90°) коливання в площині, перпендикулярній осі тіла. Дисбаланс виявляється у вигляді кутових коливань контрольованого металевого тіла обертання в опорах (з'являється крутний момент інерційних сил, що змінюється за гармонійним законом через розбіжність центру мас металевого тіла обертання з його геометричною віссю повороту). Кутові коливання вимірюються за допомогою відповідних датчиків і перетворюються в електричні сигнали, по амплітуді яких судять про величину дисбалансу [1, 2, 4-7].

До переваг методу контролю можна віднести високу продуктивність та простоту приводу, а до недоліків – збільшену витрату часу на зміну контрольованих металевих тіл обертання на позиції контролю та необхідність у наявності настановних баз. Накладення кутових коливань краще накладення лінійних, оскільки при цьому виключається можливість виникнення «мертвих зон», що маскують наявність дисбалансу і скорочується час контролю (не потрібно його повертати щодо направлення дії коливань)[7]. Недоліком методу кутових коливань є складність технічної реалізації контролю динамічної неврівноваженості.

З точки зору високої продуктивності перспективним видається використання тимчасового способу контролю, при якому транспортний рух поєднаний з процесом контролю [6].

Принцип накладення сил тяжіння лежить в основі тимчасового способу контролю дисбалансу: металеве тіло обертання скачують з двох початкових кутових положень, що розрізняються на 90° і вимірюють різницю в часі кочення тіла до датчика положення кінцевого вимикача. Слід зазначити, що різниця в 90° між вихідними кутовими положеннями необхідна тільки для визначення фази дисбалансу. Якщо ця умова знімається, доцільно процес контролю

наблизити до випадкового пошуку, задаючи приблизно декілька вихідних положень, оскільки важливо зробити такі ситуації, коли відхилення часу кочення буде максимальним [6].

Класичним методом за своєю сутністю є моделювання реальних умов експлуатації контрольованих металевих тіл обертання. Характерною особливістю класичного методу є те, що в процесі контролю металеві тіла обертаються. Даний метод, в свою чергу, підрозділяється на наступні види: обертання в базовому пристосуванні, вісь якого зафіксована, скочування з похилої площини і вільне обертання на опорних обертових валах [5].

При застосуванні методу контролю – обертання в базовому пристосуванні, контрольоване металеве тіло обертання встановлюється в базовому пристосуванні і починають обертання з певною кутовою швидкістю. Завдяки зсуву центру мас металевих тіл обертання моментна нерівноваженість проявляється у вигляді сукупності головного вектора і головного моменту сил інерції, яка викликає вимушені коливання пов'язані з контрольованим тілом механічної системи базового пристосування. Роль чутливого елемента виконує саме базове пристосування, за коливаннями якого судять про нерівноваженість контрольованого металевого тіла обертання. Слід зазначити, що базове пристосування спільно з валом врівноважено за допомогою пружинних підвісів і здійснено віброізоляцію приладу від приводу обертання [3, 5].

При застосуванні амплітудного методу контролю, який заснований на класичному принципі – обертання контрольованого металевого тіла обертання при скочуванні на похилій плиті і зняття сигналів з датчиків. При скочуванні металевих тіл обертання по похилій площині дисбаланс проявляється у вигляді періодичного впливу на опору. В даному методі необхідно, щоб похила площина була налаштована в резонанс, тобто необхідний збіг частот власних опор і вимушених коливань металевих тіл обертання за рахунок дисбалансу [4, 5].

Якщо металеві тіла обертання мають малі маси і розміри і відсутня нормальна базова поверхня, то найкращим методом контролю динамічної нерівноваженості є метод вільного обертання. При цьому є можливість зменшити шкідливий вплив вібрацій приводу на результати контролю шляхом відділення датчиків від опор. Іншими словами, необхідно використовувати датчик, який безпосередньо реєструє коливання тіла. Що стосується конструкції опор, то більш переважним є використання аеростатичного принципу, що зменшує вплив похибок форми опорної поверхні металевих тіл обертання, проте, щоб мати загальне уявлення про правильність обраного напрямку, може бути вироблено з використанням більш простих в реалізації двовалкових приводних опор.

Датчиками коливань металевих тіл обертання можуть бути застосовані фотоелектричні датчики. Датчиком також може служити самі нерівноважені металеві тіла обертання, що зриваються з валків при різних кутах нахилу в залежності від величини нерівноваженості. Суть методу контролю полягає в тому, що контрольоване металеве тіло обертання встановлюється на двох обертових опорах (валках), які встановлені на жорсткій рамі повороту. Електропривод обертає опорні валки. Контрольовані металеві тіла обертаються з ще більшою швидкістю в зв'язку з тим, що діаметр тіл приблизно в два рази менше діаметра валків [3].

При обертанні металевих тіл обертання з'являється нерівноважена відцентрова сила при наявності радіального зміщення центру мас (РЗЦМ), яка прагне зірвати контрольоване тіло з валків. Глибина посадки металевого тіла обертання обирається таким чином, щоб при можливому максимальному значенні РЗЦМ виключити зрив тіла до повороту рами.

У міру нахилу рами (зростання кута повороту) глибина посадки металевого тіла обертання зменшується, і воно зривається з валків. Чим більше радіальна нерівноваженість, тим менше буде кут повороту рами і навпаки. Можливості даного методу досить широкі: можна контролювати нерівноваженість металевих тіл обертання за кутами повороту рами, за швидкістю обертання валків і інтегральним способом. В принципі можлива комбінація з двох і навіть трьох параметрів, проте в цьому випадку, особливо для останнього, недоцільність такого поєднання очевидна через ускладнення системи контролю. Ці методи враховують, крім статичної нерівноваженості і моментну нерівноваженість. Саме металеве тіло обертання вільно обертається на валках, навіть під дією моментної нерівноваженості відчуває зіткнення з валками. Причому слід зауважити, що чутливість методу до моментної нерівноваженості приблизно в три рази вище, ніж до чисто статичної. До переваг такого методу слід віднести: граничну простоту конструкції – саме нерівноважене металеве тіло обертання як би є датчиком, простоту автоматизації, він дозволяє здійснювати сортування металевих тіл обертання за групами якості і, що важливо, одночасно контролюється якість металевих тіл обертання (відхилення форми, осьовий зсув центру мас,

розбіжність осей поверхонь та інші відхилення, які в кінцевому підсумку істотно впливають на зрив тіл з опорних валиків) [4-7].

Оскільки важко визначити безпосередньо величину радіального зміщення центру мас металевих тіл обертання, то її можна виявити побічно за величиною відхилення траєкторії руху, моделюючи реальні умови експлуатації і при застосуванні методів математичної статистики при обробці результатів [4]. Для усунення похибок при визначенні невірноваженості металевих тіл обертання вони попередньо контролюються на точність за формою і геометричними розмірами. Пристрій для моделювання складається з механічного пристосування, що імітує рухи металевих тіл обертання при їх експлуатації, електронної схеми і вимірювальної машини.

Контрольоване металеве тіло обертання встановлюється в механічне пристосування, де воно спочатку обертається до необхідної швидкості обертання, потім спеціальним пристроєм йому повідомляють поступальний рух. Проходячи певну відстань, металеве тіло обертання потрапляє в вимірювальну мішень, на якій нанесено шар воску товщиною 10 мм і там залишає слід. За даними мішені визначають відхилення від заданої траєкторії щодо результатів еталонного металевого тіла обертання. Перевагою даного методу є те, що металеві тіла обертання контролюються в умовах, близьких до реальних, а недоліком – складність виготовлення установок для моделювання і методів проведення випробувань, а також вплив побічних результатів на точність контролю [7].

Також застосовується інтегральний метод контролю РЗЦМ металевих тіл обертання, який полягає в тому, що металеве тіло обертання з РЗЦМ вільно обертається на валках і під впливом моментної невірноваженості відчуває зіткнення з валками [7]. Амплітуди і частоти коливань при цьому залежать від величини РЗЦМ, некруглості металевих тіл обертання. Метод заснований на вимірюванні величини підсакувань металевих тіл за певний час, що дозволяє побічно судити про величину його дисбалансу.

Для вимірювання величини вертикальних переміщень металевих тіл обертання використовується фотоелектричний датчик, оптична вісь якого розташована уздовж осі обертання валків на висоті, що відповідає верхній межі контрольованого металевого тіла обертання. До основних переваг методу можна віднести порівняно високу продуктивність, простоту конструкції, легкість автоматизації та можливість оцінки якості металевого тіла обертання в цілому.

Крім того, контроль невірноваженості металевих тіл обертання можна здійснювати за часом розгону та швидкості його обертання на валках [5, 6]. При цьому металеве тіло обертання встановлюється на обертові валки з нульовою початковою швидкістю. З цього моменту починається процес вимірювання швидкості обертання металевого тіла до певної граничної сталої швидкості обертання. Інформація про поточне значення швидкості обертання металевого тіла надходить в підсилювач, далі в компаратор, де порівнюється з сигналом до відповідно встановленої швидкості.

Після досягнення її металевим тілом обертання генератор секундних імпульсів, безперервно видає до цього сигнал в цифровій індикації, фіксує час розгону тіла до постійної встановленої швидкості, і потім відключається. За часом розгону до спеціальної характеристики визначають РЗЦМ металевого тіла обертання. Інший спосіб визначення РЗЦМ металевого тіла обертання полягає у вимірюванні датчиком швидкості значення сталої швидкості тіла, яка залежить від його РЗЦМ.

Постановка завдань. У роботі необхідно виконати аналіз методів контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання та запропонувати методику контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання.

Викладення основного матеріалу. Метод кутових коливань, хоча і дає порівняно велику точність, ніж метод докладання зусиль, дуже складний для практичної реалізації, особливо для дрібних металевих тіл обертання з малою масою. При цьому потрібен час на установку і зняття металевого тіла обертання, що істотно знижує продуктивність праці і вимагає наявності у тіл базової поверхні. У зв'язку з цим, даний метод неприйнятний для контролю широкої номенклатури металевих тіл обертання.

Метод застосування сили тяжіння становить інтерес тим, що він високопродуктивний, завдяки поєднанню руху транспортування з контролем, крім того, і реалізація даного методу проста, тому необхідно його теоретичне і експериментальне дослідження.

У методі обертання становить інтерес саме обертання контрольованого металевого тіла обертання в базовому пристосуванні. Метод має високу чутливість і може бути застосований, якщо процес контролю вибірковий, що має місце в масовому виробництві, а також при наявності

базової поверхні в металевому тілі обертання. При цьому потрібна висока точність виготовлення і збірки пристрою контролю для отримання високої чутливості системи вимірювання.

Метод обертово-поступального руху контрольованого металевого тіла обертання («похила площа») відрізняється в порівнянні з іншими відносно меншою точністю, але більшою продуктивністю завдяки поєднанню транспортного руху з процесом контролю, та може бути застосований для контролю металевих тіл обертання, до яких пред'являються не дуже високі вимоги по точності. Конструктивно метод простий і його реалізація не вимагає особливої складності.

Метод вільного обертання контрольованого металевого тіла обертання на обертових опорних валках є перспективним і дозволяє враховувати і інші відхилення крім РЗЦМ– похибки форми, внутрішні і зовнішні дефекти.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що для створення систем контролю динамічної нерівноваженості металевих тіл обертання мають бути розроблені такі методи: прикладання зусиль, обертання металевих тіл обертання в базовому пристосуванні, обертово-поступального руху металевого тіла обертання на похилій площині і обертання металевого тіла обертання на аеростатичних опорах.

Для розробки методу визначення динамічної нерівноваженості металевих тіл обертання можна використати результати робіт [2, 4-6].

Припустимо, що металеве тіло обертання з розподіленою масою при наявності РЦМ обертається навколо геометричної осі з кутовою швидкістю ω і кутовим прискоренням ε .

Згідно [4] результуюча сила інерції дорівнює:

$$P = m e \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \quad (1)$$

де m – маса металевого тіла обертання; – величина РЗЦМ.

Умова, при якій металеве тіло обертання буде врівноважено при його обертанні навколо геометричної осі, очевидно буде виконано, коли сили інерції дорівнюють нулю, а це відповідає відсутності РЗЦМ, тобто при розташуванні центру мас металевого тіла на осі обертання. Металеве тіло обертання, що задовольняє даній умові, є статично врівноваженим, це означає, що його рівноважний стан буде забезпечено при будь-якому кутовому положенні.

Однак слід зазначити, що це металеве тіло обертання буде повністю урівноваженим (динамічне урівноваження), якщо крім вище названої умови складові вектора моменту сил інерції дорівнюватимуть нулю. Момент інерції M з'являється тільки при несталому русі. З теоретичної механіки відомо, що відцентрові моменти інерції звертаються в нуль тоді, коли осі інерції є її головними осями. Звідси випливає, що моменти сил інерції металевого тіла обертання будуть дорівнюють нулю і вони повністю будуть врівноважені, якщо геометрична вісь буде головною віссю інерції.

Момент інерції звертається в нуль, якщо руху немає, тому статичними методами виявити розбіжність головної осі інерції з віссю обертання не представляється можливим.

Чисельне значення моменту інерції [7] дорівнює:

$$M = I_z \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \quad (2)$$

де I_z – момент інерції навколо осі обертання тіла OZ .

На практиці зручно розглядати нерівноважену силу і момент через дисбаланс D [7], який є мірою нерівноваженості металевих тіл обертання, який визначається:

$$D = m e, \quad (3)$$

У відповідності з останнім виразом, перепишемо формули (1), (2) в наступному вигляді:

$$P = D \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, M = D e \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \quad (4)$$

При сталому процесі, тобто $\varepsilon = 0$, маємо:

$$P = D \omega^2, M = D \omega^2 e \quad (5)$$

Аналіз будь-якого металевого тіла обертання показує, що значення відцентрового моменту інерції (5) коливається в зв'язку з несиметричними розподілами мас щодо геометричної осі обертання, викликаними похибками його виготовлення. Тому для оцінки стану динамічної нерівноваженості металевих тіл обертання з їх масо-геометричними характеристиками доцільно пов'язати положення головної центральної осі інерції з величиною відцентрового моменту інерції.

Для визначення кутового відхилення головної центральної осі інерції можна використовувати методику, розроблену в [7]. Суть методу полягає в застосуванні поняття вектора кута, розгляді головної центральної осі інерції у відповідних координатних площинах і їх зв'язку з масо-геометричними характеристиками металевого тіла обертання. Така форма подання невірноваженості металевого тіла обертання зручна при дослідженні процесу контролю. Крім того, складові вектора відцентрового моменту можна уявити як результат пари сил дисбалансу в площині, перпендикулярній вище названому вектору.

Висновки. На підставі проведеного аналізу систем контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання було запропоновано методику. Приведена методика визначення динамічної невірноваженості металевих тіл обертання дозволяє розрахувати невірноважену силу і момент в залежності від масово-геометричних і кінематичних характеристик за формулою (5), оцінити якість їх виготовлення за величиною кутового відхилення головної центральної осі інерції від геометричної осі обертання, привести до одної рівнодіючої при наявності невірноваженості в декількох перетинах, що дає можливість приступити до побудови методу автоматичного контролю РЗЦМ.

Таким чином, за допомогою приведеної методики контролю можна визначити значення невірноваженої сили і моменту, викликаними наявністю дисбалансу контрольованих металевих тіл обертання, що дає можливість приступити до розробки методів і теорії контролю. Для виявлення РЗЦМ металевих тіл обертання необхідно надати їм обертальний рух. При цьому виникають невірноважена сила і момент, які впливають на датчик, який буде інформувати про збільшення РЗЦМ металевих тіл обертання. На основі приведеної методики можна також розробити ряд методів автоматичного контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання.

Список використаних джерел:

1. Савуляк, В. В. Складальні процеси в машинобудуванні: навчальний посібник / укладач: В. В. Савуляк – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 99 с.
2. Advances in applied mechanics. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2013. – 453 p.
3. Безжон В. И. Технологичность конструкций машин: учебное пособие / В. И. Безжон, М. Е. Попов, А. М. Попов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2009. – 63 с.
4. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed.by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2012. – Vol 18. – 427 p.
5. Burch, John GandStrater, Felix R. Information systems: Theory and practice.– Santa Barbara; Hamilton, 2014. – 494 p.
6. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed.by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2012. – Vol 18. – 427 p.
7. Distributed parameter control systems: Teory and application / Ed.ByS.G. Tzafestas. – Oxford a.o.: Pergamon Press, 2014. – 497 p.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2018

УДК 678.6:677.5: 620.179

О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, А.В. Токар, С.В. Кравченко, Г.О. Петрушина
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНА С-2

Досліджена структура, термічні, фізико-механічні та трибологічні властивості ароматичного поліаміду фенілон С-2 та вуглепластика на його основі, що містить 15 мас. % вуглецевого волокна углен. Встановлено, що армування фенілона вуглецевим волокном суттєво підвищує його основні експлуатаційні характеристики. Розроблений вуглепластик може бути рекомендований до експлуатації як матеріал конструкційного призначення вузлів тертя машин і механізмів.

Ключові слова: ароматичний поліамід, фенілон С-2, вуглецеве волокно, властивості

О.П. Чигвинцева, И.В. Рула, А.В. Токарь, С.В. Кравченко, Г.А. Петрушина
Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет
ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА С-2

Исследована структура, термические, физико-механические и трибологические свойства ароматического полиамида фенилон С-2 и углепластика на его основе, содержащего 15 мас. % углеродного волокна углен. Установлено, что армирование фенилона углеродным волокном существенно повышает его основные эксплуатационные характеристики. Разработанный углепластик может быть рекомендован к эксплуатации как материал конструкционного назначения узлов трения машин и механизмов.

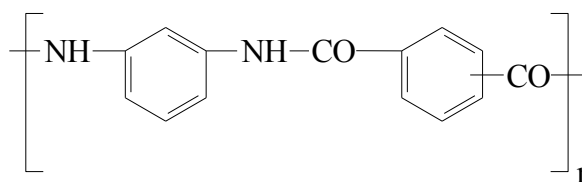
Ключевые слова: ароматический полиамид, фенилон С-2, углеродное волокно, свойства

O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, A.V. Tokar, S.V. Kravchenko, G.A. Petrushina
Dnipro State University of Agriculture and Economics
STUDY OF THE PROPERTIES OF CARBON PLASTIC BASED ON PHENYLONE C-2

The structure, thermal, physico-mechanical and tribological properties of the aromatic polyamide phenylone C-2 and carbon plastic based on it, containing 15 wt. % of the carbon fiber ughen, was investigated. It has been established that reinforcement of phenylon with carbon fiber significantly increases its main operational characteristics. It was found that the heat resistance increased by 9-13 degrees, the tensile strength and the modulus of elasticity at compression increased by 110 MPa and 1515 MPa, respectively. Also the wear resistance increased and the criterion of the material's working capacity increased from 1,0 to 1,6 MPa · m/s, and the friction coefficient decreased by 62-65%. The developed carbon fiber reinforced plastic is recommended for use as a material for the structural purpose of friction units for machines and mechanisms.

Key words: aromatic polyamide, phenylon C-2, carbon fiber, properties

Постановка проблеми. До перспективних конструкційних матеріалів спеціального призначення відноситься ароматичний поліамід фенілон марки С-2, який являє собою лінійний гетероцепний сополімер, що містить у головному ланцюгу макромолекули амідні групи, обрамлені з обох сторін фенільними фрагментами (арамід) [1]:



Основні технологічні характеристики полімеру приведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Властивості фенілона С-2

Зовнішній вигляд	Насипна густина, г/см ³	Вологість, %	Питома в'язкість 0,5%-го розчину у ДМФА	Температура склування, К
Дрібнодисперсний білий порошок	0,33	0,40	1,2	553

Завдяки високим значенням тепло- і термостійкості, міцності, стійкості до ударних навантажень та покращеним трибологічним властивостям, цей полімер широко застосовується у різноманітних галузях промисловості. Однак, при експлуатації в умовах тертя без змащування фенілон С-2 має достатньо високі значення коефіцієнта тертя, що суттєво обмежує його використання. Наповнення поліамідних в'язучих дрібнодисперсними наповнювачами, що традиційно використовуються для покращення триботехнічних характеристик цих полімерів

(дисульфід молібдену, графіт, фторопласт-4 тощо), призводить до погіршення фізико-механічних властивостей композитів.

Одним із перспективних методів покращення властивостей фенілона є армування його вуглецевим волокном (ВВ). Вуглецеве волокно не лише високоміцне і стійке до дії негативних зовнішніх факторів, але також має високу термічну стійкість, стійкість до руйнування, гарну здатність до розтягування та багато інших покращених показників.

Для армування фенілона С-2 було використане гідратцелюлозне ВВ марки Углен-9 (15 мас. %) діаметром 7÷9 мкм і довжиною 3 мм. Основні властивості вуглецевого волокна наведені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Властивості волокна Углен-9 [2]

Крихкість, ум. од.	Вологість волокна, %	Міцність джугта, кгс/мм ²	Модуль пружності, ГПа	МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ВОЛОКНА при розриві, МПа
20-40	3	не менше 6	15-18	350-500

Викладення основного матеріалу. На початковому етапі досліджень нами було здійснено детальний структурний аналіз обраного полімерного матеріалу із використанням методів квантової хімії, що включав теоретичне обґрунтування ефектів внутрішньо- і міжмолекулярного водневого зв'язування із оцінкою його впливу на міцнісні характеристики полімеру. Одержані результати показали, що між окремими мономерними ланками макромолекул фенілона С-2 має місце як утворення типових водневих зв'язків $>C=O \cdots H-N<$, так й цілого ряду електростатичних взаємодій, переважно за участю атомів Гідрогену у *орто*-положеннях бензенових кілець, зі значним сумарним внеском у загальну енергію стабілізації. При цьому основним напрямом взаємодій слід визнати перекривання типу $n_{1,2}(O) \rightarrow \sigma^*(NH)$ з енергіями 15,4 та 9,5 кДж/моль, що відповідають перенесенню електронів із власних неподілених електронних пар атомів Оксигену карбонільних груп на розпушуючі орбіталі NH-зв'язків. Запропоновані теоретичні моделі адекватно відображають енергетичні параметри досліджуваної системи.

Як показали результати рентгеноструктурного аналізу, дифрактограми ароматичного поліаміду фенілон С-2 і вуглепластика на його основі, армованого 15 мас.% вуглецевого волокна углен, мають різний характер (рис. 1). Звертає на себе увагу той факт, що аморфне гало, яке проявляється на кривих в області кутів Вульфа-Брега $2\theta = 20-30$ рад для вуглепластика суттєво зростає.

Розрахунок за формулою Селякова-Шеррера [3] показав, що розміри кристалітів полімерної матриці зменшуються для вуглепластика, що також підтверджує той факт, що вказаний композит має більш аморфну структуру у порівнянні з полімерною матрицею (табл. 3).

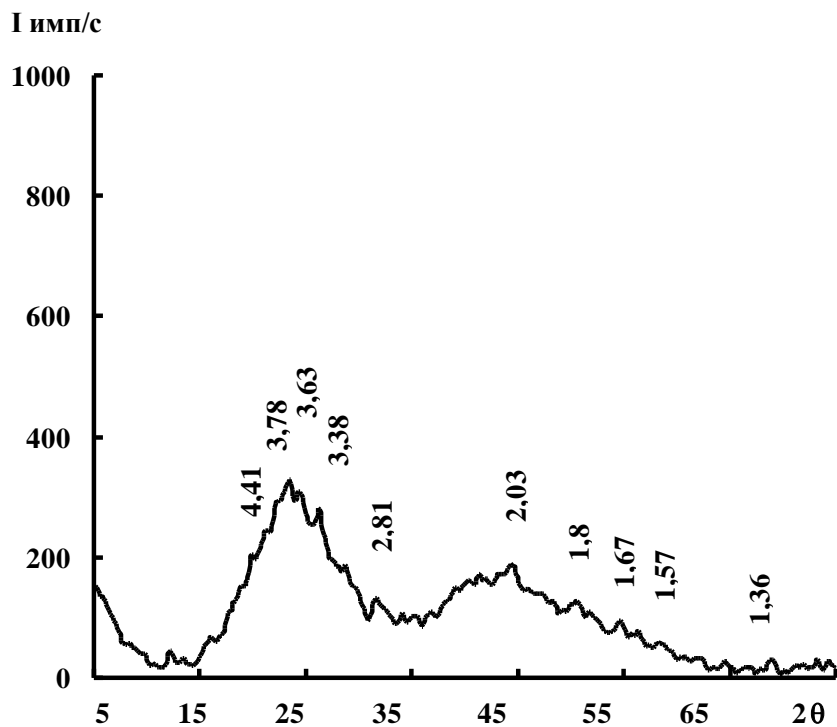
Таблиця 3.

Значення напівширини піків β і середнього розміру кристалітів L фенілона С-2 і вуглепластика на його основі

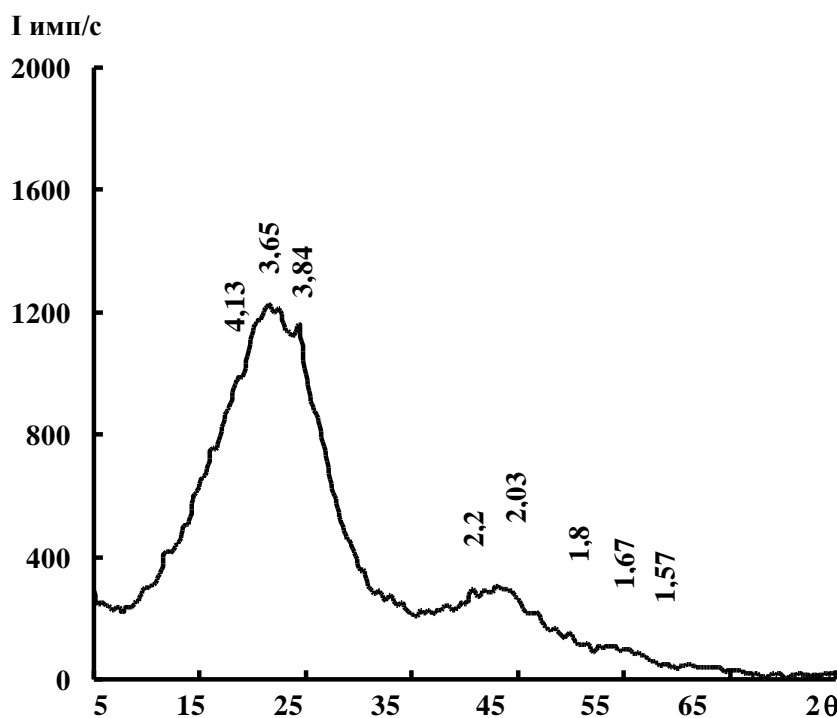
Матеріал	Напівширини піків β	Середній розмір кристалітів L , Å
Фенілон С-2	4,6	39
Вуглепластик	6,51	27

Дана обставина вказує на те, що у досліджуваному матеріалі має місце ефект зміцнення, який, визначається змочуванням і наступною адгезією в'язучого до волокнистого наповнювача. При цьому формується міжфазний шар з підвищеною впорядкованістю і обмеженим конформаційним набором макромолекул. Це, у свою чергу, призводить до прискорення зародкоутворення і росту кристалічної фази, а отже, до зниження розмірів кристалітів.

Хімічні процеси, що здійснюються при високих температурах, супроводжуються термічною деструкцією чи структурованням полімеру, а в присутності кисню окисними перетвореннями, які суттєво прискорюють руйнування полімеру. Це, в свою чергу, негативно впливає на фізичні властивості полімерних виробів та їх механічну міцність [4].



a

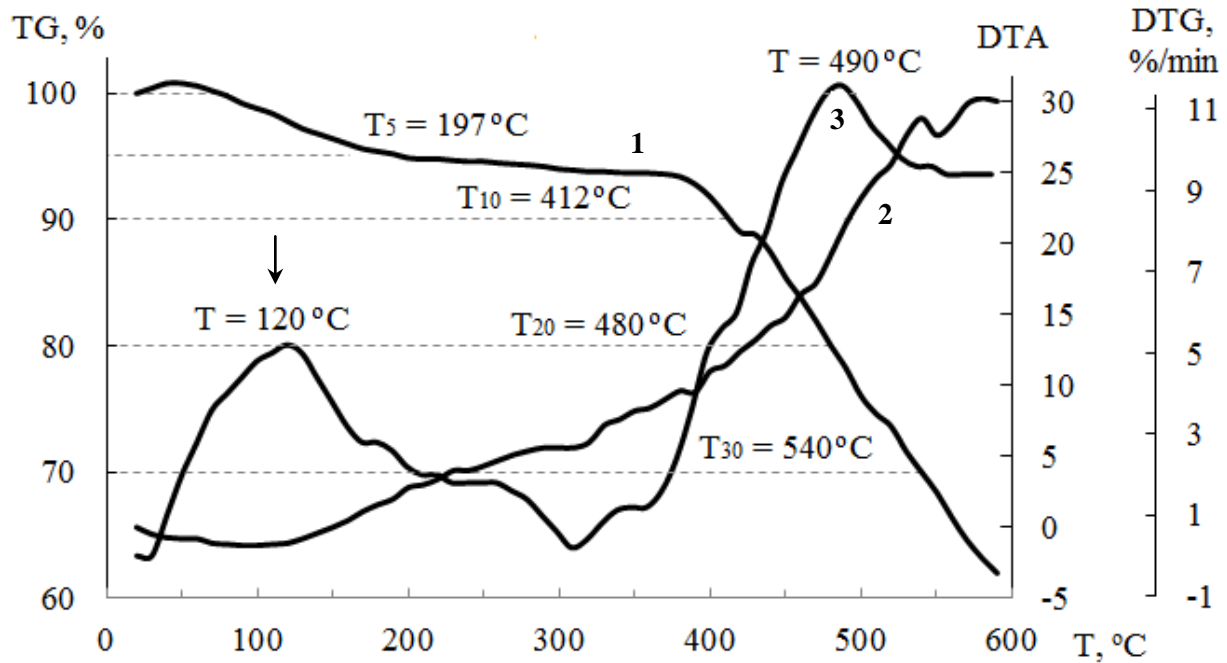


б

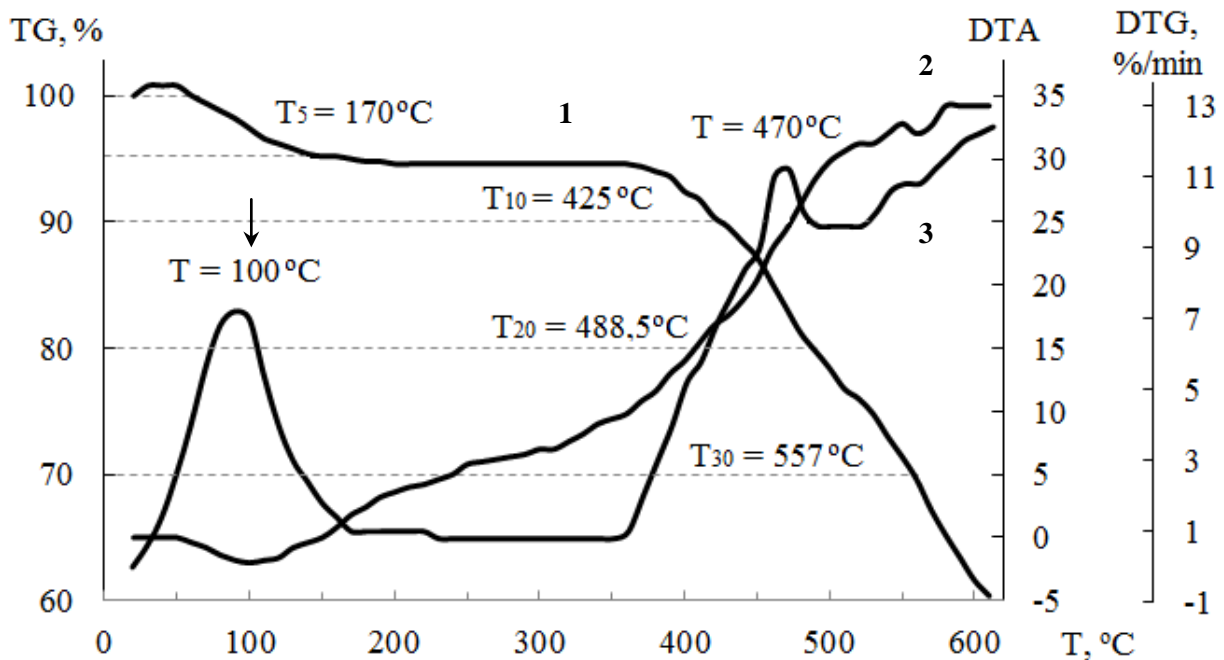
Рис. 1. Дифракційні криві фенілона С-2 (а) і вуглепластика на його основі, армованого 15 мас.% волокна углен (б)

Одним із методів дослідження поведінки матеріалів при нагріванні, що характеризує термостійкість, є термогравіметричний аналіз (ТГА). Термостійкість визначається тією температурною межею, при якій розпочинається термічна або термоокиснювальна деструкція матеріала, що супроводжується виділенням летких продуктів. Внаслідок цього має місце втрата у

масі досліджуваного зразка, що і лежить в основі термогравіметричного аналізу. Температура, при якій спостерігається зменшення маси матеріала, характеризує його термостійкість. Результати термогравіметричного аналізу (рис. 2) свідчать про те, що термостійкість вуглепластика на 9-13 градусів вища за термостійкість вихідного полімеру. Зокрема, 10 і 20% втрата маси вуглепластика здійснюється відповідно при температурах 425 і 489°C, в той час як для фенілона С-2 цей процес здійснюється відповідно при 412 і 480°C.



a



б

Рис. 2. Криві термогравіметричного (1), диференційного термічного (2) та диференційного термогравіметричного (3) аналізів фенілона С-2 (а) і вуглепластика на його основі (б)

Згідно з [5], аналіз летких продуктів, що виділяються із фенілона С-2 в умовах термічної обробки, показав, що їх головною складовою є вода, яка сорбується зразками чи залишається в

них після переробки, оскільки вона є одним із продуктів деструкції полімеру. Іншими газоподібними продуктами (їх вміст не перевершує 5% від загальної кількості летких) є карбон (II) та карбон (IV) оксиди.

На кривих диференційного термогравіметричного аналізу (крива 3) в інтервалі температур, коли відбувається максимальна втрата маси зразка полімеру і вуглепластика (до 150°C) спостерігається екзотермічний пік (відмічено стрілкою). Згідно з даними термічних досліджень встановлено, що для вуглепластика висота екзотермічного піку суттєво зростає і температура, при якій він проявляється складає 100°C, в той час, як для фенілона С-2 вона становить 120°C. Це свідчить про те,

що інтенсивність протікання окисних процесів в структурі вуглепластика вища порівняно із вихідним полімером і ці процеси розвиваються для зразків вуглепластика раніше, ніж для ароматичного поліаміду.

Армування поліамідної матриці призводить також до підвищення міцнісних характеристик. Зокрема, межа міцності та межа текучості при стисненні для вуглепластика зростають відповідно на 110 МПа та 51 МПа, а модуль пружності збільшується на 1515 МПа (табл. 4).

Дослідження характеру руйнування матеріалів при стисненні свідчить про те, що зразки фенілона С-2 руйнуються пластично: вони мають бочкоподібну форму і не руйнуються до моменту деформування. Вуглепластик руйнується крихко: на його зразках з'являються похилі тріщини, спрямовані паралельно площадкам, в яких діють найбільші дотичні напруги.

Таблиця 4.

Міцнісні характеристики фенілона С-2 та вуглепластика на його основі

Матеріал	Межа міцності при стисненні, МПа	Межа текучості при стисненні, МПа	Модуль пружності при стисненні, МПа
Фенілон С-2	291,1	207,6	3144,6
Вуглепластик	401,1	258,6	4659,4

Характер кривих напруга – деформація полімерного в'язучого і вуглепластика відрізняється. Зокрема, дослідження механічних властивостей розробленого композиційного матеріала показало наступне. Криві напруга – деформація фенілона С-2 і композита на його основі (рис. 3) є

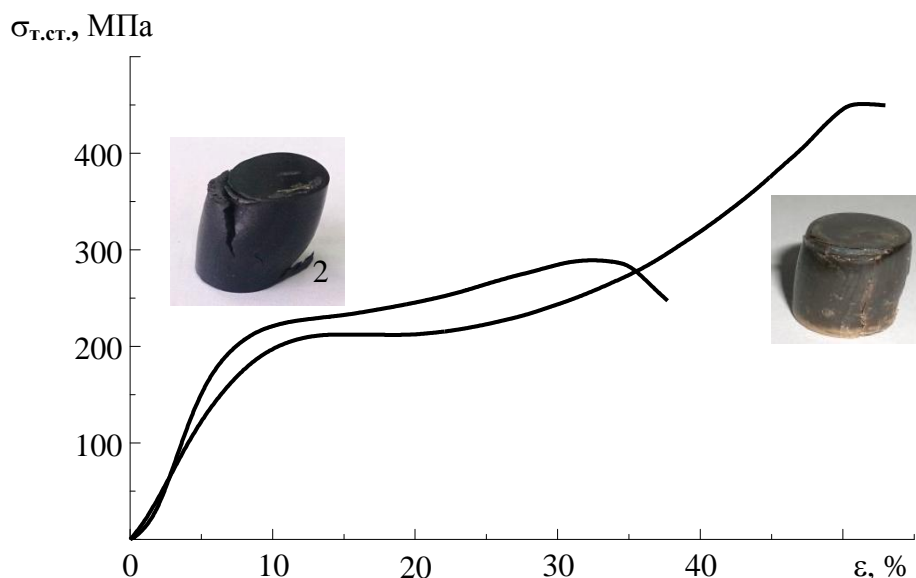


Рис. 3. Криві залежності межі текучості при стисненні від відносного подовження фенілона С-2 (крива 1) та вуглепластика на його основі (крива 2)

характерними для полімерних матеріалів і відносяться до кривих V-типу [6]. На них є прямолінійна ділянка до напруги, що відповідає межі пропорційності, ділянка, де спостерігається деяке відхилення від закону Гука, пов'язане із проявом сегментальної рухливості макромолекул, межа текучості, після якої розвивається пластична деформація та стадія деформаційного зміцнення і руйнування

Згідно [6], якщо форма кривої відноситься до кривих V типу, то це свідчить про конкретний розвиток двох процесів. Спочатку пластичне течіння відбувається з руйнуванням вихідної структури полімерного матеріала: результатом цього процесу є спадання напруги. Якщо після цього руйнування не відбувається, то нагромадження деформації супроводжується руйнуванням попередньої структури полімерної структури в'язучого й перебудовою її в нову, яка характеризується більшою міцністю (рис. 3). У міру того як все більша кількість ланок полімеру набуває нової структури, збільшується опір матеріалу деформації, настає стадія деформаційного зміцнення, крива напруги знову починає підніматися. Чим більш круто піднімається крива, тим більш інтенсивно йде переорієнтація полімерних макромолекул. Що стосується характеру руйнування зразків, то він різний. Так для чистого фенілона С-2 руйнування йде за рахунок втрати стійкості, а для вуглепластика – з утворенням тріщини з наступним відколом фрагментів (рис. 3).

Результати досліджень свідчать про те, що вуглепластик має більш високий комплекс трибологічних властивостей порівняно із вихідним полімером (рис. 4). Зокрема, встановлено, що у всьому дослідженому діапазоні навантажень композит мав більш низький коефіцієнт тертя порівняно зі в'язучим. Звертає на себе увагу той факт, що максимальне зменшення коефіцієнта тертя (на 62-65 %) спостерігалось за мінімальної швидкості ковзання ($v = 1,0$ м/с), а при $v = 1,5$ м/с коефіцієнт тертя вуглепластика був на 34-46% нижчий, ніж у фенілона С-2. Однак, за умов експлуатації $v = 1,5$ м/с і $P = 0,8$ МПа вихідний полімер втратив свою працездатність і визначити коефіцієнт тертя не вдалось. Аналогічне явище спостерігалось для зразків фенілона С-2 при дослідженнях в умовах максимальної швидкості у всьому діапазоні навантажень, в той час як зразок вуглепластика стабільно працював у вказаних режимах експлуатації і мав коефіцієнт тертя 0,23-0,08, який зменшувався при підвищенні швидкості ковзання досягаючи мінімального значення при $P = 0,8$ МПа [7].

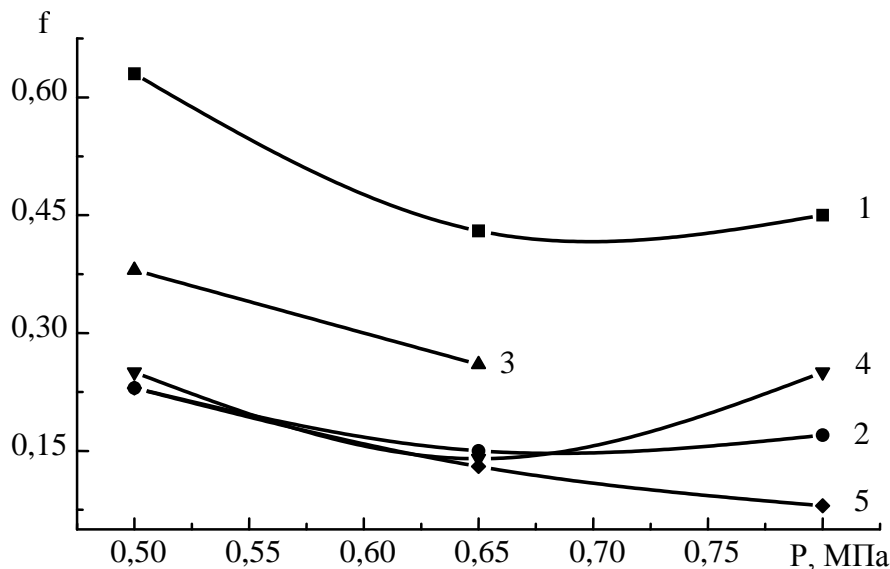


Рис. 4. Вплив питомого навантаження на коефіцієнт тертя фенілона С-2 (1,3) і вуглепластика на його основі (2,4,5) в умовах швидкості ковзання 1 (1,2), 1,5 (3, 4) та 2 (5) м/с

Інтенсивність лінійного зношування вуглепластика була мінімальною і змінювалась від 0,038 до 0,031, в той час як для зразків в'язучого цей показник зростав від 2 до $10 \cdot 10^{-7}$ при $v = 1,0$ м/с, а при $v = 1,5-2,0$ м/с матеріал катастрофічно зношувався.

В результаті проведених триботехнічних досліджень встановлено, що вироби із вуглепластика мають критерій працездатності PV (добуток швидкості ковзання на питоме навантаження до $1,6 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$, у той час як для вихідного полімеру він не перевищував $1,0 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$

Висновки. В цілому, результати досліджень показали, що армування поліамідного в'язкого вуглецевим волокном углен у кількості 15 мас. %, дозволяє покращити його термічні і фізико-механічні властивості, суттєво підвищити триботехнічні характеристики, а також розширити галузі його застосування.

Розроблений вуглепластик має покращені фізико-механічні та трибологічні властивості (низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість), що дозволяє його рекомендувати як матеріал конструкційного призначення для вузлів тертя машин і механізмів.

Список використаних джерел:

- [1] Соколов Л.Б. Термостойкие и высокопрочные полимерные материалы. – М.: Знание, 1984. – 64 с.
- [2] Технічні умови ТУ 6-06-548-76 . Волокно "Углен-9".
- [3] Мартынов М.А., Вылегжанина К.А. Рентгенография полимеров.– Ленинград: "Химия". – 1972. – 96 с.
- [4] Коршак В.В. Термостойкие полимеры, М.: Наука, 1969, 381 с.
- [5] Термостойкие ароматические полиамиды / Л.Б. Соколов, В.Д. Герасимов, В.М. Савинов, В.К. Беляков. М.: Химия, 1975, 256 с.
- [6] Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. Пер. с англ. / Под ред Бернштейна М.Л., Ефименко С.П. – М.: Металлургия. – 1989. – 576 с.
- [7] Чигвінцева О.П., Рула І.В. Вуглепластик на основі ароматичного поліаміду // Збірник тез доповідей II Всеукраїнської наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» ТАСХ-2018, С. 14-15.

Рецензенти:

О.Д. Деркач, Зав. кафедри "Експлуатація машино-тракторного парку" Дніпровського державного аграрно-економічного університету, к.т.н., доцент

К.Є. Варлан, Завідувач кафедри хімії та хімічної технології високомолекулярних сполук ДНУ ім. О. Гончара, к.х.н., доцент

Стаття надійшла до редакції 18.10.2018

УДК 620.197

Г.В. Чумало¹, М.М. Студент¹, Є.В. Харченко², В.М. Палюх²¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України²Національний університет «Львівська політехніка»**ВПЛИВ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНЕ РУЙНУВАННЯ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ**

Досліджено захисні властивості покриттів, нанесених на трубні сталі 17Г1СУ та сталь 20 в середовищах різної агресивності. Встановлено, що з нанесенням покриття Vimpel® епоху SF mastic та епоксидного Jotamastic GF + Hardtop flexu (поліуретанове) опірність корозійному розтріскуванню сталей зростає: порогові напруження підвищились з $0,6 \sigma_{0,2}$ основного металу до $0,8 \sigma_{0,2}$.

Показано, що поліуретанове покриття Hardtop flexu можна використовувати не тільки як зовнішній захисний шар для епоксидного покриття але і як самостійне покриття у середовищі морської води, насиченої сірководнем і у більш агресивному середовищі NACE та за впливу розтягуючих напружень ($0,8 \sigma_{0,2} = 284$ МПа для сталі 17Г1СУ). Випробування зразків з комбінованими покриттями (гаряче цинкове + Hardtop Flexu, металізаційне алюмінієве + Hardtop Flexu, металізаційне алюмінієве + Vimpel® епоху SF mastic, нанесені на сталь 20) показали підвищення опірності сірководневою корозійному розтріскуванню під напруженням у досліджуваних середовищах порівняно з такими без покриттів. Так, з нанесенням комбінованого покриття порогові напруження зросли з $0,65 \sigma_{0,2}$ (для сталі 20 без покриття у середовищі модельної морської води, насиченої сірководнем) до $0,8 \sigma_{0,2}$ у всіх випробувальних середовищах.

Ключові слова: покриття, сталь, сірководень, порогові напруження.

Рис. 2. Літ. 6

Г.В. Чумало¹, М.М. Студент¹, Є.В. Харченко², В.М. Палюх²¹Фізико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины²Национальный университет «Львовская политехника»**ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ.**

Исследовано защитные свойства покрытий, нанесенных на трубные стали 17Г1С и сталь 20 в средах различной агрессивности. Установлено, что с нанесением покрытия Vimpel® епоху SF mastic и епоксидного Jotamastic GF + Hardtop flexu (полиуретановое) сопротивляемость коррозионному растрескиванию сталей растет: пороговые напряжения повысились с $0,6 \sigma_{0,2}$ основного металла до $0,8 \sigma_{0,2}$.

Показано, что полиуретановое покрытие Hardtop flexu можно использовать не только как внешний защитный слой для епоксидного покрытия но и как самостоятельное покрытие в среде морской воды, насыщенной сероводородом и в более агрессивной среде NACE и при воздействии растягивающих напряжений ($0,8 \sigma_{0,2} = 284$ МПа для стали 17Г1С). Испытания образцов с комбинированными покрытиями (горячее цинковое + Hardtop Flexu, металлизационное алюминиевое + Hardtop Flexu, металлизационное алюминиевое + Vimpel® епоху SF mastic нанесенные на сталь 20) показали повышение сопротивляемости сероводородному коррозионному растрескиванию под напряжением в исследуемых средах по сравнению с таковыми без покрытий. Так, с нанесением комбинированного покрытия пороговые напряжения выросли с $0,65 \sigma_{0,2}$ (для стали 20 без покрытия в среде морской воды, насыщенной сероводородом) до $0,8 \sigma_{0,2}$ во всех испытательных средах.

Ключевые слова: покрытие, сталь, сероводород, пороговые напряжения.

Рис. 2. Лит.6

H.V. Chumalo¹, M.M. Student¹, Ye.V. Kharchenko², V.M. Palyukh²¹Karpenko Phisico –Mechanical Institute of NAS of Ukraine²National University "Lviv Polytechnic"**INFLUENCE OF PROTECTING COATINGS ON CORROSION-MECHANICAL DAMAGE OF PIPE STEELS**

Protective properties of coatings deposited on 17G1C pipe steel and 20 pipe steel in different aggressive media have been investigated. It has been established that with the coating of Vimpel® epoxy SF mastic and epoxy Jotamastic GF + Hardtop flexu (polyurethane) resistance to corrosion cracking of steels grows: threshold stresses increased from $0.6 y_{0,2}$ of the base metal to $0,8 y_{0,2}$. It has been shown that the Hardtop flexu polyurethane coating can be used not only as an external protective layer for epoxy coating but also as an independent coating in an environment of seawater saturated with hydrogen sulfide and in a more aggressive environment NACE and under the influence of tensile stresses ($0.8 y_{0,2} = 284$ MPa for steel 17G1C). Test specimens with combined coatings (Hot Zinc + Hardtop Flexu and Metallized Aluminum + Hardtop Flexu applied to steel 20) showed an increase in the resistance to hydrogen sulfide stress corrosion cracking in the investigated media compared to those without coatings. Thus, with the application of the combined coating, threshold stresses increased from $0.65 y_{0,2}$ (for steel without coating in seawater saturated with hydrogen sulfide) to $0.8 y_{0,2}$ in all test media.

Keywords: coating, steel, hydrogen sulfide, threshold stresses.

Fig. 2. Ref.6

Постановка проблеми. В процесі експлуатації газонафтовидобувне обладнання та гідроконструкції зазнають одночасної дії як статичних так і змінних навантажень та агресивного

середовища – морської води, іноді з домішками сірководню, який пришвидшує загальну корозію, може викликати розтріскування металу, ініційоване воднем розтріскування (ВІР) та сірководневе корозійне розтріскування під напруженням (СКРН). Пошкодження обладнання призводять до значних матеріальних втрат та екологічних катастроф. Дослідження ефективності різних методів протикорозійного захисту металів у агресивних середовищах є актуальним для газонафтовидобувної промисловості та для будівництва морських платформ. Вирішення цієї проблеми дозволить запобігти пошкодженням, підвищить надійність та продовжить терміни роботоздатності обладнання та гідроконструкцій. Найбільш поширеним методом захисту металевих конструкцій від морської корозії є нанесення на їхню поверхню лакофарбових матеріалів. Окрім цього, популярним методом захисту є нанесення газотермічних покриттів. Так, норвезький інститут досліджень атмосфери опублікував результати досліджень сталі з покриттям в зоні припливу: 160-мікронне покриття з газотермічно напиленого алюмінію показало сліди корозії через 14,5 років [1]. Британським стандартом BS 5493 зафіксовано, що газонапилене алюмінієве покриття товщиною 100 мкм з просоченням забезпечує стійкість до корозії в зоні ватерлінії на термін не менше 20 років [2-4]. З огляду на високі захисні властивості компанія Copaco та інші газовидобувні компанії рекомендують використання газотермічних покриттів для конструкцій в Північному морі та Мексиканській затоці [5].

Мета роботи - встановити захисні властивості лакофарбових епоксидних, поліуретанових та комбінованих покриттів, нанесених на трубні сталі у хлоридно-сульфідних середовищах.

Матеріали та методика експерименту. Досліджували покриття на основі фарби Vimpel® ероху SF mastic вітчизняного виробника НВП «ВИМПЕЛ» ТОВ, м. Одеса. Фарба є суспензією алюмінієвої пудри, пігментів та спеціальних адитивів в суміші епоксидних смол і реактивного розріджувача з додаванням амінового затверджувача без органічних розчинників. Фарба розроблена для нанесення методом безповітряного розпилення. В лабораторних умовах фарбу наносили за допомогою пензля і шпателя. Перед нанесенням фарби ретельно перемішували основу з затверджувачем у масовому співвідношенні 15 : 5.

Досліджували покриття виробництва норвезької фірми Jotun – Jotamastic 87 GF. Це двохкомпонентне, абразивно стійке епоксидне покриття серії Mastic з додаванням скляних лусочок, що покращує абразивну стійкість та міцність покриття; використовується разом із затверджувачем у масовому співвідношенні 6 : 1. Jotamastic 87 GF можна використовувати як самостійне покриття, так і разом з різними ґрунтами та фінішними покриттями, зокрема Hardtop Flexu. Досліджували також поліуретанове покриття Hardtop flexu як самостійне.

Цинкові покриття наносили методом гарячого цинкування шляхом занурення зразків зі сталі 20 (30×40×3 мм) в розплав цинку за температури 590°C. Товщина покриття складала 100 ± 10 мкм. Алюмінієві покриття наносили на зразки зі сталі 20 методом електродугового напилення ($U = 30В$; $I = 150А$; тиск повітря 6 атм; відстань до зразка 150 мм). Товщина покриття 200 ± 10 мкм.

Досліджували комбіновані покриття: гаряче цинкове + Hardtop Flexu (100мкм) та металізаційне алюмінієве + Hardtop Flexu (100мкм), металізаційне алюмінієве + Vimpel® ероху SF mastic (100мкм).

Для досліджень використовували стандартний розчин NACE (5%-ий водний розчин NaCl + 0,5%-ий CH₃COOH, насичення H₂S, рН 3...4, 22+3°C); – модельну морську воду (ММВ) – 3% розчин морської солі, мас. %: NaCl ≤ 86,5; Ca 2+ ≤ 1,5; Mg 2+ ≤ 2,0; K+ ≤ 1,11; SO₄²⁻ ≤ 7,68; HCO₃⁻ ≤ 0,41; інші ≤ 0,8; – ММВ, насичену сірководнем;

Довготривалу корозійну міцність циліндричних зразків діаметром 6,4 mm з нанесеним на робочу частину покриттям досліджували на установках Zst 3/3 під статичним одновісним навантаженням.

Результати дослідження. Досліджено опірність корозійному розтріскуванню під статичним навантаженням циліндричних зразків зі сталі 20 з нанесеними на робочу поверхню покриттями: гаряче цинкове + поліуретанове Hardtop flexu, електрометалізаційне алюмінієве + поліуретанове Hardtop flexu та електрометалізаційне алюмінієве + Vimpel® ероху SF mastic (рис.1). Дослідження проведено у ММВ, насиченій сірководнем та розчині NACE. Початкові напруження склали $0,8 \sigma_{0,2}$ основного металу – сталі 20 ($\sigma_{0,2} = 290$ МПа), що відповідає 232 МПа.

Всі зразки вистояли базу випробувань (720 год.) і не зруйнувалися. Випробування зразків з комбінованими покриттями показали підвищення опірності СКРН у досліджуваних середовищах порівняно з такими без покриттів. Так, з нанесенням комбінованого покриття порогові

напруження зросли з $0,65\sigma_{0,2}$ (для сталі 20 без покриття у середовищі ММВ, насиченої сірководнем) та $0,6\sigma_{0,2}$ (для розчину NACE) до $0,8\sigma_{0,2}$ у всіх випробувальних середовищах.

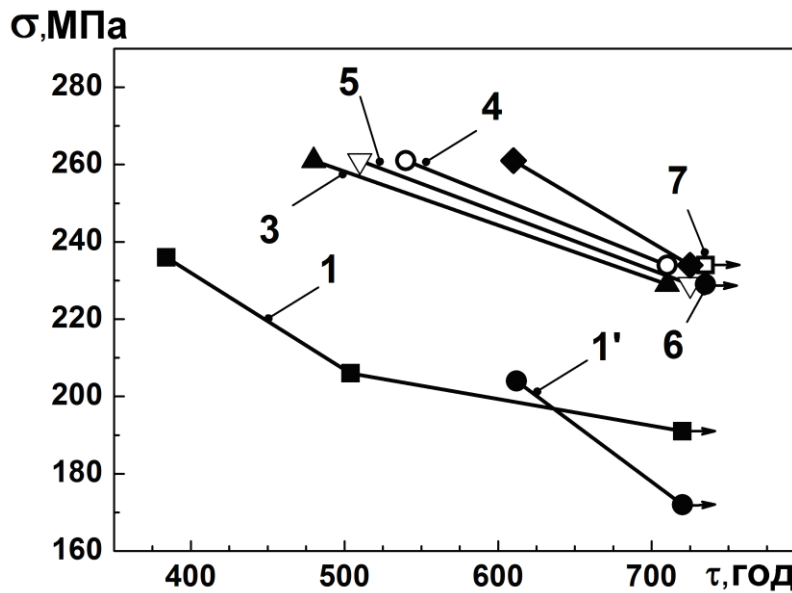


Рис. 1. Опірність корозійному розтріскуванню зразків зі сталі 20 без покриття у ММВ, насиченій сірководнем (1) та розчині NACE (1') і з комбінованими покриттями: гаряче цинкове + Hardtop Flexu (2, 3) та металізаційне алюмінієве + Hardtop Flexu (4,5); металізаційне алюмінієве + Vimpel® епоху SF mastic: 2,4,6 - ММВ+H₂S; 3,5,7- NACE., 6,7 – NACE, ММВ+H₂S

Отже, такі комбіновані покриття доцільно використовувати у агресивних сірководневих середовищах та за впливу розтягуючих напружень хоча б локально. Це можуть бути місця можливого відшарування металевого покриття як це ми спостерігали у випадку електрометалізаційного алюмінієвого покриття у насиченому сірководнем 5% NaCl та дії статичних навантажень [6].

Досліджено опірність корозійному розтріскуванню (рис.2) під статичним навантаженням циліндричних зразків зі сталі 20 з нанесеним на робочу поверхню покриттями: Jotamastic GF (500 мкм) + Hardtop flexu (50мкм) та Vimpel® епоху SF mastic (900мкм). Товщина покриття вибиралась згідно рекомендацій виробника. Дослідження проведено у ММВ, насиченій сірководнем та розчині NACE за напружень $0,8\sigma_{0,2}$ основного металу – сталі 20 ($\sigma_{0,2} = 290$ МПа), що відповідає 232 МПа. Встановлено, що всі зразки вистояли базу випробувань і не зруйнувалися в обох випробувальних середовищах.

Слід зазначити, що з нанесенням покриття опірність корозійному розтріскуванню зростає: порогові напруження підвищились з $0,6\sigma_{0,2}$ основного металу до $0,8\sigma_{0,2}$.

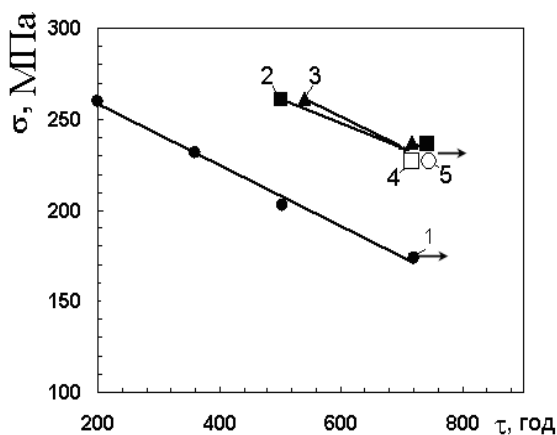


Рис. 2. Опірність корозійному розтріскуванню під напруженням зразків зі сталі 20 без покриття у ММВ, насиченій сірководнем (1); з покриттями: Jotamastic GF+Hardtop Flexu у ММВ, насиченій сірководнем (2) та розчині NACE (3); Vimpel® епоху SF mastic (4, 5) відповідно.

Досліджено поліуретанове покриття Hardtop flexu товщиною 100, 200, 300 мкм, нанесене на зразки з трубною сталі 17Г1СУ ($\sigma_{0,2} = 355$ МПа) та зварне з'єднання цієї сталі, виконане електродом УОНІИ 13/55Р, у середовищі морської води, насиченої сірководнем і розчині NACE та за впливу розтягуючих напружень ($0,8 \sigma_{0,2}$ основного металу).

Зразки вистояли базу випробувань і не зруйнувалися в обох середовищах. Отже, поліуретанове покриття Hardtop flexu можна використовувати не тільки як зовнішній захисний шар для епоксидного покриття, але і як самостійне покриття у середовищі морської води, насиченому сірководнем і у більш агресивному середовищі NACE та за впливу розтягуючих напружень. ($\sigma \leq 0,8 \sigma_{0,2} = 284$ МПа).

Висновки. Встановлено, що нанесення покриття Vimpel® ероху SF mastic (900 мкм) та Jotamastic GF (500 мкм + Hardtop flexu (50 мкм) на трубну сталь підвищує опірність корозійному розтріскуванню у сірководневих середовищах: порогові напруження зростають з $0,6 \sigma_{0,2}$ основного металу до $0,8 \sigma_{0,2}$. Це підтверджує можливість застосування таких покриттів для захисту обладнання, що працює в сірководневих середовищах за розтягуючих напружень.

Випробування зразків з комбінованими покриттями (гаряче цинкове + Hardtop Flexu (100 мкм), металізаційне алюмінієве + Hardtop Flexu (100 мкм), та металізаційне алюмінієве + Vimpel® ероху SF mastic (100 мкм) нанесені на сталь 20 також показали підвищення опірності СКРН у досліджуваних середовищах порівняно з такими без покриттів. Так, з нанесенням комбінованого покриття порогові напруження зросли з $0,65 \sigma_{0,2}$ (для сталі 20 без покриття у середовищі морської води, насиченої сірководнем) до $0,8 \sigma_{0,2}$ у всіх випробувальних середовищах.

Отже, комбіновані покриття з меншою товщиною полімерного покриття доцільно використовувати у агресивних сірководневих середовищах та за впливу розтягуючих напружень.

Показано, що поліуретанове покриття Hardtop flexu можна використовувати не тільки як зовнішній захисний шар для епоксидного покриття але і як самостійне покриття у сірководневих середовищах та за впливу розтягуючих напружень.

Література:

1. Henriksen J.F., Anda O., Haagenrud S.E.. Results After 15 Years of Atmospheric Exposure of Metalized and/or Painted Carbon Steel / Proc. of 12th Scandinavian Corrosion Cong. & EuroCorr 92, Finland, vol. 1, paper no. 5-B-5 (1992), p.469.
2. British Standard BS 5493. Protective Coating of Iron and Steel Structures Against Corrosion/ London, UK: British Standards Institute, 1977.
3. Kain R.M., Baker E.A. Marine Atmospheric Corrosion Museum Report on the Performance of Thermal Spray Coatings on Steel / ASTM Report STP 947 (Philadelphia, PA: ASTM, 1987), p. 211.
4. Townsend H.E, MP 32, 4 (1993): p. 68.
5. Conoco Norway Inc., P.O. Box 488, N-4001, Stavanger, Norway.
6. Захисні властивості покриттів на основі алюмінію в сірководневих середовищах /М. Хома, Г Чумало, Є. Харченко, Б. Дацко, В. Івашків // Фіз.- хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 6. – С.100 –104.

РЕЦЕНЗЕНТ:

БЛІЙ Лєвкo Мìхaйлoвич - старший науковий співробітник відділу фізико – хімічних методів протикорозійного захисту металів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, канд. техн. наук.

Стаття надійшла до редакції 05.12.2018

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ**

1. **Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:** постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; 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; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.
2. **Статтю можна подавати українською, російською, або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03. Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 5-9 сторінок.
3. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
4. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
5. **Анотації** українською, російською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
6. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
7. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
8. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
9. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
10. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Таблиця 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.
11. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами ДСТУ 8302:2015 через 1 см від останнього рядка.
12. Статті надіслати електронною поштою за такою адресою: notatki@ukr.net
13. До статті додається дві рецензії: зовнішня і внутрішня. Редакція залишає за собою право направляти статті на додаткову рецензію.
14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

До статті обов'язково додаються у письмовому вигляді відомості про авторів:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів у збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» можна отримати у відповідального секретаря – Савюка Ігоря Віталійовича за тел. (0332) 262519.

Адреса: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, к. 34.

Автор статті отримує 1 примірник збірника. **Вартість друку** однієї сторінки становить 45 грн. Рахунок виставляється після підтвердження редакційною колегією про прийняття статті до друку.

До уваги авторів. Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки») згідно наказу МОН України № 528 від 12.05.2015 р. затверджено як наукове фахове видання України, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Збірник входить у науково метричну базу РИНЦ.

Редколегія повідомляє, що планова періодичність друку збірника чотири випусків на рік.

P.S. Без авторської довідки, матеріали редакційною колегією не розглядаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²

Луцький національний технічний університет¹

Тернопільський національний технічний університет²

**НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ
КАРКАСОМ ТВІРНИХ**

Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом спільних твірних.

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

И.И. Иванов, П.П. Петров

**ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСИ КОНОИДА, ПРЕДСТАВЛЕННОГО
ДИСКРЕТНЫМ КАРКАСОМ ОБРАЗУЮЩИХ**

Разработан алгоритм приближенного определения оси коноида, представленного дискретным каркасом обшивки образующих.

Ключевые слова: ось коноида, дискретный каркас, образующая.

I. Ivanov, P. Petrov

**AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT
LINES**

The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом твірних, можна побудувати безліч плоских і просторових.....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм.....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

$$Y_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^n Y_{ji}, \quad (1)$$

де K -

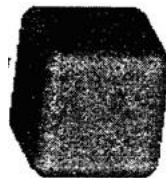


Рис. 1. Назва рисунка

Таблиця 1.

Назва таблиці

№п/п	Фактори		Функції відгуку	
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного.....

Список використаних джерел:

1.

ШБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Колектив авторів

Наукові нотатки

**Міжвузівський збірник
(за галузями знань «Технічні науки»)
Випуск 64**

Комп'ютерний набір та верстка: І.В. Савюк
Збірник друкується в авторській редакції

Наклад **300 прим.**

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