

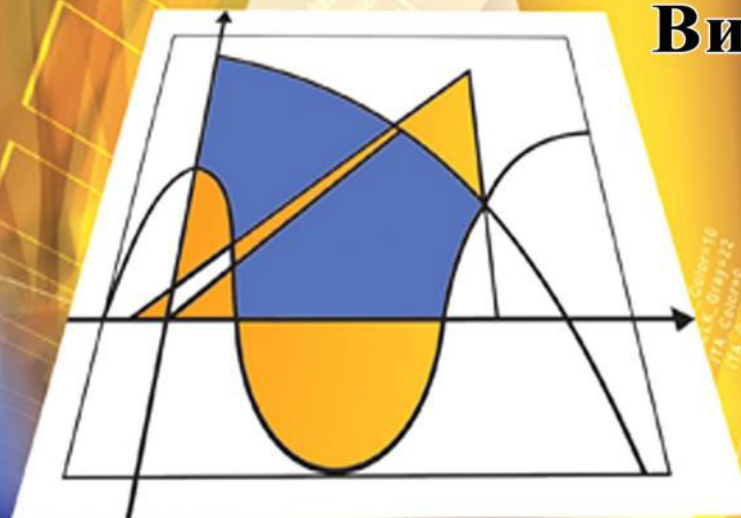
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

# НАУКОВІ НОТАТКИ

Випуск 63



ЛУЦЬК - 2018

# **НАУКОВІ НОТАТКИ**

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

**Випуск 63  
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 І.В., 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 № 1 від 30.08.2018 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](mailto: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

<b>Зміст</b> .....	4
<b>Аль Ібрахімі Метак М.А.</b> Можливості розширення орієнтаційних можливостей багатокомпонентних верстатів.....	8
<b>Амелін М.Ю.</b> Забезпечення надійності транспортних засобів у контексті використання захисних полімерних нанокompозитних покриттів.....	14
<b>Березін Л.М.</b> До розрахунків деталей на міцність, довговічність та надійність.....	22
<b>Брайло М.В., Букетов А.В., Якущенко С.В., Яцюк В.М.</b> Дослідження теплофізичних властивостей епокси-поліефірних композитів, модифікованих метилендіфенілдіізоціанатом...	27
<b>Букетов А.В., Кулініч А.Г., Гусев В.М., Сметанкін С.О., Яцюк В.М.</b> Дослідження адгезійних властивостей модифікованих 4-амінобензойною кислотою полімерних композитних матеріалів.....	34
<b>Волков В.П., Павленко В.М.</b> Принцип створення бази знань для обслуговування легкових автомобілів за допомогою онтологій.....	40
<b>Ганзюк А.Я., Стремецький О.І.</b> Дослідження структурно - адсорбційних характеристик сапонітових глин, модифікованих амінами.....	46
<b>Гасан Ю.Г., Тарасевич В.І., Дроздова О.В.</b> Спеціальний облицювальний будівельний матеріал на основі гіпсу, модифікований золою і сіркою.....	56
<b>Гевко Б.М., Ляшук О.Л., Клендій М.І., Марчук Н.М., Котик Р.М.</b> Технологічність конструкції пристроїв і різальних інструментів для оброблення різьбових поверхонь.....	62
<b>Гевко Б.М., Стойко І.І., Клендій В.М., Марчук Н.М.</b> Результати експериментальних досліджень стійкості сверла-мітчика М7-7Н.....	67
<b>Гурик О.Я., Марчук Н.М., Гупка В.В., Диня В.І., Фльонц О.В., Семенів І.І.</b> Технологічний процес виготовлення внутрішніх багатогранників.....	73
<b>Залоза В.О., Дядюра К.О., Рибалка І.М.</b> Особливості впровадження інтегрованих систем управління.....	77
<b>Захарова Л.М., Назимко І.В.</b> Підвищення темпів гірничих робіт як ефективний захід з управління дисипативними структурами навколо виробки.....	83
<b>Ковальчук С.Б., Горик О.В.</b> Рівняння теорії пружності для композитних брусів із плоскою віссю довільної форми у природній криволінійній системі координат.....	89
<b>Ларін О.О., Трубаєв О.І., Юдаєв В.В.</b> Комп'ютерний аналіз міцності колон елеватора при різних варіантах навантаження (частина №1).....	98
<b>Ларін О.О., Трубаєв О.І., Юдаєв В.В.</b> Комп'ютерний аналіз міцності колон елеватора при різних варіантах навантаження (частина №2).....	107
<b>Лещенко О.В.</b> Дослідження впливу структурно-активної добавки на властивості епоксидних композитів.....	114
<b>Мазін С.П., Маренко Г.М., Страшний І.Л., Франков В.М., Скраль В.В.</b> Пропозиції щодо конструкції водометної спецмашини для підрозділів охорони громадського порядку.....	123
<b>Мікуліч О.А.</b> Розвиток методу граничних інтегральних рівнянь до розв'язання нестационарних задач у континуумі Коссера.....	128
<b>Мороз І.А., Янчук О.М., Кашицький В.П.</b> Топологічна структура седиментаційних осадів карбонатів металів у водних розчинах неіонногенної ПАВ.....	134
<b>Ніколюк П.К., Комаров В.Ф., Ніколюк П.П.</b> Інтелектуальне перехрестя.....	139
<b>Палій Б.М.</b> Антропоморфний пневматичний захват з можливістю 3D руху пальців.....	148
<b>Панасюк М.В.</b> Додаткова реальність, як новий інноваційний напрямок у оптиці і сервіс цього виду виробів, як необхідний чинник можливості її широкого використання.....	154
<b>Поліщук О.С.</b> Процес передачі енергії при ударному виконанні операцій легкої промисловості.....	163
<b>Пономарьова Н.В., Волкова Т.В.</b> Аналіз сучасного стану функціонування прикордонних пунктів пропуску в єдиному митному просторі країни.....	172
<b>Пригоровська Т.О., Войтенко П.І., Врюкало В.В., Пітулей Л.Д., Роп'як Л.Я., Присяжнюк П.М., Бурда М.Й., Луцак Д.Л., Луцак Л.Д.</b> Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення PDC-доліт для підвищення їх експлуатаційних показників.....	177

<b>Повстяной О.Ю., Дороговцев А.А.</b> Модельні дослідження формування засипки порошоків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки (двовірний випадок).....	183
<b>Ратушний О.В., Васильченко Д.Р., Дрофа А.О.</b> Концепція капілярного насоса.....	189
<b>Сапронова А.В.</b> Використання дисперсних добавок для підвищення адгезійних і фізико-механічних властивостей полімерних захисних покриттів.....	196
<b>Стухляк Д.П.</b> Вплив модифікатора 2,4-діамінотолуену на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних полімерних покриттів.....	203
<b>Тазетдінов В.А.</b> Оптимізація процесу підбору інвентаря для настільного тенісу на основі побудови нейронних мереж за критеріями відповідності.....	209
<b>Тарельник В.Б., Гапонова О.П., Радіонов О.В.</b> Підвищення рівня екологічної безпеки при використанні інтегрованих способів підвищення якості сталевих деталей.....	214
<b>Тимошук В.М., Гінайло П.І., Лісковець С.М., Гуда О.В.</b> Про деякі оцінки модуля неперервності бігармонічної функції в обернених теоремах наближення.....	221
<b>Троснікова І.Ю.</b> Закономірності формування структури та властивостей спрямовано армованих композиційних матеріалів систем Мо-Si-B, WC-W <sub>2</sub> C.....	226
<b>Халед Г.Б.</b> Квантово-хімічні дослідження енергії взаємодії між молекулами рубрену та стеариновою кислотою та рубреном і метиловим ефіром стеаринової кислоти.....	230
<b>Цідило К.І., Карпик Р.Т., Витвицький В.С., Сапаров О.А.</b> Моделювання напружено-деформованого стану осьового різального інструменту методом скінченних елементів.....	235
<b>Захарчук В.І.</b> Метод багатокритеріального вибору палива для транспортних засобів.....	241

## CONTENT

<i>Contents</i> .....	4
<i>Al Ibrahimi Metak M.A.</i> The possibilities of expanding the orientation capabilities of multi component machine tools.....	8
<i>Amelin M.Yu.</i> Ensuring the reliability of vehicles in the context of the use of protective polymeric nanocomposite coatings.....	14
<i>Berezin L.</i> To the calculation of details for strength, longevity and reliability.....	22
<i>Brailo M.V., Buketov A.V., Yakushchenko S.V., Yatsyuk V.M.</i> The investigation of thermophysical properties of the epoxy-polyether composites modified by methylene diphenyl diisocyanate.....	27
<i>Buketov A.V., Kulinich A.G., Gusev V.M., Smetankin S.A., Yatsyuk V.M.</i> Research of adhesion properties of modified 4-aminobenzoic acid polymer composite materials.....	34
<i>Volkov V., Pavlenko V.</i> The principle of creating a knowledge base for servicing cars with ontologies.....	40
<i>Hansyuk A., Stremetsky O.</i> The study of structural and adsorption characteristics of saponite glines modified by amines.....	46
<i>Gasan Y.G., Tarasevich V.I., Drozdova O.V.</i> Special construction building material based on gypsum modified by ash and sulfur.....	56
<i>Gevko B.M., Lyashuk O.L., Klendy M.I., Marchuk H.M., Kotyk R.M.</i> Technology of construction of devices and risal tools for processing of cutting surfaces.....	62
<i>Gevko B.M., Stoyko I.I., Klendii V.M., Marchuk N.M.</i> Results of experimental study study of squrla mitchic M7-7H.....	67
<i>Gurik O., Marchuk N., Hupka V., Dyna V., Flonts O., Semenov I.I.</i> Technological process of manufacture of internal migratories.....	73
<i>Zaloga V., Dyadyura K., Rybalka I.</i> Features of implementation of integrated management systems.....	77
<i>Zakharova L.M., Nazymko I.V.</i> Augmenting of rate advance as efficient method for dissipative structure control in vicinity of an underground roadway.....	83
<i>Kovalchuk S., Goryk O.</i> Equations of the elasticity theory for composite bars with a plane axle of an arbitrary form in natural curvilinear coordinate system.....	89
<i>Larin O.O., Trubayev O.I., Udayev V.V.</i> Computer analysis of strength of grain elevator columns under various loading options (part №1).....	98
<i>Larin O.O., Trubayev O.I., Udayev V.V.</i> Computer analysis of strength of grain elevator columns under various loading options (part №2).....	107
<i>Leshchenko O.V.</i> Investigation of the influence of a structural-active addition on the properties of epoxy composites.....	114
<i>Mazin S.P., Marenko G.M., Strashnyi I.L., Frankov V.M., Skral V.V.</i> Proposals for the design of the water cannon special machine for units for the protection of public order.....	123
<i>Mikulich O.A.</i> Development of the boundary integral equations method for the solving non-stationary problems in Cosserat elasticity.....	128
<i>Moroz I.A., Yanchuk O.M., Kashytskyi V.P.</i> Topological structure of sedimentation surfaces of metal carbonate in water solutions of nonionic surfactant.....	134
<i>Nikolyuk P.K., Komarov V.F., Nikolyuk P.P.</i> Intelligent crossroad.....	139
<i>Palii B.</i> Antropomorphic pneumatic engagement with the possibility of 3D finger motion.....	148
<i>Panasiuk M.</i> Augmented reality as a new innovative direction in optics and servicing of this type of products as a necessary factor for the possibility of its widespread use.....	154
<i>Polishchuk O.</i> The process of energy transferring while shock performance of light industry operations.....	163
<i>Ponomareva N.V., Volkova T.V.</i> Analysis of the modern status of the functioning of border checkpoints in the unified customs space of the country.....	172
<i>Pryhorovska T.O., Voytenko P.I., Vryukalo V.V., Pitulej L.D., Ropyak L.Ya., Prysyzhnyuk P.M., Burda M.Y., Lutsak D.L., Lutsak L.D.</i> PDC drill bit production and technological support for their performance indicators increasing.....	177

<b>Povstyanoy O.Yu., Dorogovtsev A.A.</b> Model studies of powders pouring formation taking into account the properties of the material on the basis of random packaging models (two-dimensional case).....	183
<b>Ratushnyi A., Vasilchenko D., Drofa A.</b> Concept of capillary pump.....	189
<b>Sapronova A.V.</b> Use of dispersive additives to increase the adhesion and physico-mechanical properties of polymer protective coatings.....	196
<b>Stukhlyak D.P.</b> 2,4-diaminotoluene modifier effect on adhesive properties and protective polymer coatings residual stresses.....	203
<b>Tazetdinov V.A.</b> Optimization of the process of selection of equipment for table tennis based on the construction of neural networks by the criteria of conformity.....	209
<b>Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Radionov A.V.</b> Increasing the level of environmental safety in using integrated methods of increasing the quality of steel parts.....	214
<b>Toomoshchok V., Ginaylo P., Liskovets S., Guda O.</b> About some evaluations of the immunity module of bigarmmonic function in the related approximative theorems.....	221
<b>Trosnikova I.Yu.</b> The basics of formation of structure and properties the reinforced composite materials of systems of Mo-Si-B, WC-W <sub>2</sub> C.....	226
<b>Khaled G.B.</b> Quantum-chemical investigation of the energy interaction between rubren and stearic acid molecules and rubren and methyl ether of stearic acid.....	230
<b>Tsidylo K.I., Karpyk R.T., Vytvytskyi V.S., Saparov O.A.</b> Stress-strain state simulation of an axial cutting tool by the finite element method.....	235
<b>Zaharchuk V.</b> Method of multicriterion choice of fuel for transport vehicles.....	241

УДК 62-231:621.9.04

**Аль Ібрахімі Метак М.А.***Центральноукраїнський національний технічний університет***МОЖЛИВОСТІ РОЗШИРЕННЯ ОРІЄНТАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ  
БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ВЕРСТАТІВ**

*У даній роботі виявлені тенденції розвитку сучасних конструкцій багатокомпонентних верстатів для обробки деталей і можливості розширення їх орієнтаційних можливостей. Розширення орієнтаційних можливостей багатокомпонентного верстата можливо за рахунок зміни відносного розташування виконавчих органів, введення додаткових виконавчих органів при модульній побудові конструкції верстата. Висновки і отримані результати спонукають до подальшого наукового і практичного дослідження.*

*Ключові слова: багатокомпонентні верстати, орієнтаційні можливості, виконавчий орган, конструкція.*

*Рис. 7. Літ. 7*

**Аль Ібрахімі Метак М.А.***Центральноукраїнський національний технічний університет***ВОЗМОЖНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТАНКОВ**

*В данной работе выявлены тенденции развития современных конструкций многокомпонентных станков для обработки деталей и возможности расширения их ориентационных возможностей. Расширение ориентационных возможностей многокомпонентного станка возможно за счет изменения относительного расположения исполнительных органов, введения дополнительных исполнительных органов при модульном построении конструкции станка. Выводы и полученные результаты побуждают к дальнейшему научному и практическому исследованию.*

*Ключевые слова: многокомпонентные станки, ориентационные возможности, исполнительный орган, конструкция.*

**Al Ibrahimi Metak M.A.***Central Ukrainian National Technical University***THE POSSIBILITIES OF EXPANDING THE ORIENTATION CAPABILITIES OF MULTI  
COMPONENT MACHINE TOOLS**

*In this work, trends in the development of modern designs of multi-component machines for processing parts and the possibility of expanding their orientation capabilities are revealed. The role of the layout factor in ensuring the versatility of a multi component machine is most significant in the modular construction of its design. Due to the use of interchangeable modules, the necessary orientation of the tool and work piece is provided in accordance with the processing scheme and the possibility of using various cutting tools. The expansion of the orientation capabilities of a multi component machine is possible due to a change in the relative location of the executive bodies, the introduction of additional executive bodies in the modular construction of the machine design. Conclusions and findings encourage further research and practical research.*

*Key words: multi component machines, orientation capabilities, actuator, construction.*

**Постановка проблеми.** Високошвидкісна обробка є одним з основопологаючих підходів в підвищенні продуктивності праці та якості отримуваних деталей в машинобудівному виробництві. Високошвидкісна обробка отримала розвиток в різних сферах промисловості [1]. Це, в першу чергу, підвищує міцність, зменшує вагу конструкції та підвищує надійність. Процес збирання при переході до монолітним деталям суттєво спрощується і значно зменшується трудомісткість пригонювальних слесарно-збиральних робіт. Вказані тенденції вимагають створення металорежущих станків з новими функціональними можливостями [2, 3], забезпечують високу швидкість зняття металу при чорній обробці металів та сплавів, високу якість поверхні та точність обробки, при фінішних операціях відсутність чутливих вібрацій при обробці (вібрації в процесі різання негативно впливають на довговічність та надійність роботи деталі в процесі експлуатації). Такі показники можна досягти, використовуючи для обробки багатокомпонентні станки. Однак і такі багатокомпонентні станки вимагають удосконалення та розширення орієнтаційних можливостей.

**Ціль роботи:** виявити тенденції розвитку сучасних конструкцій багатокомпонентних станків для обробки деталей та можливості розширення їх орієнтаційних можливостей.

**Изложение основного материала.** Наряду с развитием станков традиционной конструкции, на протяжении последних лет развивались станки с применением механизмов параллельной кинематики [4]. Предлагается следующая классификация структур станков. В станке есть привода



и координаты (оси), по которым перемещаются исполнительные органы станка (шпиндель с инструментом, стол с обрабатываемой деталью). Будем считать, что привод будет отдельным, если на реализацию движения по данной координате используется только один привод и один механизм. Если для реализации движения по координате используется несколько приводов и один или несколько механизмов (в данном случае называемом механизмом параллельной кинематики), то такие привода будем называть связанными. В соответствии с этим признаком [5-6] всё множество структур станков можно классифицировать по трем группам:

- структуры станков с отдельными приводами;
- структуры станков со связанными приводами;
- гибридные структуры с отдельными и со связанными приводами.

В таблице приведена классификация множества возможных структур многокомпонентных станков.

Таблица 1

**Разбиение возможных структур многокомпонентных станков по признаку связности приводов**

		Раздельные приводы, ед.						
		0	1	2	3	4	5	6
Связанные приводы, ед.	0		P1C0K1	P2C0K2	P3C0K3	P4C0K4	P5C0K5	P6C0K6
	2	P0C2K2	P1C2K3	P2C2K4	P3C2K5	-	-	-
	3	P0C3K3	P1C3K4	P2C3K5	-	-	-	-
	4	P0C4K4	P1C4K5	-	-	-	-	-
	5	P0C5K5	-	-	-	-	-	-
	6	P0C6K6	-	-	-	-	-	-

В таблице приняты следующие обозначения: P – количество отдельных приводов, C – количество связанных приводов, K – количество координат.

Следует отметить, что связанными могут быть только привода многокомпонентных станков в количестве  $\geq 2$  единиц.

Будем считать традиционными структуры станков, в которых отсутствуют связанные привода. Это множество составляют: P6C0K6, P5C0K5, P4C0K4, P3C0K3, P2C0K2, P1C0K1. Далее, будем считать структуры только с механизмами параллельной кинематики, в которых присутствуют только связанные привода. Это множество составляют: P0C2K2, P0C3K3, P0C4K4, P0C5K5, P0C6K6. Все остальные структуры являются гибридными, а именно: P3C2K5, P2C3K5, P1C4K5, P2C2K4, P1C3K4, P1C2K3.

Рассмотрим характерные особенности типовых компоновок многокоординатных станков, имеющих разные структуры в соответствии с представленной классификацией.

Традиционные конструкции 5-ти координатных станков (структура P5C0K5). В мировой практике станкостроения созданы ряд станков по функциональным возможностям, приближающимся к указанным во введении. Находят широкое применение в машиностроении вертикальные 5-ти координатные станки, имеющие координаты X, Y, Z, A, C. Типичным представителем таких станков является мод. CFV5 фирмы Cincinnati Machine Ltd., общий вид которого представлен на рис. 1, а. Конструкция шпиндельной головки представлена на рис. 1, б



Рис. 1. Вертикальный 5-ти координатный станок CFV5 фирмы Cincinnati Machine Ltd. (а – общий вид станка; б – конструкция шпиндельной головки)

CFV5 – это 5-ти осевой вертикальный обрабатывающий центр, который идеально подходит как для пятисторонней обработки, так и для изготовления пресс-форм и шаблонов. Станок может функционировать с различными шпинделями, системами удаления стружки и подачи СОЖ, а также множеством дополнительных приспособлений, что позволяет его легко адаптировать к разнообразным практическим задачам. Разработанные на основе проверенной конструкции станка CFV, основные элементы CFV5 изготовлены из высокопрочного чугуна для работы в тяжелых условиях при максимальной нагрузке и обеспечения минимального веса станка. Литые элементы включают в себя трубчатые структуры, которые обеспечивают конструкции высокую статическую и динамическую жесткость, что обуславливает более высокое качество обработки и позволяет реализовать более жесткие допуски, необходимые для высокоточной механической обработки.

Встроенный глобусный стол обеспечивает возможность производить одновременную 5-ти координатную обработку деталей благодаря своей вместимости и гибкости перемещений. При максимальной нагрузке до 100 кг скорость вращения оси С на CFV5 может достигать 12000 град/мин, а скорость поворота оси А – 12000 град/мин. При помощи кнопки ускорения для минимизации продолжительности цикла и максимизации рабочего времени шпинделя CFV5 обеспечивает ускорение поворота оси С – 3000 град/с<sup>2</sup> и оси А – 1800 град/с<sup>2</sup>. Угол наклона оси А от +30° до -120°, а угол поворота оси С составляет 360°.

Горизонтальные 5-ти координатные станки (X, Y, Z, A, B) для реализации угловых движений по координатам А и В оснащаются шпиндельной головкой, представляющей собой «как бы наложенные один на другой поворотные столы». Совершенствуя этот принцип, фирма Cincinnati Machine Ltd. разработала шпиндельную головку, в которой для реализации движений угловых наклонов А, В применяются шарико-винтовые передачи (ballscrews) [7]. Шпиндельная головка обеспечивает наклон шпинделя по координатам А и В в пределах +/-40°. Эту конструкцию шпиндельной головки фирма Cincinnati Machine Ltd. широко применяет в своих 5-ти координатных станках, предназначенных для работы в различных отраслях промышленности.

Такой же принцип положен в основу работы шпиндельной головки, которой оснащен 5-ти координатный станок последней разработки мод. Automax Horizontal High Speed Plate Mill. Диапазон наклона шпинделя по координатам А и В составляет +/-45°. Шпиндель имеет частоту вращения до 24 000 об/мин. Диапазон подач – до 40 000 мм/мин. Станок позволяет обрабатывать в монолитных деталях перегородки, толщиной до 0,5 мм. Альтернативным направлением развития конструкций шпиндельных головок 5-ти координатных станков для различных сфер промышленности является использования в станках механизмов параллельной кинематики.

Основным достоинством структур P0C5K5, P2C3K5, P1C4K5 против рассмотренных является принципиальная возможность [3] достижения постоянства контурной скорости при 5-ти координатной интерполяции. Как показывает опыт создания [3, 4] станков структуры P0C5K5, P1C4K5, эти станки обладают средней точностью и недостаточной статической жесткостью.

Ряд зарубежных фирм направил свои усилия на создание 5-ти координатных станков по структуре P2C3K5 с использованием триподов. Фирма DS Technologie достигла хороших результатов в создании 5-ти координатных станков для высокоскоростной обработки деталей из твердого алюминия [4]. Свои станки она построила на базе Z3 модуля, несущего шпиндель. Модуль обеспечивает шпинделю 3-и перемещения: одно линейное 670 мм и два угловых +/-40° (наклоны шпинделя в двух взаимно перпендикулярных плоскостях). Конструкция Z3 модуля построена на базе механизма параллельной кинематики (трипода). Шпиндель имеет мощность 80 кВт и максимальную частоту вращения 30000 об/мин, конус шпинделя HSK-A63/80.

На рис. 2 представлен общий вид и кинематическая схема шпиндельной головки Z3 (DS Technologie).

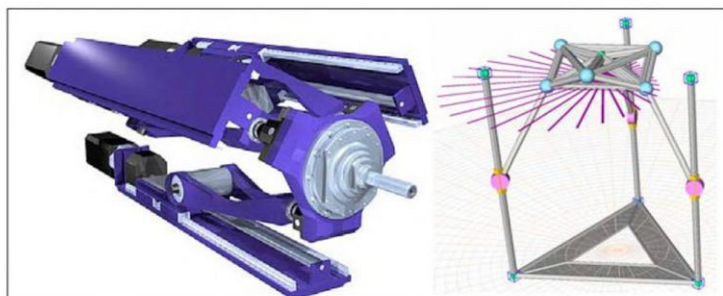
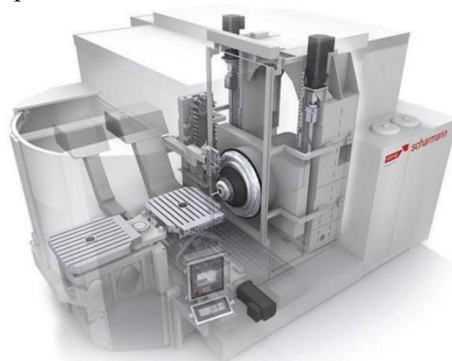


Рис. 2. Общий вид и кинематическая схема шпиндельной головки Z3 (DS Technologie)

На рис. 3 представлений общий вид станка мод. ECO SPEED, предназначенного для высокоскоростной обработки крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов из сплошных заготовок (плит) среднего размера.



**Рис. 3. Многокомпонентный центр ECO SPEED для обработки деталей со шпиндельной головкой Z3**

Можно отметить высокую точность обработки (размер, форма, расположение) и хорошее качество поверхности, исключающие последующие слесарно-пригоночные и полировочные работы до (и в) процесса сборки изделий.

Обрабатывающий центр Verne от Fatronik (рис. 4) представляет собой 5-тиосевую гибридную параллельную кинематическую машину, шпиндельная головка находится на параллельном модуле DOF, а сдельная часть размещена на поворотном столе, который имеет подмножество смещений, размерности 2, которые создаются произведением двух независимых вращений вокруг оси A и C  $\{Ra\} \cdot \{Rc\}$ .



**Рис. 4. Обрабатывающий центр Verne (Fatronik) и кинематическая схема**

Чтобы получить требуемое подмножество смещений размерности 5, а именно  $\{T3\} \cdot \{Ra\} \cdot \{Rc\}$ , параллельный модуль может иметь несколько смежных подмножеств размерности 3. Выбор есть  $\{Tu\} \cdot \{Tv\} \cdot \{Ra\}$ , то на этой стороне будет получена пересечение 3 смежных подмножеств, порождаемых каждой из конечностей. Множество возможных ориентаций в обрабатывающем центре Verne велико, а некоторые показаны на рис. 5.

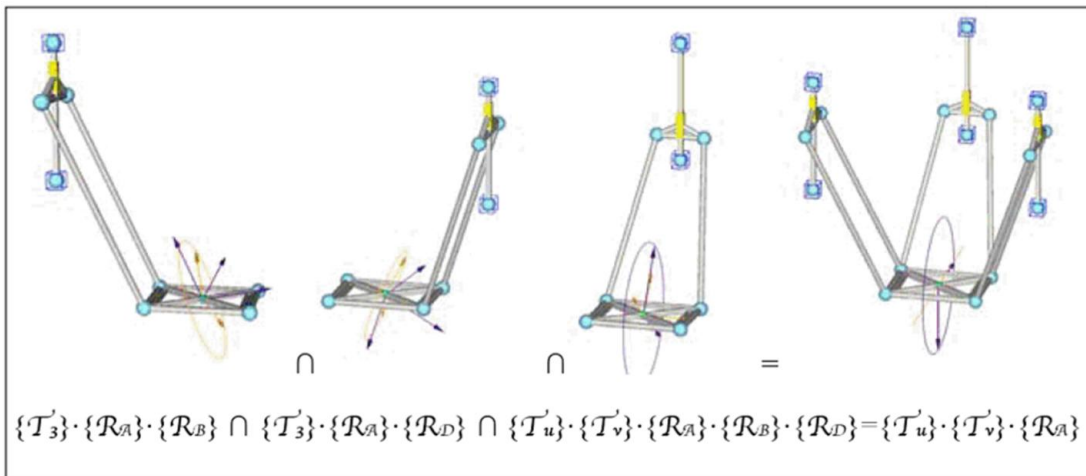


Рис. 5. Множество возможных ориентаций в обрабатывающем центре Verne

Возможность реализации схемы формообразования заданной поверхности на станке зависит от относительной ориентации траекторий исполнительных движений, которая определяется компоновкой оборудования и наличием вспомогательных движений, позволяющих изменять взаимное расположение исполнительных органов.

На рис. 6 показана относительная ориентация элементарных движений, характерная для универсальных фрезерных станков.

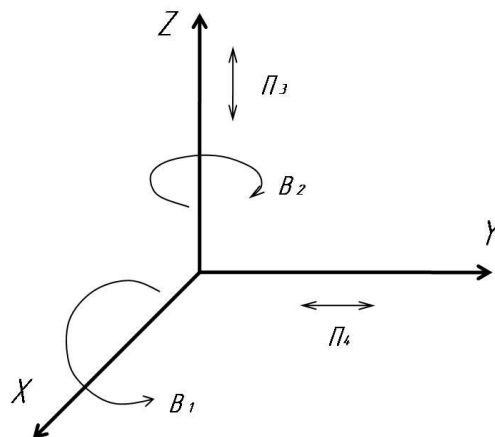


Рис. 6. Ориентация движений исполнительных органов универсального фрезерного станка

Каждое из элементарных движений можно рассматривать в собственной системе координат, которая благодаря вспомогательным движениям может менять свою ориентацию относительно базовой системы координат (рис. 7).

В универсальном фрезерном станке вспомогательные движения позволяют изменять ориентацию собственных систем координат элементарных движений  $B_1$  и  $\Pi_3$ .

В системе координат  $x'y'z'$ , связанной с движением  $B_1$  (рис. 7), следует рассматривать вспомогательные движения  $B_5$  и  $\Pi_6$ , служащие для изменения ориентации движения  $B_1$  относительно остальных элементарных движений, входящих в движение формообразования. Движение  $B_5$  необходимо в фрезерном станке для настройки угла скрещивания осей инструмента и заготовки с целью обеспечения в процессе обработки, например, перемещение режущих зубьев вдоль формируемых канавок при обработке прямозубых или косозубых колес с возможностью обработки вдоль винтовых канавок. Движение  $\Pi_6$  служит для перемещения инструментального шпинделя вдоль оси его вращения  $B_1$  с целью обновления режущих зубьев и поднастройки относительного расположения инструмента и заготовки.

В системе координат  $x''y''z''$ , связанной с движением  $\Pi_3$ , следует рассматривать вспомогательное движение  $B_7$ , которым обеспечивается параллельность оси вращения заготовки и направление движения подачи.

Каждое из рассмотренных вспомогательных движений может использоваться и с иными целями, что также расширяет технологические возможности станка. Например, вспомогательное движение  $B_5$  позволяет обеспечить параллельность осей вращения элементарных движений  $B_1$  и  $B_2$ , что делает возможным реализацию на универсальном фрезерном станке схем обработки с таким расположением осей, например, деталей с пазами на торце типа кулачковых муфт.

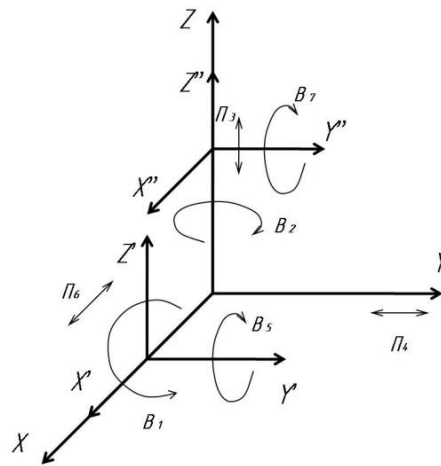


Рис. 7. Относительная ориентация движений исполнительных органов универсального фрезерного станка

Из приведенной схемы (рис. 7) можно констатировать, что расширение ориентационных возможностей многокомпонентного станка возможно за счет изменения относительного расположения исполнительных органов и введения дополнительных исполнительных органов.

**Вывод.** Роль компоновочного фактора в обеспечении универсальности многокомпонентного станка наиболее существенна при модульном принципе построения его конструкции. Благодаря применению сменных модулей обеспечивается необходимая ориентация инструмента и заготовки в соответствии со схемой обработки и возможность применения различных режущих инструментов.

Возможности расширения пространственной ориентации будут определяться компоновкой станка. Для каждого исполнительного движения многокомпонентного станка по кинематической схеме необходимо выделить реализующую его кинематическую группу, которая будет отвечать за множество исполнительных движений, образуемых элементарными движениями. При этом расширение ориентационных возможностей многокомпонентного станка возможно за счет изменения относительного расположения исполнительных органов, введения дополнительных исполнительных органов при модульном построении конструкции станка.

1. Кириченко А. М. Дослідження робочого простору верстатів-гексаподів / А. М. Кириченко, І. А. Валявський // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2008. – Вип. 3(46). – С. 10-15.

2. Кириченко А. М. Вплив діапазону кутів повороту шарнірних опор на об'єм робочого простору верстата-гексапода / А. М. Кириченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 65. – С. 56-63.

3. Müller, A. On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators // Robotica. – 2013. – Vol. 31(1). – P. 137-147.

4. Sartori, Natal G. Dual-space adaptive control of redundantly actuated parallel manipulators for extremely fast operations with load changes / G. Sartori Natal, A. Chemori, F. Pierrot // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Saint Paul, MN, USA, pp. 253-258, 2012.

5. Müller, A. Consequences of geometric imperfections for the control of redundantly actuated parallel manipulators // IEEE Trans. Robot. – 2010. – Vol. 26 (1). – P. 21–31.

6. Cao, Y. Singularity Elimination of Stewart Parallel Manipulator Based on Redundant Actuation / Y. Cao, H. Zhou, B. Li, S. Long, M. Liu // Advanced Materials Research. – 2011. – Vols. 143-144. – P. 308-312.

7. Sirotkin, R., Serkov N. Experimental Researches of Accuracy, Rigidity and dynamic Properties – 5-axis Machining Centre Hexamech-1 The 5th Chemnitz Parallel Kinematic Seminar 2006, April 25-26. Conference Proceedings. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2006, pp. 480–486



УДК 667.64:678.026

**М.Ю. Амелін***Херсонська державна морська академія***ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У КОНТЕКСТІ  
ВИКОРИСТАННЯ ЗАХИСНИХ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ**

*У роботі обґрунтована доцільність відновлення деталей транспорту полімерними композитами. Показано, що введення у полімер нанодисперсних часток дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі.*

*Для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, модифікатор, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і нанодисперсні частки. Досліджено залежність вмісту нанодисперсного порошку на адгезійні, фізико-механічні властивості і залишкові напруження епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними адгезійними і когезійними властивостями оптимальний вміст часток становить 0,1 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним навантаженням, позаяк показники їх властивостей суттєво підвищують порівняно з матрицею. Отримані результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей композитних матеріалів добре узгоджуються з результатами випробувань зразків з адгезійними характеристиками, що свідчить про їх достовірність.*

*Ключові слова: епоксидний композит, модуль пружності, ударна в'язкість, руйнівні напруження при згинанні.*

**М.Ю. Амелин***Херсонская государственная морская академия***ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В КОНТЕКСТЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*В работе обоснована целесообразность восстановления деталей транспорта полимерными композитами. Показано, что введение в полимер нанодисперсных частиц позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики композитных материалов и защитных покрытий на их основе.*

*Для формирования композитных материалов использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, модификатор, отвердитель полиетиленполиамин ПЕПА и нанодисперсные частицы. Исследована зависимость содержания нанодисперсного порошка на адгезионные, физико-механические свойства и остаточные напряжения эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными когезийными свойствами оптимальное содержание частиц в зависимости составляет 0,1 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим нагрузкам, поскольку показатели их свойств существенно повышаются по сравнению с матрицей. Полученные результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств композитных материалов хорошо согласуются с результатами испытаний образцов с адгезионными характеристиками, что свидетельствует об их достоверности.*

*Ключевые слова: эпоксидный композит, модуль упругости, ударная вязкость, разрушающие напряжения при изгибе.*

**M.Yu. Amelin***Kherson State Maritime Academy***ENSURING THE RELIABILITY OF VEHICLES IN THE CONTEXT OF THE USE OF  
PROTECTIVE POLYMERIC NANOCOMPOSITE COATINGS**

*The expediency of restoring the details of transport by polymer composites is justified in the work. It is shown that the introduction of nanodispersed particles into the polymer makes it possible to substantially improve the performance characteristics of composite materials and protective coatings based on them.*

*To form composite materials, epoxy diane oligomer ED-20, a modifier, a hardener polyethylene polyamine PEPA and nanodispersed particles were used. The dependence of the nanodisperse powder content on the adhesion, physical-mechanical properties and residual stresses of epoxy composites was studied. It is proved that for the formation of a composite material or a protective coating with improved cohesive properties, the optimal content of the particles in the dependence is 0.1 mass parts by 100 parts by mass. epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to resist static, dynamic loads, since their properties significantly increase in comparison with the matrix. The obtained results of experimental studies of the physico-mechanical properties of composite materials are in good agreement with the results of testing samples with adhesion characteristics, which indicates their reliability.*

*Key words: epoxy composite, modulus of elasticity, impact strength, breaking stresses in bending.*

**Постановка проблеми.** Підвищення надійності роботи засобів транспорту, у тому числі річкового і морського, зумовлено в першу чергу використанням полімерних композитних матеріалів (КМ) та захисних покриттів на їх основі. Такі матеріали широко витісняють традиційні метали та сплави завдяки підвищеним експлуатаційним характеристикам, що підвищує надійність деталей та механізмів. В основному КМ використовують у вигляді захисних покриттів для

поліпшення антикорозійних властивостей палубних механізмів та бортів суден, контейнерів, а також для підвищення зносостійкості дейдвудних комплексів, валопроводів чи гвинтів. При цьому актуальним є застосування захисних покриттів на епоксидній основі, позаяк вони відзначаються високими показниками адгезійної та когезійної міцності, що передбачає їх довговічність при використанні деталей за критичних умов експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний науковий і практичний досвід у напрямку розробки технологічних основ відновлення деталей транспорту полімерними композитами, а також дослідження фізико-механічних властивостей КМ висвітлено у працях авторів: Ю.С. Ліпатова, А.В. Букетова, П.Д. Стухляка, О.В. Шарка, Г.М. Бартенева та ін. [1-6]. Авторами доведено, що для покращення властивостей композитів у епоксидний зв'язувач необхідно вводити модифікатори, пластифікатори, дисперсні та волокнисті наповнювачі. Актуальним на сьогодні є введення нанодобавок за критичного вмісту. Такі дисперсні частки мають високу питому площу поверхні, що активує міжфазову взаємодію при структуроутворенні покриттів за гомеопатичного вмісту добавки. Враховуючи це, важливим є проведення дослідження стосовно визначення критичного вмісту нанодисперсних добавок при формуванні захисних епоксидних покриттів для забезпечення надійності транспортних засобів.

**Мета роботи** – дослідити вплив вмісту нанодисперсного наповнювача на властивості полімерних композитів для відновлення деталей транспорту.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю.

Як модифікатор використано парааміноазобензол (ПААБ). Згідно результатів попередніх досліджень модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту 1,0 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса парааміноазобензолу – 197. Температура плавлення – 400 К.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як нанодисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано порошок, який є сумішшю нанодисперсних сполук (СНДС) і характеризується наступним складом, %:  $Si_3N_4$  – 90,  $I_2O_3$  – 5;  $Al_2O_3$  – 5. Зернистість часток становить  $d = 30 \dots 90$  нм. Характеристики наповнювачів наведено у табл. 1.

Таблиця 1

## Характеристики наповнювачів

Характеристики	$Si_3N_4$	$I_2O_3$	$Al_2O_3$
Питома площа поверхні, $S$ , м <sup>2</sup> /г	44	14	44
Розмір часток, визначений методом теплової адсорбції, $d$ , нм	41	89	41
Розмір часток, визначений методом електронної мікроскопії, $d$ , нм	39	35	76

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і часток наповнювача впродовж часу  $\tau = 10 \pm 0,1$  хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у композиті зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійну міцність, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні і ударну в'язкість.

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив –  $d = 25$  мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у покриттях визначали консольним методом [4]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,8$  мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина –  $l = 100$  мм, робоча довжина –  $l_0 = 80$  мм, товщина –  $\delta = 0,3$  мм.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина  $l = 120 \pm 2$  мм, ширина  $b = 15 \pm 0,5$  мм, висота  $h = 10 \pm 0,5$  мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі  $T = 298 \pm 2$  К і відносній вологості  $d = 50 \pm 5$  %. Використовували зразки з такими параметрами:  $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$  мм. Відстань між опорами  $40 \pm 0,5$  мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних і фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Попередньо експериментально досліджено властивості модифікованої і обробленої ультразвуком епоксидної матриці. Доведено (рис. 1), що показники її адгезійної міцності при розриві і зсуві, а також залишкових напружень становлять відповідно  $\sigma_a = 43,7$  МПа,  $\tau = 10,4$  МПа,  $\sigma_z = 2,8$  МПа. Надалі показано (рис. 1), що введення у епоксидний зв'язувач нанодисперсних добавок приводить до підвищення показників адгезійних властивостей КМ. Максимальне зростання показників адгезійної міцності при відриві КМ спостерігали за введення у епоксидний зв'язувач наночасток СНДС у кількості  $q = 0,1$  мас.ч. Формування такого композиту забезпечує збільшення адгезійної міцності матеріалу від  $\sigma_a = 43,7$  МПа (для модифікованої епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 53,3$  МПа. Надалі, збільшення вмісту СНДС призводить до погіршення адгезійних властивостей КМ. Зокрема встановлено (рис. 1, крива 1), що введення часток за вмісту  $q = 0,1$  мас.ч. приводить до формування КМ, який має адгезійну міцність при відриві на рівні модифікованої матриці  $\sigma_a = 46,2$  МПа. Надалі збільшення вмісту часток призводить до суттєвого погіршення адгезійних властивостей композитів, які відзначаються показниками, нижчими аналогічних значень для епоксидної матриці. Зокрема, КМ із вмістом СНДС у кількості  $q = 1,0$  мас.ч. має адгезійну міцність при відриві –  $\sigma_a = 38,2$  МПа, а КМ із вмістом СНДС у кількості  $q = 1,0$  мас.ч. –  $\sigma_a = 28,3$  МПа. Це, на наш погляд, зумовлено недостатнім змочуванням активних нанодисперсних часток макромолекулами епоксидного олігомеру, а це, у свою чергу, передбачає погіршення міжфазової взаємодії при зшиванні матеріалів і, як наслідок, зменшення вмісту гель-фракції у них.

Паралельно досліджували адгезійні властивості цих же матеріалів при зсуві, що визначаються тангенціальними напруженнями при руйнуванні зразків. Показано (рис. 1, крива 2), що введення часток наповнювача у кількості  $q = 0,1$  мас.ч. забезпечує формування КМ з показниками адгезійної міцності при зсуві –  $\tau = 9,8$  МПа. Це суттєво не відрізняється від аналогічних показників для модифікованої епоксидної матриці –  $\tau = 10,4$  МПа (значення знаходяться у межах похибки експерименту). Однак, надалі введення добавки призводить до суттєвого зменшення адгезійних властивостей матеріалів при зсуві. При цьому, показники адгезійної міцності при зсуві для матеріалів із вмістом часток  $q = 0,5 \dots 2,0$  мас.ч. становлять  $\tau = 5,0 \dots 5,4$  МПа, що є у 2 рази меншим від аналогічних показників для модифікованої епоксидної матриці. Отже, можна констатувати, що введення наночасток СНДС за вмісту  $q = 0,1$  мас.ч. не впливає на адгезійну міцність КМ при зсуві. Навпаки, збільшення вмісту добавки (понад  $q = 0,1$  мас.ч.) не лише нівелює активацію фізико-хімічних процесів структуроутворення матеріалів при зшиванні, що може покращити адгезійну міцність КМ при зсуві, але й призводить до погіршення досліджуваних властивостей композитів.

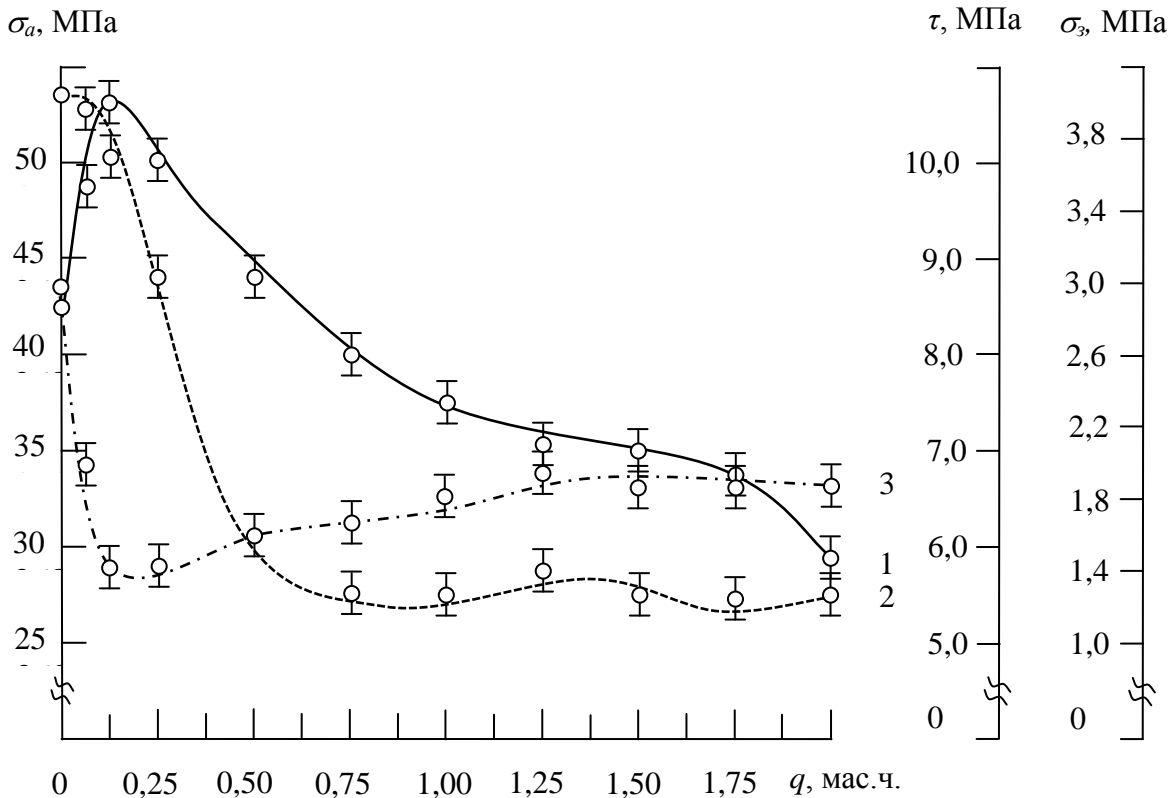


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту нанонаповнювача СНДС: 1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ ); 3 – залишкові напруження ( $\sigma_3$ ). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

У цьому контексті вважали за доцільне дослідити динаміку залишкових напружень у захисних покриттях від вмісту нанодисперсних часток СНДС. Зазначимо, що залишкові напруження у захисному покритті визначають його довговічність при експлуатації, особливо за критичних навантажень і знакозмінних температур. Виходячи з цього, важливим є отримати КМ і захисні покриття на їх основі з максимальними показниками адгезійної міцності при незначних залишкових напруженнях. Доведено (рис. 1, крива 3), що введення наночасток за вмісту  $q = 0,1$  мас.ч. приводить до різкого зниження залишкових напружень стосовно модифікованої полімерної матриці від  $\sigma_3 = 2,8$  МПа до  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Надалі збільшення вмісту часток у межах  $q = 0,5 \dots 2,0$  мас.ч. призводить до монотонного зростання залишкових напружень до  $\sigma_3 = 1,5 \dots 1,8$  МПа. Можна зробити висновок про різний механізм перебігу фізико-механічних процесів структуроутворення для КМ із вмістом часток у кількості  $q = 0,1$  мас.ч. та КМ із вмістом часток у кількості  $q = 0,25 \dots 2,00$  мас.ч. Для обґрунтування наведеного вище додатково проводили дослідження зразків з покриттями методом оптичної мікроскопії. Показано (рис. 2, а, б), що для покриттів із вмістом часток у кількості  $q = 0,10 \dots 0,25$  мас.ч., які не відзначаються високими показниками залишкових напружень, характерна рівномірно розподілена полого структура поверхні покриття. Водночас слід зазначити, що на їх поверхні виявлено повітряні включення, скупчення яких мають лінійну і частково розгалужену форму. Особливо це видно на світлинах, що ілюструють зображення поверхні зразків за збільшення ( $\times 40$ ) (рис. 3, а, показано стрілками)). Можна стверджувати, що такі включення зумовлюють підвищення залишкових напружень, оскільки є їх концентраторами. Для їх нівелювання слід проводити додаткову обробку матеріалів при їх зшиванні, наприклад вакуумування.

Аналіз світлин покриттів, наповнених наночастками за вмісту  $q = 0,50 \dots 0,75$  мас.ч. (рис. 2, в, г), дозволяє стверджувати при формуванні структури матеріалів, яка, окрім скупчення повітряних включень, містить ділянки, що мають вспучення і рихлу форму. Це яскраво помітно на світлинах, наведених на рис. 3, б, при збільшенні ( $\times 40$ ). Показано (рис. 3, б, поз. 1, а), що сформована нерівномірна структура покриття не лише за площею, але й за товщиною містить включення рихлої форми. Навколо них помітні ділянки з нерівномірним розподілом наповнювача у полімері (рис. 3, б, поз. 1, б). Додатково показані ділянки на поверхні зразків, що містять

скупчення повітряних включень (рис. 3, б, поз. 2, а, б). Очевидно, що такі матеріали відзначаються підвищеними залишковими напруженнями.

Додатково досліджували світлинні поверхні зразків, наповнених частками у кількості  $q = 1,00 \dots 2,00$  мас.ч. Показано (рис. 2, д-ж), що такі покриття мають поверхню, яка відзначається тріщинами, лініями сколювання, кратерами. На рис. 3, в показано вигляд одного з таких кратерів (поз. 1, а) за збільшення ( $\times 40$ ), навколо якого додатково формується значна кількість повітряних включень (поз. 2, а, б). Звичайно, це суттєво впливає на збільшення залишкових напружень у матеріалах за рахунок надмірної кількості нанодисперсних часток у полімері.

Отже, встановлено оптимальний вміст нанодисперсного наповнювача СНДС для формування модифікованого епоксидного захисного покриття з максимальними адгезійними характеристиками і незначними залишковими напруженнями. Доведено, що при введенні порошку у вигляді суміші нанодисперсних сполук ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{I}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ( $d = 30 \dots 90$  нм) у кількості  $q = 0,1$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 1 мас.ч. модифікатора парааміноазобензолу формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 53,3$  МПа; адгезійна міцність при зсуві –  $\tau = 9,8$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Це забезпечує підвищення, порівняно з модифікованою епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності у 1,3 рази і зниження залишкових напружень у 2,0 рази.



а)



б)



в)



г)





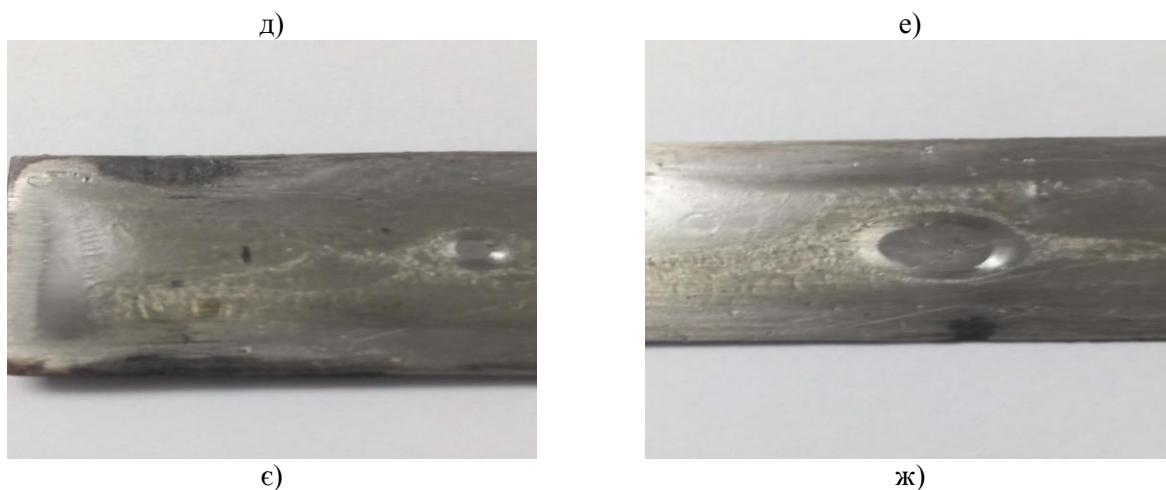
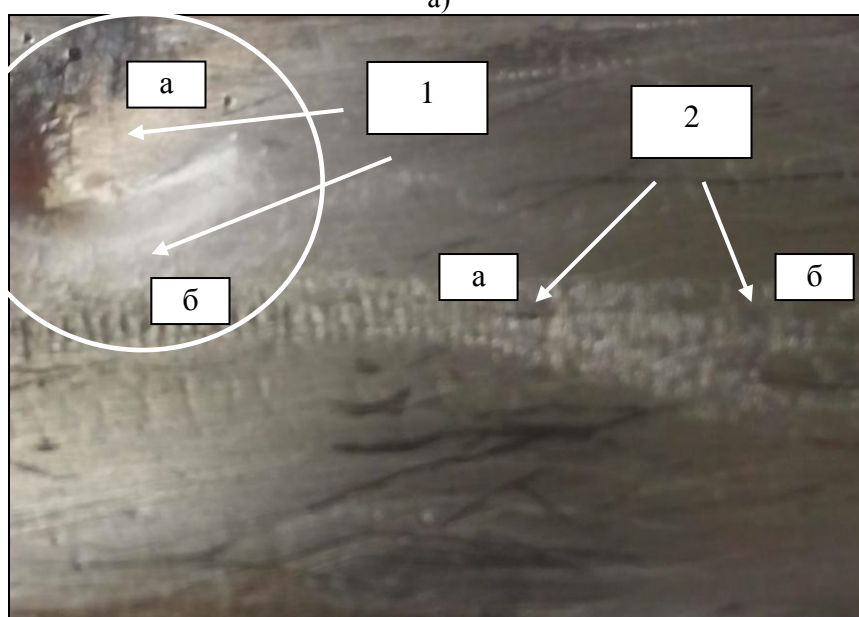


Рис. 2. Мікросвітлини поверхні зламу КМ з нанодобавкою,  $q$ , мас.ч. (1×1): а) 0,10; б) 0,25; в) 0,50; г) 0,75; д) 1,00; е) 1,50; є) 1,75; ж) 2,0.



а)



б)

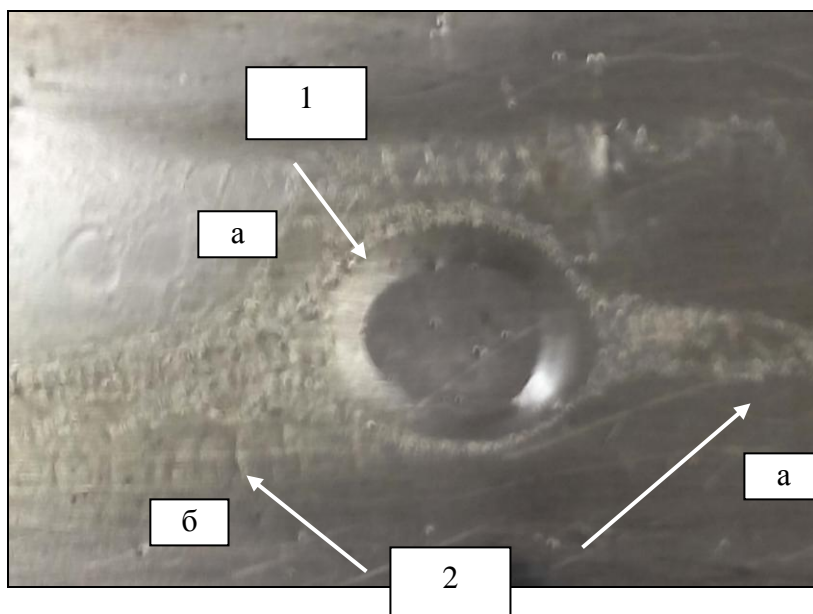


Рис. 3. Мікросвітлини поверхні зламу КМ з нанодобавкою,  $q$ , мас.ч. ( $\times 40$ ): а) 0,10; б) 0,75; в) 1,50 (познач. див. у тексті).

На наступному етапі досліджували фізико-механічні властивості КМ з нанодисперсним наповнювачем СНДС. Експериментально встановлено, що властивості модифікованої і обробленої ультразвуком епоксидної матриці при наведених вище режимах формування є наступними: модуль пружності при згинанні –  $E = 3,9$  ГПа, руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{32} = 51,8$  МПа, ударна в'язкість –  $W = 11,9$  кДж/м<sup>2</sup>.

Доведено (рис. 4), що введення наночастинок за вмісту  $q = 0,1 \dots 0,5$  мас.ч. не приводить до поліпшення властивостей матеріалів. За такого вмісту часток формуються КМ з модулем пружності  $E = 3,8 \dots 4,0$  ГПа (значення знаходяться на рівні показників епоксидної матриці). Надалі збільшення вмісту СНДС призводить до монотонного зниження показників модуля пружності при згинанні КМ до значень  $E = 3,0$  ГПа (для КМ з СНДС у кількості  $q = 2,0$  мас.ч.).

Навпаки, введення наночастинок за вмісту  $q = 0,10 \dots 0,25$  мас.ч. (рис. 4, крива 2) забезпечує суттєве підвищення руйнівних напружень при згинанні КМ від  $\sigma_{32} = 51,8$  МПа (для модифікованої епоксидної матриці) до  $\sigma_{32} = 57,3 \dots 58,0$  МПа. Надалі спостерігали погіршення когезійних властивостей КМ при збільшенні вмісту наночастинок понад критичного вмісту.

На останньому етапі досліджували ударну в'язкість нанопоповнених матеріалів. Доведено (рис. 4, крива 3), що нанопоповнювач недоцільно використовувати при формуванні композитів, які працюють в умовах впливу ударних навантажень, позаяк показники ударної в'язкості суттєво знижуються при введенні наповнювача СНДС.

Підсумовуючи наведене вище, можна констатувати, що отримані результати добре узгоджуються з експериментальними випробуваннями адгезійної міцності КМ при відриві та залишкових напружень. Виходячи з цього, можна констатувати про інтенсивну дію активних груп на поверхні наповнювача на процеси зшивання полімеркомпозитів, що пришвидшує їх гелеотворення, внаслідок чого збільшуються показники не лише адгезійної, але й когезійної міцності розроблених матеріалів.

Встановлено, що введення часток СНДС за вмісту  $q = 0,10 \dots 0,25$  мас.ч. забезпечує, порівняно з полімерною матрицею, підвищення показників руйнівних напружень при згинанні КМ від  $\sigma_{32} = 51,8$  МПа до  $\sigma_{32} = 57,3 \dots 58,0$  МПа. При цьому, модуль пружності при згинанні практично не змінюється (за даного вмісту часток), а ударна в'язкість суттєво погіршується.

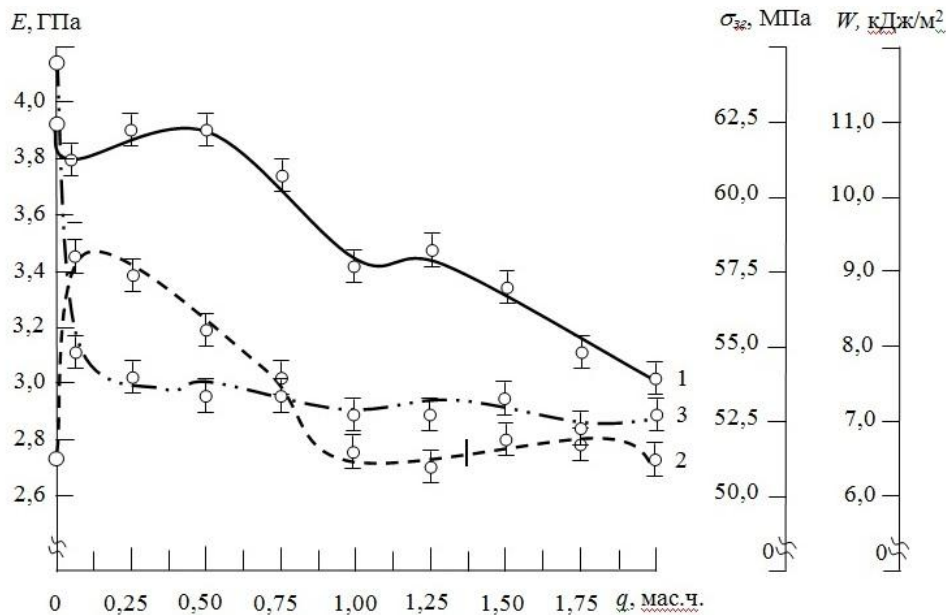


Рис. 4. Залежність фізико-механічних властивостей і ударної в'язкості епоксидної матриці від вмісту нанонаповнювача СНДС: 1 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 2 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ); 3 – ударна в'язкість ( $W$ , кДж/м<sup>2</sup>).

**Висновки.** У роботі встановлено оптимальний вміст нанодисперсного наповнювача для формування модифікованого епоксидного захисного покриття з покращеними адгезійними, когезійними характеристиками і незначними залишковими напруженнями для підвищення надійності засобів транспорту.

1. Доведено, що при введенні порошку у вигляді суміші нанодисперсних сполук ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{I}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ( $d = 30 \dots 90$  нм) у кількості  $q = 0,1$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 1 мас.ч. модифікатора парааміноазобензолу формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 53,3$  МПа; адгезійна міцність при зсуві –  $\tau = 9,8$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Це забезпечує підвищення, порівняно з модифікованою епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності у 1,3 рази і зниження залишкових напружень у 2,0 рази.

2. Встановлено, що введення часток порошку у вигляді суміші нанодисперсних сполук ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{I}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ( $d = 30 \dots 90$  нм) у кількості  $q = 0,1$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 1 мас.ч. модифікатора парааміноазобензолу за вмісту  $q = 0,10 \dots 0,25$  мас.ч. забезпечує, порівняно з полімерною матрицею, підвищення показників руйнівних напружень при згинанні композитів від  $\sigma_{32} = 51,8$  МПа до  $\sigma_{32} = 57,3 \dots 58,0$  МПа. При цьому, модуль пружності при згинанні практично не змінюється (за даного вмісту часток), а ударна в'язкість суттєво погіршується.

#### Література

1. Buketov A.V. Nanomodified dispersed particles- and synthetic fibers-filled epoxy composite materials for the metal-polymer tribosystems of transport vehicles / A.V. Buketov, D.O. Zinchenko, S.O. Smetankin // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. – 2017. – Vol. 8. – P. 41-54.
2. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport. – 2016. – Vol. 31(3). – P. 333-342.
3. Лидин Р.А. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Химия, 2000. – 480 с.
4. Стухляк П.Д. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, С.В. Панин, П.О. Марущак, К.М. Мороз, М.А. Полтаранин, Т. Вухерер, Л.А. Корниенко, Б.А. Люкшин // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 65-83.
5. Букетов А.В. Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленис(4,1-фенилен)бис(N,N-диэтилдитиокарбамата) на структуру и свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, В.О. Скирденко // Пластические массы. – 2014. – № 7-8. – С. 9-16.
6. Ходаковський О.В. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту / О.В. Ходаковський, М.Ю. Амелін, С.О. Сметанкін, О.В. Акімов, В.М. Яцюк // Вісник НТУ «ХПБ». – 2016. – № 50 (1222). – С.42-46.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2018

УДК 677.055.621

**Л.М. Березін***Київський національний університет технологій та дизайну***ДО РОЗРАХУНКІВ ДЕТАЛЕЙ НА МІЦНІСТЬ, ДОВГОВІЧНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ**

*Приведено систематизацію традиційних методів розрахунку деталей на міцність, довговічність та надійність, запропоновано стратегію обґрунтованого вибору методу, що базується на поділі деталей на певні групи, сприяє розвитку методології забезпечення заданого рівня надійності та мінімізації маси деталей*

*Ключові слова:* розрахунки, міцність, довговічність, надійність.

**Л.Н. Березин****К РАСЧЕТУ ДЕТАЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ, ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ**

*Приведена систематизация традиционных методов расчета деталей на прочность, долговечность и надежность, предложена стратегия обоснованного выбора, который базируется на делении деталей на определенные группы, способствует развитию методологии обеспечения заданного уровня надежности и минимизации массы деталей*

*Ключевые слова:* расчеты, прочность, долговечность, надежность

**L. Berezin****TO THE CALCULATION OF DETAILS FOR STRENGTH, LONGEVITY AND RELIABILITY**

*Is resulted systematization of traditional methods of calculation of details for strength, longevity and reliability, is offered strategy of choice of method, that is based on dividing of details into groups on certain signs with the use for them of the reasonable calculation methods, promotes development of methodology of deciding of the applied project tasks of providing of preset level of reliability and minimization of mass for details*

*Keywords:* calculations, strength, longevity, reliability

**Постановка проблеми.** Однією з проблем сучасного машинобудування є проектування та виготовлення надійного обладнання при одночасному зниженні металомісткості його деталей. Тому подальший розвиток теорії і методології розв'язку прикладних задач забезпечення достатнього рівня довговічності та надійності деталей за критерієм міцності та мінімізації маси, особливо на етапі проектування, є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Широкий спектр напрацювань в сучасній теорії та практиці розрахунків на міцність, довговічність та надійність деталей машин загального призначення представлено в літературних джерелах [1]...[5] та інших. В [6] наведена систематизація та узагальнення розв'язків проектних задач з довговічності та надійності стосовно стержньових елементів (СЕ) складної ступінчастої форми, які використовуються в в'язальних механізмах панчішно-шкарпеткових автоматів (ПША). В [7] пропонується методологічний підхід вибору розрахунків довговічності в детермінованій або надійності в імовірнісній постановках в залежності від стадії проектування та наявної інформації. Проте, незважаючи на комплексне висвітлення проблеми, існує прогалина в стратегії вибору конкретного методу розрахунку, який переважно базується на кваліфікації та інтуїції проектувальника стосовно кожної деталі окремо.

**Постановка завдань.** Метою роботи є стратегія практичної реалізації на етапі проектування заданого рівня довговічності та надійності деталей за критерієм міцності при мінімізації їх маси, яка основана на поділі деталей на групи за певними ознаками з використанням для них відповідних розрахункових методів на міцність, а при необхідності, на довговічність та надійність. Особливо це стосується деталей ПША як обладнання з традиційним відтворенням технологічного процесу, коли інтенсифікація технологічного процесу значно впливає на підвищення динамічних навантажень.

У відповідності до мети задачами дослідження були: аналіз літературних джерел та нормативно-технічних документів стосовно традиційних методів розрахунків деталей на міцність, довговічність та надійність; оцінити прийнятність розрахунків за міцністю в детермінованій та імовірнісній постановках для деталей складних форм, запропонувати стратегію вибору методу розрахунку, який відмінний від загально прийнятого, що ґрунтується переважно на досвіді проектувальника.

**Викладення основного матеріалу.** Особливості проектування технологічного обладнання, включно з ПША, полягає в тому, що частина стандартизованих та уніфікованих деталей, яку відносимо до першої групи, є наперед надійними та мають ресурс, який значно перевищує

тривалість капітального ремонтного циклу. Очевидно, що для таких деталей розрахунки на міцність недоцільні.

До другої групи належить номенклатура деталей, з характерним для них надлишковим запасом міцності, що призводить до збільшення їх габаритів, маси та відповідно динамічних навантажень. Для цих деталей корегування їх розмірів виконують за традиційними інженерними розрахунками на міцність, а саме:

$$\text{- за нормованим коефіцієнтом запасу міцності} \\ n \geq [n]; \quad (1)$$

$$\text{- по допустимому напруженню} \\ \sigma \leq [\sigma], \quad (2)$$

де  $n = \sigma_{sp} / \sigma$  - розрахунковий коефіцієнт запасу міцності;

$\sigma$  - максимальне діюче напруження;

$\sigma_{sp}$  - граничне напруження.

В розрахунках деталей на статичну міцність за граничне напруження приймають для крихких матеріалів (наприклад, чавунів) границю міцності  $\sigma_B$ , для пластичних (наприклад, сталей) – границю текучості  $\sigma_T$ , в розрахунках деталей на втомленість  $\sigma_{sp} = \sigma_{-1}$ , де  $\sigma_{-1}$  - границя втомленості матеріалу при симетричному циклі навантаження.

При встановленні нормованого коефіцієнту запасу міцності  $[n]$  спираються на досвід проектувальника в розрахунках прототипів, а також на порівняння цих значень з результатами спостережень в експлуатації або, при наявності, за рекомендованими нормами міцності. Наприклад, для кріпильних різьбових деталей приймають  $[n]=1,5$ . Оцінку міцності по допустимому напруженню  $[\sigma]$  за (2) виконують переважно в наближених, попередніх розрахунках однотипних деталей при детермінованих умовах навантаження, усталеній технології виробництва та розробленій системі допустимих напружень.

Аналогічну перевірку на міцність за формулами (1) та (2) необхідно та достатньо виконувати для деталей третьої групи, несуча здатність яких обмежується жорсткістю або стійкістю, а міцність - їх розмірами, які обмежені у відповідності до вимог технологічного процесу. Наприклад, до таких деталей в ПША, функціональні відмови яких зафіксовано, належать податливі грані клинів, штовхачі, гвинтові циліндричні пружини пасків для голок і платин, п'яткового компенсатора та відвідних клинів в'язальних систем, шибери для відбору голок.

До четвертої групи складають деталі машин загального призначення, розрахунки яких широко висвітлені науково-технічній літературі та достатньо представлені в нормативних матеріалах. Це передусім кріпильні різьбові, зубчасті, пасові, підшипники, вали тощо.

Для різьбових з'єднань слід розрізняти розрахунки вірогідності безвідмовної роботи за квантилями нормованого нормального розподілу:

а) за критерієм статичної міцності

$$u_{p(cm)} = - \frac{\bar{n}_{cm} - 1}{\sqrt{\bar{n}^2 V_{\sigma T}^2 + V_{pac}^2}}; \quad (3)$$

б) за критерієм втомленості

$$u_{p(em)} = - \frac{\bar{n}_{em} - 1}{\sqrt{\bar{n}_{em}^2 V_{-1\sigma}^2 + V_a^2}}, \quad (4)$$

де  $\bar{n}_{cm} = \frac{\bar{\sigma}_T}{\bar{\sigma}_{pac}} = \frac{\pi d_p^2 \bar{\sigma}_T}{4(kF_{zam} + \chi F)}$  та  $\bar{n}_{em} = \frac{\bar{\sigma}_{-1\sigma}}{\bar{\sigma}_a}$  - коефіцієнти запасу міцності за середніми

напруженнями та напруженнями втомленості;

$\bar{\sigma}_T$ ,  $\bar{\sigma}_{-1\sigma}$ ,  $\bar{\sigma}_{pac}$ , та  $\bar{\sigma}_a$  - середні значення границь текучості та втомленості різьбової деталі, діюче та напруження, яке приведено до симетричного циклу;

$V_{\sigma T}$ ,  $V_{-1\sigma}$  та  $V_a$  - коефіцієнти варіації границі текучості і втомленості матеріалу різьбової деталі та навантаження;



$d_p$  - розрахунковий діаметр різьби різьбової деталі;

$\bar{F}_{зам}$  та  $\bar{F}$  - середні значення сили затяжки та центральної відривної сили, як випадкових величин;

$k$  - коефіцієнт, який враховує кручення болта (якщо кручення болта при затяжці унеможливлено,  $k=1$ , в інших випадках  $k=1,3$ );

$\chi$  - множник, що характеризує частку зовнішнього навантаження на стик.

Зубчасті колеса розраховують на опір контактної втомленості та на опір втомленості при згині. За формулою (4) розраховують вали за критерієм втомленісної міцності, якщо коефіцієнт запасу міцності  $\bar{n}_{ем}$   $1/\bar{n}_{ем} = 1/\bar{n}_{\sigma} + 1/\bar{n}_{\tau}$ , де враховується вплив нормальних  $\sigma$  та дотичних  $\tau$  напружень відповідно при одночасному згині та крученні. Оскільки коефіцієнт запасу міцності за нормальними напруженнями  $\bar{n}_{\sigma}$  значно менший від коефіцієнту за дотичними напруженням  $\bar{n}_{\tau}$ , то коефіцієнт варіації границі втомленості валу  $\nu_{-1\sigma}$  приймають за нормальними напруженнями. Окрім того, коефіцієнт варіації навантаження  $\nu_a$  може досягати значення 0,3 та домінувати над  $\nu_{-1\sigma}$  [1].

Розрахунки підшипників кочення [1] на довговічність виконують в ймовірнісній постановці в загальній формі з використанням довідкової, окремо для підшипників, інформації. Основна відмінність – розрахунок ведуть не за напруженням, а за динамічною вантажопідйомністю підшипників. Середнє значення динамічного еквівалентного навантаження  $\bar{P}$  підшипників обчислюють за звичайними залежностями, в які підставляють середні значення радіального та осевого навантаження. Коефіцієнт варіації динамічного еквівалентного навантаження  $\nu_P$  приймають рівним коефіцієнту варіації зовнішнього навантаження, яке діє на підшипник.

До деталей п'ятої групи доцільно відносити силові деталі, розрахунок на міцність яких обов'язків в ймовірнісному аспекті за критерієм втомленості. Для цих деталей характерним є випадковість навантажень і розсіяння характеристик міцності матеріалів при вимозі забезпечення малих, але достатніх запасів міцності, що характеризується умовою  $\bar{n} \geq n_{кр(\beta)}$ . В ПША це деталі барабанів механізмів управління, механізмів утворення рисунків, рингель-апаратів тощо.

Граничне значення коефіцієнту запасу  $\bar{n}_{кр(\beta)}$  з певною вірогідністю  $\beta$  визначають методом довірчих інтервалів за формулою:

$$\bar{n}_{кр(\beta)} = \frac{1 + t_{\sigma max} \cdot \nu_{\sigma}}{1 - t_{\sigma-1\sigma min} \cdot \nu_{-1\sigma}}, \quad (5)$$

де  $\nu_{\sigma} = S_{\sigma} / \bar{\sigma}$ ,  $\nu_{-1\sigma} = S_{\sigma-1\sigma} / \bar{\sigma}_{-1\sigma}$  - коефіцієнти варіації при  $S_{\sigma}$  та  $S_{\sigma-1\sigma}$  - середньо квадратичних відхилення випадкових величин  $\sigma$  та  $\sigma_{-1\sigma}$ ;

$t_{\sigma-1\sigma min}$ ,  $t_{\sigma max}$  - толерантні коефіцієнти нижньої межі розсіяння границі втомленості деталі та верхньої межі розсіяння діючого напруження при наперед заданому нормованому рівні значущості  $\alpha$  та певної вірогідності  $\beta$ . Для деталей технологічного обладнання, як правило, приймають  $\beta=0,8...0,9$ .

Формули для обчислення довірчих меж параметрів для типових розподілів, включно з нормальним, представлені в [8].

При невиконанні умови міцності  $\bar{n} \leq n_{кр(\beta)}$  у відповідності до нормативних рекомендацій [9] необхідна перевірка, яка полягає в обчисленні коефіцієнту запасу міцності  $\bar{n}_P$ , який відповідає вірогідності руйнування  $P$ :

$$\bar{n}_P = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - u_P^2 \cdot \nu_{-1\sigma}^2)(1 - u_P \cdot \nu_{\sigma}^2)}}{1 - u_P^2 \cdot \nu_{-1\sigma}^2} \quad (6)$$

або вірогідності руйнування  $P$ , яку визначають за таблицею після обчислення квантилю нормованого нормального розподілу – за формулою, яка обернена до (6):

$$u_p = -\frac{\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}}{\sqrt{S_{-10}^2 + S_{\sigma}^2}} = \frac{1 - \bar{n}}{\sqrt{\bar{n} \cdot v_{-10}^2 + v_{\sigma}^2}}. \quad (7)$$

Якщо (7) представити інтегралом Лапласа  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-x^2/2} dx$ , то з використанням таблиць табульованої функції Лапласа визначення вірогідності руйнування значно спрощується:

$$P = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}}{\sqrt{S_{-10}^2 + S_{\sigma}^2}}\right). \quad (8)$$

Якщо нехтувати розсіянням значень границі втомленості деталей (стосується деталей, що випускаються дрібними серіями), то маємо  $S_{\sigma_{-10}} = 0$ , відповідно  $v_{\sigma_{-10}} = 0$  та отримуємо з (7) та (8)

формули для окремого випадку  $u_p = -\frac{\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}}{S_{\sigma}}$  та  $P = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}}{S_{\sigma}}\right)$ . При нехтуванні

розсіянням діючих напружень, тобто вважати їх детермінованими при  $S_{\sigma} = 0$  та відповідно  $v_{\sigma} = 0$ ,

маємо з (7) та (8)  $u_p = -\frac{\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}}{S_{-10}}$  та  $P = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\bar{\sigma}_{-10} - \bar{\sigma}}{S_{-10}}\right)$ .

Очевидно, що обчислені за формулами (7) та (8) значення  $u_p$  та  $P$  перевищують ті, що визначаються в двох вище наведених окремих випадках, але при достатньому об'ємі вхідної інформації та виконаних обчисленнях, за вимогами надійності дають рівноцінні результати.

При представленні функції Лапласа наближеними складовими, (8) прийме вид [4]:

$$P = \frac{v_{\xi}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2v_{\xi}^2}} (1 - v_{\xi}^2 + 3v_{\xi}^4 - \dots), \quad (9)$$

де  $v_{\xi} = \frac{S_{\xi}}{\psi} = \frac{\sqrt{S_{-10}^2 + S_{\sigma}^2}}{\sigma_{-1} - \sigma}$  - коефіцієнт варіації випадкової величини  $\xi = \sigma_{-1} - \sigma$ .

Похибка обчислення  $P$  за формулою (9) не перевищує останнього при обчисленні члену ряду. Слід зауважити, що при визначенні вірогідності руйнування за формулами (7) та (9), також отримуємо практично однакові результати.

У випадках різних комбінацій інших відомих законів розподілів (Вейбула, логарифмічно нормального, гама-розподіл тощо) характеристик міцності та навантаженості, ймовірнісні розрахунки по визначенню точкових оцінок показників надійності в кінцевій формі виконують за формулами в [10].

Найбільш цікавим є загальний випадок, коли значення випадкової величини не підпорядковуються ніякому класичному закону розподілу. Розв'язок в цій постановці представлений в [6] на прикладі адаптованої до в'язального механізму ПША динамічної моделі в поліноміальній формі випадкових значень максимального ударного навантаження  $F$  голки в залежності від силу опору  $F_o$  її руху як функції випадкового аргументу. Для визначення щільності розподілу ймовірностей неперервної випадкової величини  $F$  використовували вираз

$$f(F) = f[q(F)] \cdot q'(F),$$

де  $q(F)$ ,  $q'(F)$  – функція, яка обернена функції  $F = f(F_o)$  та її похідна. Однак для отримання таким чином  $f(F)$  не можна запропонувати уніфікований метод, а складені залежності є малоінформативними та незручними для практичного використання. Тому запропоновано спрощений підхід до складання закону розподілу навантажень, який полягає в заміні його середнє зваженою сумою декількох нормальних законів.

Шосту групу деталей ПША складають СЕ в'язального механізму складної форми (в'язальні голки та селектори різних позицій), які критеріальні за розмірами [6]. Їх проектування з великим запасом міцності унеможливлено через обмеження розмірів небезпечного перерізу за технологічними вимогами. Для цих деталей доцільні розрахунки на втомленісну міцність по обмеженій, наперед заданій довговічності. Інша відмінність розрахунку полягає в тому, що навантаження цих елементів створює напруження  $\sigma_{ai} < \sigma_{-1D}$  гегациклової ділянки кривої

втомленості, тобто число циклів до втомленісного руйнування перевищує число циклів, яке відповідає точці перегину кривої втомленості в напівлогарифмічних координатах (встановлено за результатами досліджень їх циклічної довговічності). Пропонується попередньо будувати за даними експерименту праву частину кривої втомленості, яка характеризує наробітки СЕ на відмову, а далі обраховувати їх довговічність в залежності від режиму навантаження або розв'язувати обернену задачу - за заданим рівнем довговічності розраховувати конструктивні параметри та режими навантаження деталей.

При проектуванні систем з спадковістю конструкції СЕ пропонується спрощений розрахунок, який базується на рівнянні Веллера за залежністю еквівалентних напружень в небезпечному перерізі СЕ від відповідних розрахункових чисел циклів навантаження до руйнування. Використовуючи сучасні уявлення про втомленісну міцність та довговічність, розроблено основи імовірнісного розрахунку втомленісної довговічності СЕ на основі даних про навантаження і параметри втомленісної міцності з урахуванням їх розсіювання. Результатом розрахунків є функції розподілу довговічності СЕ за втомленісною міцністю при різних значеннях коефіцієнта варіації навантаження ( $v_a = 0,1; 0,15; 0,2$ ) - залежностей квантилі  $u_{p_i}$  в рівномірному масштабі та відповідних ймовірностей руйнування  $P_i$  в масштабі нормального закону розподілу від логарифму втомленісної довговічності  $lgN_{сум_i}$  в числах циклів навантаження до руйнування.

Очевидно, що для підвищення достовірності результатів розрахунків на міцність та надійність доцільно використовувати декілька способів, а на заключній стадії проектування, по можливості, виконувати визначальні випробування.

**Висновки.** В роботі охоплений широкий спектр питань з розрахунків на міцність, довговічність та надійність, які представлені в сучасній теорії та практиці. Запропоновано стратегію вибору методів розрахунку деталей на міцність, довговічність та надійність на основі поділу деталей на певні групи за відповідними ознаками. Практична реалізація методологічного підходу представлена на прикладі деталей ПША, для яких маємо незрівнянно менший об'єм інформації в порівнянні з деталями машин загального призначення. Наведено загальний та спрощений способи визначення щільності розподілу імовірностей неперервної випадкової величини, яка не підпорядковується класичним законам розподілу, та рекомендації до розрахунків на втомленісну міцність по обмеженій, наперед заданій довговічності з напруженнями, що припадають на гегациклову ділянку кривої втомленості.

#### Список використаних джерел:

1. Решетов Д.Н. Надежность машин/ Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высш. шк., 1988. – 238 с
2. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин/ И.А. Бергер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
3. Когаев В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махугов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Трошенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч.1, 2 / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. – К.: Наук. думка, 1987. – 1315 с.
5. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
6. Березін Л. М. Оцінка довговічності та надійності в'язальних механізмів панчішно-шкарпеткових автоматів: монографія. – К.: КНУТД, 2013. – 191 с.
7. Березін Л.М. Визначення втомленісної довговічності деталей критеріальних за розмірами // Вісник ХНУ, 2013, №3. – С.12-15.
8. Методика статистической обработки информации о надежности технических изделий на ЭЦВМ. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 56 с.
9. Методические указания. Методы расчета деталей машин на выносливость в вероятностном аспекте. – М.: Изд. стандартов, 1980. – 42 с.
10. Хазов Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования/ Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. - М.: Машиностроение. – 1986. – 224 с.

#### Рецензенти:

**Зенкін М.А.** Професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки КНУТД, д.т.н., професор

**Місяць В.П.** Професор кафедри Прикладної механіки та машин КНУТД, д.т.н., професор

**Щербань Ю.Ю.**, зав. кафедрою Київського коледжу легкої промисловості, д.т.н., професор

Стаття надійшла до редакції 06.04.2018

УДК 667.64:678.026

М.В. Браїло<sup>1</sup>, А.В. Букетов<sup>1</sup>, С.В. Якущенко<sup>1</sup>, В.М. Яцюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна<sup>2</sup>Науково-дослідний експертно-криміналістичний центр при УМВС України**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНИХ КОМПОЗИТІВ, МОДИФІКОВАНИХ МЕТИЛЕНДИФЕНІЛДИІЗОЦІАНАТОМ**

У роботі наведено дослідження теплофізичних властивостей композитних матеріалів на основі епоксиполіефірного зв'язувача при додаванні модифікатора метилендіфенілдіізоціанату. Встановлено, що оптимальними показниками теплофізичних властивостей характеризується матриця за концентрації модифікатора  $q = 0,25...0,50$  мас.ч. Розроблена епоксиполіефірна матриця з поліпшеними теплофізичними властивостями відзначається підвищенням показників теплостійкості (за Мартенсом) до  $T = 361...362$  К та зниженням лінійної усадки до  $\Delta l = 0,04...0,07$  %. Проаналізовано динаміку зміни показників термічного коефіцієнту лінійного розширення та виявлено їх мінімальні значення. Визначено, що при введенні модифікатора температуру склування підвищується від  $T_c = 318$  К (для вихідної матриці) до  $T_c = 321...323$  К для матеріалів з оптимальною концентрацією модифікатора. Доведено, що наявність модифікатора впливає на теплофізичні властивості досліджуваних композитів.

**Ключові слова:** епоксиполіефірна матриця, метилендіфенілдіізоціанат, композитний матеріал, теплофізичні властивості, теплостійкість, ТКЛР, температура склування.

Н.В. Браило<sup>1</sup>, А.В. Букетов<sup>1</sup>, С.В. Якущенко<sup>1</sup>, В.М. Яцюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина<sup>2</sup>Научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр при УМВД Украины**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТИЛЕНДИФЕНИЛДИИЗОЦИАНАТОМ**

В работе приведены исследования теплофизических свойств композитных материалов на основе эпоксидно-полиэфирного связующего при добавлении модификатора метилендифенилдиизоцианата. Установлено, что оптимальными показателями теплофизических свойств характеризуется матрица при концентрации модификатора  $q = 0,25...0,50$  масс.ч. Разработанная эпоксидно-полиэфирная матрица с улучшенными теплофизическими свойствами отличается повышением показателей теплостойкости (по Мартенсу) до  $T = 361...362$  К и снижением линейной усадки  $\Delta l = 0,04...0,07$  %. Проанализирована динамика изменения показателей термического коэффициента линейного расширения и выявлены их минимальные значения. Определено, что при введении модификатора температура стеклования повышается от  $T_c = 318$  К (для исходной матрицы) до  $T_c = 321...323$  К для материалов с оптимальной концентрацией модификатора. Доказано, что наличие модификатора влияет на теплофизические свойства исследуемых композитов.

**Ключевые слова:** эпоксидно-полиэфирная матрица, метилендифенилдиизоцианат, композитный материал, теплофизические свойства, теплостойкость, ТКЛР, температура стеклования.

M.V. Brailo<sup>1</sup>, A.V. Buketov<sup>1</sup>, S.V. Yakushchenko<sup>1</sup>, V.M. Yatsyuk<sup>2</sup><sup>1</sup>Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine<sup>2</sup>Scientific-Research Criminalistics Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Ternopil, Ukraine**THE INVESTIGATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE EPOXY-POLYETHER COMPOSITES MODIFIED BY METHYLENE DIPHENYL DIISOCYANATE**

In the work the study of the thermophysical properties of composite materials on the basis of the epoxy-polyether binder with the addition of methylene diphenyl diisocyanate modifier is presents. It is found that the matrix is characterized by the optimum values of thermophysical properties at the concentration of the modifier  $q = 0,25...0,50$  mass.fr. The developed epoxy-polyether matrix with improved thermophysical properties is notable by an increase of the heat resistance (by Martens) to  $T = 361...362$  K and a decrease of the linear shrinkage to  $\Delta l = 0,04...0,07$  %. The dynamics of changes in the values of the thermal coefficient of linear expansion is analyzed and their minimum values are revealed. It is determined that at the modifier is added, the glass transition temperature increases from  $T_c = 318$  K (for the original matrix) to  $T_c = 321...323$  K for optimal concentration. It was found that the presence of the modifier influences the thermophysical properties of the investigated composites.

**Keywords:** epoxy-polyether matrix, methylenediphenyldiisocyanate, compositematerials, thermophysical properties, thermal resistance, glass transition temperature, shrinkage, thermal coefficient of linear expansion.

**Постановка проблеми.** З розвитком річкового та морського транспорту значно зріс попит на виробництво полімерних композитних матеріалів (ПКМ) з підвищеними експлуатаційними властивостями [1, 2]. ПКМ широко використовують при суднобудуванні та ремонті суден [3-4]. Композитні матеріали (КМ) на основі епоксидних зв'язувачів використовують для відновлення деталей та механізмів, нанесення захисних покриттів на металеві вироби для збільшення їх

ресурсу роботи [5]. Такого широкого розповсюдження КМ досягли завдяки комплексу притаманних їм властивостей (низька усадка, поліпшені адгезійні властивості, стійкість до механічних навантажень, технологічність, хімічна стійкість). Це дозволило знизити масу деталей та витрати на їх формування, що вигідно з економічної точки зору [6-8]. Прикладом успішного використання КМ у вигляді виробів та як відновлювальний матеріал судових систем та пристроїв є: трубо- та повітропроводи судових систем, захист корпусу судна від корозії, технологічна ізоляція, підшипники ковзання у вузлах тертя та ін. Проте, в деяких випадках застосування епоксидних матеріалів неможливе через недостатню стійкість до високих робочих температур [9]. Суттєва різниця теплового розширення КМ і металевої основи призводить до утворення значних за величиною залишкових напружень, які є причиною розшарування та руйнування покриттів та виробів і, як наслідок, виходу з ладу деталей та механізмів. Тому завдання формування матеріалів з поліпшеними теплофізичними властивостями є актуальним на сьогодні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами [10-12] проведено дослідження теплофізичних властивостей композитів на основі епоксидного зв'язувача. Розглянуто основні фізико-хімічні процеси у зв'язувачі при полімеризації КМ. Досліджено особливості впливу ступеня зшивання матеріалів, зв'язків у просторовій сітці полімеру на теплостійкість, термічний коефіцієнт лінійного розширення, температуру склування. Визначено оптимальні концентрації інгредієнтів композиції для зменшення, описано новітню технологію виробництва та полімеризації, що дозволяє знизити лінійну усадку ПКМ. Значного розповсюдження при створенні КМ з прогнозованими властивостями набула фізична та хімічна модифікація окремих компонентів, поверхнева та структурна (об'ємна) модифікація, введення наповнювачів різної природи, органічне та неорганічне модифікування [11-13]. Автори М.І. Михайлов, У. Jahani [14, 15] об'ємно модифікували КМ шляхом зміни хімічного складу, структури та будови матеріалів. Для цього використовували полімерні компоненти для суміщення при полімеризації та вводили наповнювачі різної дисперсності і природи. У працях [16-18] авторами модифіковано полімерний зв'язувач в результаті введення реакційно здатних компонентів (до яких відносяться полімери різної природи, порошкові та волокнисті наповнювачі), що взаємодіють зі зв'язувачем. Це приводить до підвищення експлуатаційних характеристик КМ. Одним із таких способів, який можна віднести до структурної модифікації, є введення у двокомпонентний зв'язувач модифікатора метилендіфенілдіізоціанату (4,4-MDI). Попередньо проведено дослідження адгезійних та фізико-механічних властивостей досліджуваних матриць [19, 20]. Отримані результати підтвердили доцільність використання 4,4-MDI як модифікатора для епоксидно-поліефірних композитів. Тому, доречно провести дослідження теплофізичних властивостей розроблених КМ, які значно впливають на експлуатаційні характеристики КМ.

**Мета роботи** – дослідити теплофізичні властивості епоксидно-поліефірних композитів, модифікованих метилендіфенілдіізоціанатом.

**Матеріали та методика дослідження.** При формуванні матриць для КМ з поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями використовували наступні компоненти.

1. Епоксидіановий олігомер ЕД-20 (ГОСТ 10587-84) ( $q = 100$  мас.ч.).
2. Ортофталева дициклопентадієнова (DCPD) ненасичена передприскорена поліефірна смола ENYDYNE H 68372 TAE –  $q = 10$  мас.ч. (вміст вказано на 100 мас.ч. епоксидної смоли), яка містить інгібітор для попередження миттєвої полімеризації (час гелеутворення  $\tau = 20 \dots 24$  хв). Слід зазначити, що при реакції сополімеризації композицій ненасичених поліефірів з неграничними мономерними з'єднаннями в присутності ініціаторів виділяється значна кількість тепла, тому реакція є екзотермічною.
3. Твердник холодного тверднення поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78)  $q = 10$  мас.ч. (вміст вказано на 100 мас.ч. епоксидної смоли).
4. Ініціатор для поліефірних смол Butanox-M50 –  $q = 1,5$  мас.ч., що є перекисом метилетилкетону (МЕКП), і містить низьку кількість води та мінімальну кількість полярних з'єднань, порівняно з етиленгліколем.
5. Модифікатор тривимірного зшивання метилендіфенілдіізоціанат, широко відомий як pure MDI (4,4-MDI).

Матриці були сформовані за температури зшивання  $T = 393 \pm 2$  К.

Метилендіфенілдіізоціанат є ароматичним діізоціанатом, який використовують для тривимірного зшивання полімерів при виготовленні поліуретану. Хімічна формула:  $\text{CH}_2(\text{C}_6\text{H}_4\text{NCO})_2$ , молярна маса – 250 g/mol, густина – 1,18 g/cm<sup>3</sup>.

З метою визначення оптимального співвідношення між концентрацією модифікатора 4,4-MDI та вмістом компаунду досліджували наступні теплофізичні властивості КМ: теплостійкість (за Мартенсом), термічний коефіцієнт лінійного розширення, температуру склування, лінійну усадку. Співвідношення концентрації модифікатора 4,4-MDI змінювали у межах:  $q = (0...2,5)$  мас.ч. на 100 мас.ч. компаунду. Концентрацію твердників у композиціях та температуру зшивання встановлено відповідно до попередніх результатів дослідження.

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно ГОСТу 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю  $v = 3$  К/хв під дією постійного згинаючого навантаження  $F = 5 \pm 0,5$  МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ( $h = 6$  мм).

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) зразків розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження:  $65 \times 12 \times 12$  мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразків з точністю  $\pm 0,01$  мм. Швидкість нагрівання становила  $v = 2$  К/хв.

Затверджували матеріали за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $t = 12,0 \pm 0,1$  h за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/мін до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання зразків при даній температурі впродовж часу  $t = 2,0 \pm 0,05$  h, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $t = 24$  h на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Дослідження теплостійкості ( $T$ ) отриманих епокси-поліефірних КМ за різної концентрації модифікатора метилендіфенілдіізоціанату наведено на рис. 1 (крива 1). Виявлено збільшення теплостійкості від  $T = 352$  К до  $T = 360...362$  К (порівняно з матрицею) при введенні модифікатора у кількості  $q = 0,25...0,50$  мас.ч. Очевидно, що наявні ізоціанатні групи модифікатора взаємодіють із залишковими аміно-, гідрокси- та карбокси-групами двокомпонентного епокси-поліефірного зв'язувача, що підвищує показники теплофізичних властивостей. Надалі показники теплостійкості монотонно зменшувались при збільшенні концентрації модифікатора в досліджуваному діапазоні концентрацій ( $q = 0,50...1,50$  мас.ч.). За концентрації  $q = 1,50$  мас.ч. показники теплостійкості становили  $T = 354$  К, що майже еквівалентно показникам немодифікованої матриці. При подальшому збільшенні концентрації модифікатора понад  $q = 1,5$  мас.ч. встановлено монотонне зниження показників теплостійкості до  $T = 347$  К (за максимальної концентрації  $q = 2,50$  мас.ч.). Це може бути результатом зменшення кількості хімічних зв'язків на одиницю об'єму полімеру між епоксидними та карбоксильними групами зв'язувача і функціональними групами ( $-NCO$ ) 4,4-MDI. Отже, встановлено, що максимальними показниками теплостійкості (за Мартенсом) характеризуються КМ із вмістом метилендіфенілдіізоціанату у кількості  $q = 0,25...0,50$  мас.ч.

Водночас, визначили лінійну усадку досліджуваних полімерних композитів. Слід зазначити, що показники лінійної усадки (рис. 1, крива 2) змінювались асиметрично показникам теплостійкості на досліджуваному діапазоні. Визначено, що за концентрації модифікатора  $q = 0,25...0,50$  мас.ч. показники лінійної усадки мінімальні ( $\Delta l = 0,04...0,07$  %). Значення  $\Delta l$  порівняно з матрицею ( $\Delta l = 0,06$  %) майже не змінились. За концентрацій  $q = 1,50$  мас.ч. та  $q = 2,50$  мас.ч. показники лінійної усадки становили  $\Delta l = 0,13$  % та  $\Delta l = 0,17$  % відповідно (рис. 1, крива 2, табл. 1). Позаяк, концентрації зв'язувача і твердників не змінювались, вважали, що підвищення концентрації модифікатора призводить до збільшення лінійної усадки та зниження теплостійкості КМ. Це є наслідком надмірної кількості  $-NCO$  в об'ємі зв'язувача, що збільшує рухливість полімерних ланцюгів та знижує жорсткість матеріалу.

За результатами експериментальних випробувань теплостійкості та лінійної усадки визначено, що оптимальними показниками зазначених властивостей характеризуються досліджувані зразки композитів за діапазону концентрацій модифікатора 4,4-MDI:  $q = 0,25...0,50$  мас.ч.



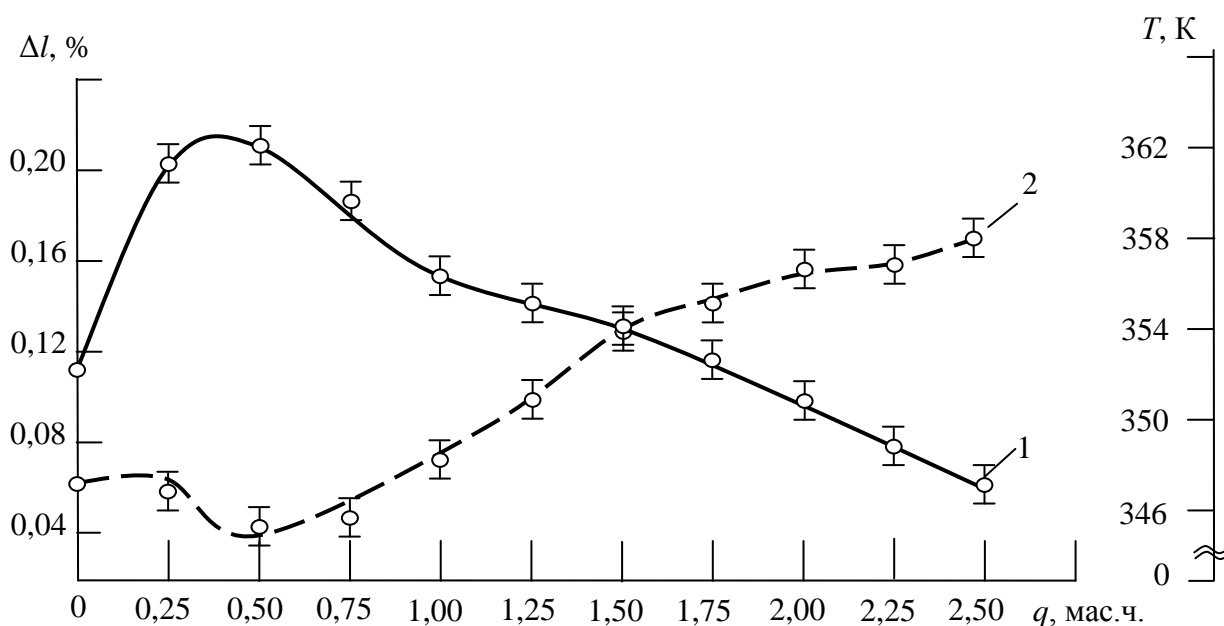


Рис. 1. Залежність теплофізичних властивостей епокси-поліефірних КМ від концентрації модифікатора 4,4-MDI: 1 – теплостійкість (за Мартенсом) ( $T$ ); 2 – лінійна усадка ( $\Delta l$ ), %.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики КМ за різної концентрації модифікатора 4,4-MDI

№	Вміст модифікатора, $q$ , мас.ч.	Теплостійкість, $T$ , К	Температура склування, $T_c$ , К	Ділянка склування, $\Delta T$ , К	Усадка, $\Delta l$ , %
1	–	352	318	310...355	0,06
2	0,25	361	321	310...355	0,07
3	0,50	362	323	309...342	0,04
4	1,50	354	319	305...333	0,13
5	2,50	347	315	305...333	0,17

На наступному етапі досліджували термічний коефіцієнт лінійного розширення розроблених епокси-поліефірних матеріалів та їх температуру склування ( $T_c$ ), які є важливими теплофізичними характеристиками при експлуатації полімерних виробів [21].  $T_c$  визначали за допомогою дилатометричних кривих, які ілюструють залежність відносної лінійної деформації від температури (рис. 3). Встановлено особливості теплового розширення досліджуваних зразків за концентрації модифікатора  $q = 0,25 \dots 2,50$  мас.ч. в наступних температурних діапазонах: 1 –  $\Delta T = 303 \dots 323$  К; 2 –  $\Delta T = 303 \dots 373$  К; 3 –  $\Delta T = 303 \dots 423$  К; 4 –  $\Delta T = 303 \dots 473$  К (рис. 2, табл. 2). Для вихідної матриці отримали показники ТКЛР:  $\Delta T = 303 \dots 323$  К –  $\alpha = 1,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 373$  К –  $\alpha = 2,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 423$  К –  $\alpha = 3,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 473$  К –  $\alpha = 8,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Визначені значення характеризують матрицю, як таку, що має незначні показники ТКЛР [21]. Виявлено, що мінімальними значеннями ТКЛР в діапазоні  $\Delta T = 303 \dots 323$  К характеризується КМ із концентрацією модифікатора  $q = 2,50$  мас.ч. ( $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ). Аналогічно спостерігали зниження показників ТКЛР на досліджуваних діапазонах 2 –  $\Delta T = 303 \dots 373$  К; 3 –  $\Delta T = 303 \dots 423$  К та 4 –  $\Delta T = 303 \dots 473$  К (табл. 2). Проте значення температури склування за цієї концентрації мінімальне і становить  $T_c = 315$  К. Оскільки температура склування визначає верхній допустимий інтервал робочих температур, то значення ТКЛР за цієї концентрації не враховували при визначенні мінімальних показників. При зниженні  $T_c$  теплофізичні властивості КМ погіршуються та, як наслідок, знижуються експлуатаційні характеристики виробів.

За концентрації модифікатора метилендіфенілдіізоціанату у кількості  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч. спостерігали наступну динаміку показників ТКЛР:  $\Delta T = 303 \dots 323$  К –  $\alpha = 1,6 \dots 2,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 373$  К –  $\alpha = 2,3 \dots 2,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 423$  К –  $\alpha = 4,2 \dots 4,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 473$  К –

$\alpha = 9,0 \dots 9,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . При збільшенні концентрації 4,4-MDI до  $q = 1,50$  мас.ч. спостерігали підвищення показників ТКЛР на всіх досліджуваних температурних діапазонах:  $\Delta T = 303 \dots 323 \text{ K} - \alpha = 1,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 373 \text{ K} - \alpha = 2,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 423 \text{ K} - \alpha = 5,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 473 \text{ K} - \alpha = 9,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Аналіз значень температурного коефіцієнту лінійного розширення показує, що його залежність від температури нелінійна. Встановлено, що мінімальними значеннями характеризується епокси-поліефірний композит за концентрації модифікатора  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч.

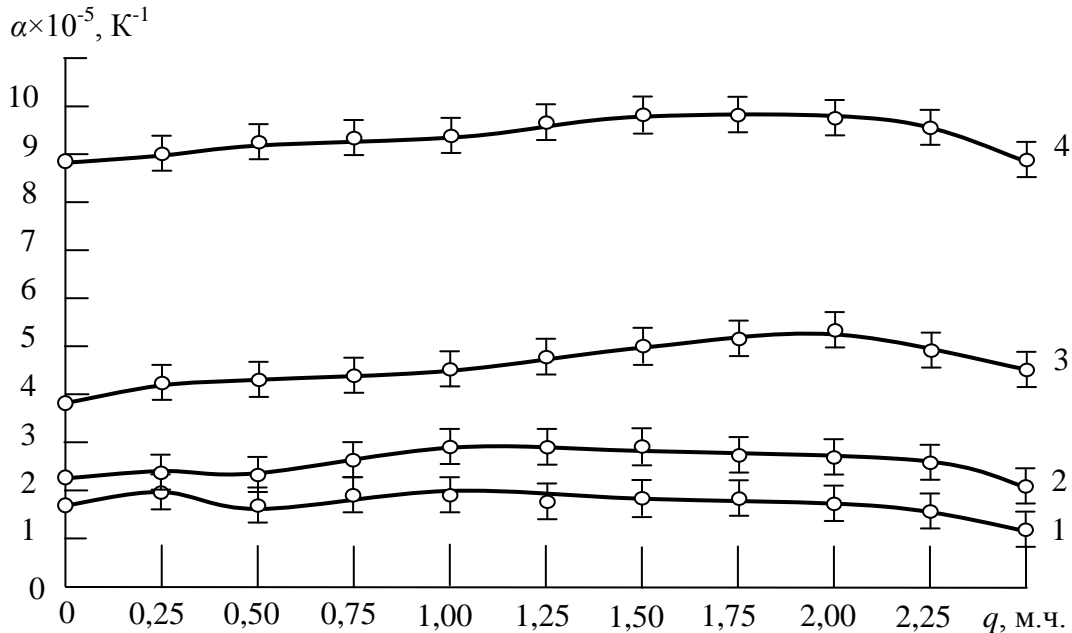


Рис. 2. Залежність термічного коефіцієнта лінійного розширення від концентрації модифікатора при різних температурних діапазонах: 1 –  $\Delta T = (303 \dots 323) \text{ K}$ ; 2 –  $\Delta T = (303 \dots 373) \text{ K}$ ; 3 –  $\Delta T = (303 \dots 423) \text{ K}$ ; 4 –  $\Delta T = (303 \dots 473) \text{ K}$ .

Надалі аналіз дилатометричних кривих дозволив визначити температуру склування досліджуваних КМ. Встановлено (табл. 1), що температура склування вихідної полімерної матриці становить  $T_c = 318 \text{ K}$ . Для КМ із вмістом 4,4-MDI у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. спостерігали підвищення температури склування до  $T_c = 321 \text{ K}$  (рис. 3, табл. 1). Збільшення кількості модифікатора до  $q = 0,50$  мас.ч. забезпечує підвищення  $T_c$  КМ до  $T_c = 323 \text{ K}$  (табл. 1). Виявлено, що при подальшому збільшенні концентрації метилендіфенілдіізоціанату у КМ до  $q = 1,50$  мас.ч. забезпечує формування КМ, температура склування якого знижується до  $T_c = 319 \text{ K}$ . Показники ТКЛР, як зазначено вище, також знижуються за даної концентрації добавки. Отже, КМ характеризується незначною кількістю фізико-хімічних зв'язків між двокомпонентним зв'язувачем та модифікатором у просторовій сітці полімеру та зниженим ступенем зшивання матриці.

Таблиця 2

Залежність термічного коефіцієнта лінійного розширення КМ від концентрації модифікатора при різних температурних діапазонах

Концентрація 4,4-MDI, q, мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$			
	Температурні діапазони випробування $\Delta T, \text{ K}$			
	303...323	303...373	303...423	303...473
0	1,7	2,2	3,8	8,9
0,25	2,0	2,4	4,2	9,0
0,5	1,6	2,3	4,3	9,2
1,5	1,8	2,7	5,0	9,7
2,5	1,2	2,1	4,5	8,8

Враховуючи у комплексі результати досліджень теплостійкості, лінійної усадки, термічного коефіцієнту лінійного розширення та температури склування слід зазначити наступне. Отримані результати дослідження дилатометричних кривих узгоджуються з показниками ТКЛР та мають оптимальні значення за концентрації модифікатора  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч. Динаміка показників лінійної усадки та теплостійкості (за Мартенсом) аналогічна показникам ТКЛР та температури склування. Отже, оптимальна концентрація 4,4–MDI для досліджуваних епокси-поліефірних композитів становить  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч. Слід зазначити, що отримані результати дослідження теплофізичних властивостей корелюють з попередньо проведеними випробуваннями адгезійних та фізико-механічних властивостей КМ.

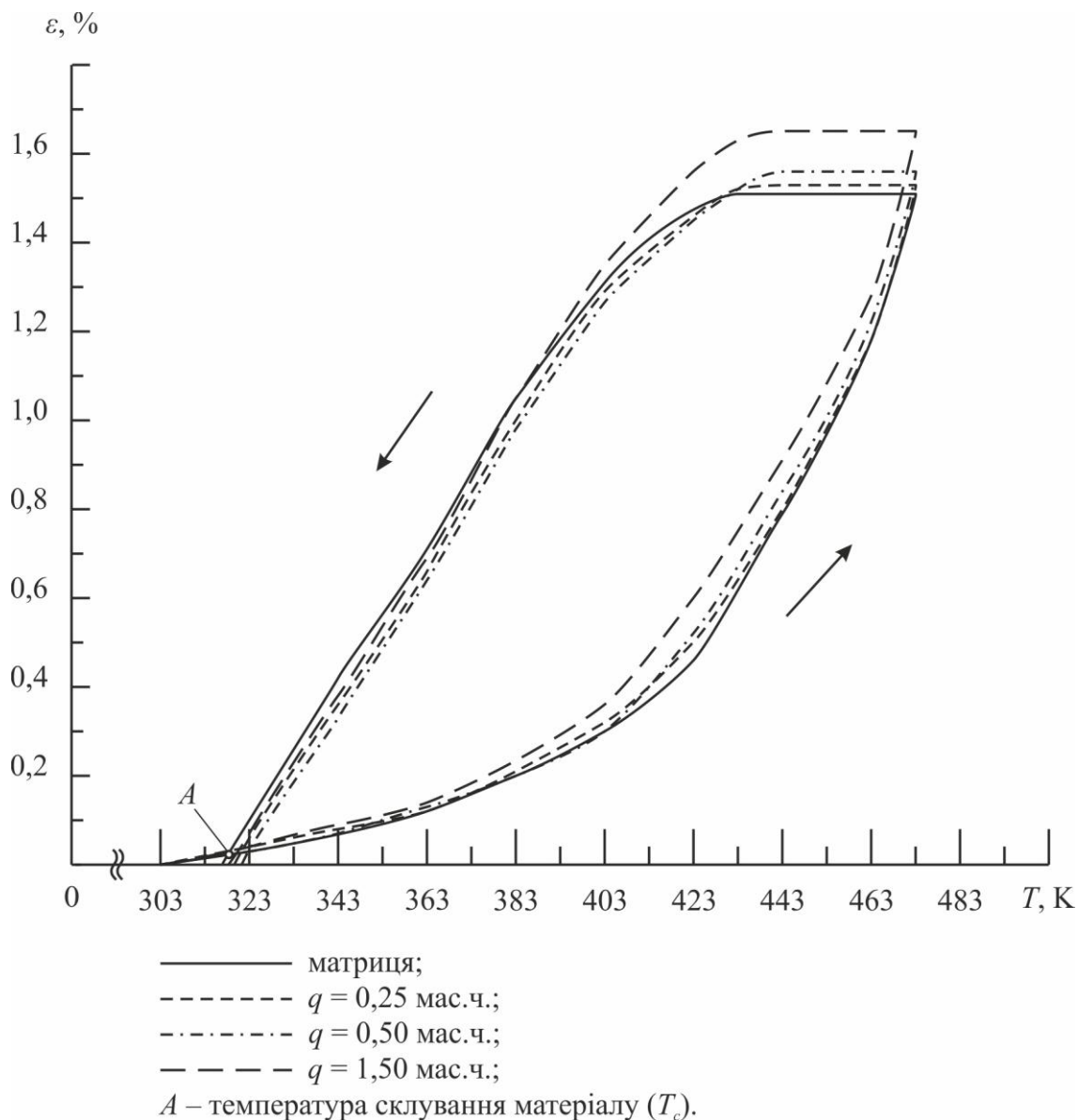


Рис. 3. Дилатометричні криві епокси-поліефірних КМ зарізної концентрації модифікатора

**Висновки.** Досліджено теплофізичні властивості епокси-поліефірних композитних матеріалів за різної концентрації модифікатора метилендіфенілдіізоціанату. Визначено концентрацію модифікатора, за якої отримані оптимальні показники теплофізичних властивостей. А саме: введення модифікатора у двокомпонентний зв'язувач у кількості  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч. приводить до зниження лінійної усадки досліджуваних матеріалів від  $\Delta l = 0,06$  % до  $\Delta l = 0,04 \dots 0,07$  % та підвищення теплостійкості від  $T = 352$  К до  $T = 360 \dots 362$  К (порівняно з матрицею); значення показників термічного коефіцієнту лінійного розширення знижуються, порівняно з показниками ТКЛР вихідної матриці, на всіх досліджуваних діапазонах; мінімальні

значення показників ТКЛР отримали за концентрації модифікатора у кількості  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч.:  $\Delta T = 303 \dots 323 \text{ K} - \alpha = 1,6 \dots 2,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 373 \text{ K} - \alpha = 2,3 \dots 2,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 423 \text{ K} - \alpha = 4,2 \dots 4,3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 303 \dots 473 \text{ K} - \alpha = 9,0 \dots 9,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ; встановлено, що температура склування розроблених композитних матеріалів підвищується від  $T_c = 318 \text{ K}$  до  $T_c = 321 \dots 323 \text{ K}$  за даної концентрації 4,4-MDI. Це зумовлено збільшенням фізико-хімічних зв'язків між двокомпонентним зв'язувачем та модифікатором у просторовій сітці полімеру та підвищенням ступеня зшивання модифікованої матриці порівняно з вихідною.

### Список використаної літератури

1. Soares C. G. et al. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere // Corrosion Science. – 2009. – Т. 51. – №. 9. – С. 2014-2026.
2. Wirsching P. H., Ferencic J., Thayamballi A. Reliability with respect to ultimate strength of a corroding ship hull // Marine Structures. – 1997. – Т. 10. – №. 7. – С. 501-518.
3. Soares C. G., Garbatov Y. Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non-linear corrosion and compressive loads // Marine Structures. – 1999. – Т. 12. – №. 6. – С. 425-445.
4. Toh W. et al. A comprehensive study on composite risers: Material solution, local end fitting design and global response // Marine Structures. – 2018. – Т. 61. – С. 155-169.
5. Selvaraju S., Ilaiyavel S. Applications of composites in marine industry // J. Eng. Res. Stud., II. – 2011. – С. 89-91.
6. Singh A. A. M. M. et al. Evaluation of mechanical behavior of multifilament discarded fishnet/glass fiber and polyester composites for marine applications // Marine Structures. – 2018. – Т. 58. – С. 361-366.
7. Raj F. M., Nagarajan V. A., Vinod Kumar K. P. Evaluation of mechanical behavior of multifilament waste fish net/glass fiber in polyester matrix for the application of mechanized boat deckhouse in marine composites // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, 2014. – Т. 592. – С. 2639-2644.
8. Stewart R. Better boat building—trend to closed-mould processing continues // Reinforced Plastics. – 2011. – Т. 55. – №. 6. – С. 30-36.
9. Chawla, KrishanKumar. Composite materials: science and engineering / Krishan K. Chawla. – 2nd ed. – SpringerNewYork, 1998. – 483 p.
10. Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/Epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes / J. Cha, G.H. Jun, J.K. Park et al. // Composites Part B: Engineering. – 2017. – Vol. 129. – pp. 169-179.
11. Buketov A.V. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites / A.V. Buketov, O.O. Saponov, M.V. Brailo, V.L. Aleksenko // Materials Science. – Vol. 49, Issue 5. – 2014. – P.696-701.
12. Букетов А., Стухляк П., Редько О. Теплофізичні властивості епоксикомполімерів, наповнених мінеральними відходами промислового виробництва // Машинознавство. – 2010. – №. 3-4. – С. 53-58.
13. Віленський В.О., Демченко В.Л. Вплив природи дисперсних наповнювачів на структуру, теплофізичні властивості та електропровідність композитів на основі епоксидної смоли. – 2008. – Т. 30. – №2. С. 131-138.
14. Михайлов М. И., Карпов А. А., Плескачевский Ю. М. Исследование влияния компонентов композиционного материала на основе эпокси-полиэфирных смол на его свойства // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2008. – №. 3-4 (35).
15. Jahani, Y. and Ehsani, M. (2009), The rheological modification of talc-filled polypropylene by epoxy-polyester hybrid resin and its effect on morphology, crystallinity, and mechanical properties. Polym Eng Sci, 49: 619-629.
16. Gagani A., Krauklis A., Echtermeyer A. T. Anisotropic fluid diffusion in carbon fiber reinforced composite rods: Experimental, analytical and numerical study // Marine Structures. – 2018. – Т. 59. – С. 47-59.
17. Abouzahr S., Wilkes G.L. Structure property studies of polyester- and polyether-based MDI-BD segmented polyurethanes: Effect of one- vs. two-stage polymerization conditions / S. Abouzahr, G.L. Wilkes, // J. Appl. Polym. Sci. – 1984. – Vol. 29. – Issue 9. – pp. 2695-2711.
18. Wang H. Mechanical properties of poly(lactic acid) and wheat starch blends with methylene diphenyl diisocyanate / H. Wang, X. Sun, P. Seib. // J. Appl. Polym. Sci. – 2002. – Vol. 84. – pp. 1257-1262.
19. Браїло М.В. Застосування методу планування експерименту при формуванні полімерного композиту з поліпшеними експлуатаційними характеристиками для його використання у засобах транспорту / М.В. Браїло, А.В. Букетов, С.В. Якущенко, Л. Далебова // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ. – Випуск 60. – 2017. – С. 58-68.
20. Букетов А.В. Дослідження адгезійних та фізико-механічних властивостей епокси-поліефірного матриці модифікованої метилендіфенілдіізоціанатом / А.В. Букетов, М.В. Браїло, С.В. Якущенко, В.М. Яцюк, М.Ю. Амелін // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті) [«Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»], (Тернопіль 22 – 24 травня 2018 року). – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – С. 31.
21. Buketov A. Investigation of thermophysical properties of epoxy nanocomposites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Saponov, M. Brailo, O. Leshchenko, L. Bencheikh and A. Menou // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2016. – Vol. 628. – Issue – 1. – pp. 167-179.

Стаття надійшла до редакції 19.06.2018

УДК 667.64:678.026

А.В. Букетов<sup>1</sup>, А.Г. Кулініч<sup>1</sup>, В.М. Гусев<sup>1</sup>, С.О. Сметанкін<sup>1</sup>, В.М. Яцюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Херсонська державна морська академія, Україна<sup>2</sup>Науково-дослідний експертно-криміналістичний центр при УМВС України в Тернопільській області**ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ 4-АМІНОБЕНЗОЙНОЮ КИСЛОТОЮ ПОЛІМЕРНИХ КОМПЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Важливим фактором підвищення ефективності розвитку сучасної техніки є використання полімерних композитних матеріалів, які за своїми експлуатаційними характеристиками у більшості випадків є кращими порівняно з традиційними металами та сплавами. При цьому фізична модифікація полімерних матеріалів дає змогу створювати композитні матеріали із заданим комплексом властивостей. Проаналізовано вплив модифікатора 4-амінобензойної кислоти на адгезійні властивості полімерних композитних матеріалів на основі епоксидного олігомеру. Експериментально встановлено, що максимальні значення адгезійної міцності композиційних матеріалів при відриві від сталеві основи марки Ст3 отримано за вмісту модифікатора у кількості  $q = 0,10$  мас.ч. та  $q = 1,00$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20. Отримані результати свідчать про підвищення ступеня гелеутворення у матриці при введенні модифікатора за оптимального вмісту за рахунок наявності у структурі добавки активних функціональних груп, які здатні до хімічної взаємодії з функціональними групами епоксидної смоли. Це у свою чергу забезпечує підвищення адгезійної міцності модифікованої матриці порівняно з вихідною.

**Ключові слова:** матриця, епоксидні полімери, модифікатор, адгезійна міцність, залишкові напруження.

А.В. Букетов<sup>1</sup>, А.Г. Кулініч<sup>1</sup>, В.Н. Гусев<sup>1</sup>, С.А. Сметанкін<sup>1</sup>, В.Н. Яцюк<sup>2</sup><sup>1</sup>Херсонская государственная морская академия, Украина<sup>2</sup>Научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр при УМВД Украины в Тернопольской области**ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ 4-АМИНОБЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТОЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Важным фактором повышения эффективности развития современной техники является использование полимерных композитных материалов, которые по своим эксплуатационным характеристикам в большинстве случаев являются лучшими по сравнению с традиционными металлами и сплавами. При этом физическая модификация полимерных материалов позволяет создавать композитные материалы с заданным комплексом свойств. Проанализировано влияние модификатора 4-аминобензойной кислоты на адгезионные свойства полимерных композитных материалов на основе эпоксидного олигомера. Экспериментально установлено, что максимальные значения адгезионной прочности композиционных материалов при отрыве от стальной основы марки Ст3 получено при содержании модификатора в количестве  $q = 0,10$  масс.ч. и  $q = 1,00$  масс.ч. на 100 масс.ч. олигомера ЭД-20. Полученные результаты свидетельствуют о повышении степени гелеобразования в матрице при введении модификатора при оптимальном содержании за счет наличия в структуре добавки активных функциональных групп, которые способны к химическому взаимодействию с функциональными группами эпоксидной смолы. Это в свою очередь обеспечивает повышение адгезионной прочности модифицированной матрицы по сравнению с исходной.

**Ключевые слова:** матрица, эпоксидные полимеры, модификатор, адгезионная прочность, остаточные напряжения.

A.V. Buketov<sup>1</sup>, A.G. Kulinich<sup>1</sup>, V.M. Gusev<sup>1</sup>, S.A. Smetankin<sup>1</sup>, V.M. Yatsyuk<sup>2</sup><sup>1</sup>Kherson State Maritime Academy, Ukraine<sup>2</sup>Scientific-Research Criminalistic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Ternopil Region, Ukraine**RESEARCH OF ADHESION PROPERTIES OF MODIFIED 4-AMINOBENZOIC ACID POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

**Annotation.** An important factor in improving the efficiency of the development of modern technology is the use of polymer composite materials, which in their performance characteristics in most cases are better than traditional metals and alloys. In this case, the physical modification of polymeric materials allows the creation of composite materials with a given set of properties. The effect of the 4-aminobenzoic acid modifier on the adhesion properties of polymeric composite materials based on an epoxy oligomer is analyzed. It was experimentally established that the maximum values of the adhesive strength of composite materials, when separated from the steel base of St3 grade, were obtained with a modifier content of  $q = 0.10$  mass parts and  $q = 1.00$  parts by weight by 100 parts by mass oligomer ED-20. The obtained results indicate an increase in the degree of gelation in the matrix when the modifier is introduced at the optimum content due to the presence of active functional groups in the structure of the additive that are capable of chemical interaction with the functional groups of the epoxy resin. This, in turn, provides an increase in the adhesive strength of the modified matrix as compared to the initial one.

**Key words:** matrix, epoxy polymers, modifier, adhesion strength, residual stresses.

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток науки і технологій вимагає створення нових матеріалів з комплексом спеціальних властивостей. Серед таких матеріалів підвищену увагу привертають полімери, оскільки на їх основі відносно технологічно нескладно з незначними витратами можна створювати необхідні матеріали з наперед заданими властивостями. Це дасть змогу задовольнити потреби промисловості в нових матеріалах.

Підґрунтям для отримання сучасних полімерних композитних матеріалів (КМ) є результати досліджень, що спрямовані на створення наукових основ технології одержання наповнених полімерів. Основними напрямками таких досліджень є: вивчення адгезії полімерів до наповнювачів, поверхневих явищ на межі поділу фаз «полімер – наповнювач»; дослідження взаємодії полімеру й наповнювача, яка визначає механізм зміцнювання і умови, за яких реалізується оптимальний комплекс фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей наповнених полімерів [1, 2].

Найкраще змочування полімерами твердих тіл буде мати місце за умови сильної адсорбційної взаємодії полімеру й наповнювача чи основи, за якої сили взаємодії на межі поділу фаз мали би змогу розгорнути полімерну молекулу. Отже, вибір способу модифікації поверхні наповнювача повинен передбачати забезпечення міцного зв'язку полімерних молекул з поверхнею наповнювача. Зміцнення взаємодії поверхні твердого тіла з полімером можна досягти різними шляхами, з яких найбільше значення має поверхнева хімічна модифікація наповнювача або фізична модифікація зв'язувача органічними та неорганічними добавками. Має місце також хімічне щеплення полімеру до неорганічної поверхні [1, 2].

Відомо [1-12], що одним з основних класів матеріалів, які відповідають жорстким, часто суперечливим вимогам, таким як забезпечення мінімальної маси конструкцій, максимальної міцності, жорсткості, надійності, довговічності при роботі у важких умовах навантаження, при високих температурах і в агресивних середовищах є полімерні КМ.

Розвиток технології формування полімерних КМ на сьогодні визначається науковими дослідженнями в області полімерного матеріалознавства, оскільки проблема взаємодії модифікаторів, наповнювачів та зв'язувачів дуже багатогранна.

Полімери і модифіковані матеріали на їх основі знайшли широке використання як конструкційні матеріали. До таких матеріалів ставлять підвищені вимоги щодо їх фізико-механічних властивостей, які насамперед залежать від надмолекулярної структури. Адгезія полімеру до поверхні наповнювача чи основи є одним з основних факторів, які визначають фізико-механічні властивості наповнених систем.

Низькомолекулярний епоксидний олігомер марки ЕД-20 характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою в процесі твердіння і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Це дозволяє широко використовувати його в машино-та суднобудуванні, інших галузях промисловості.

Вводячи добавки до епоксидних смол, можна отримати епоксидні композиції, що мають різноманітні властивості. Застосування КМ на основі епоксидних смол передбачає направлене і наперед задане регулювання експлуатаційних характеристик гетерогенних систем науково-обґрунтованим введенням структурно-активних модифікаторів та наповнювачів [3]. У цьому плані перспективним є використання модифікатора 4-амінобензойної кислоти для поліпшення фізико-механічних властивостей КМ на основі епоксидного олігомеру.

**Мета роботи** – дослідити адгезійну міцність епоксидної матриці, яка модифікована 4-амінобензойною кислотою, до сталюї основи марки Ст 3.

**Матеріали та методика дослідження.** Виходячи з наведеного вище, як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Структурна формула і модель епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 наведена на рис. 1. Як модифікатор використано 4-амінобензойну кислоту. Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас.ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Формула 4-амінобензойної кислоти має вигляд  $C_7H_7NO_2$ . Структурну формулу і модель модифікатора наведено на рис. 2.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Структурну формулу і модель фрагменту твердника ПЕПА наведено на рис. 3. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення

оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

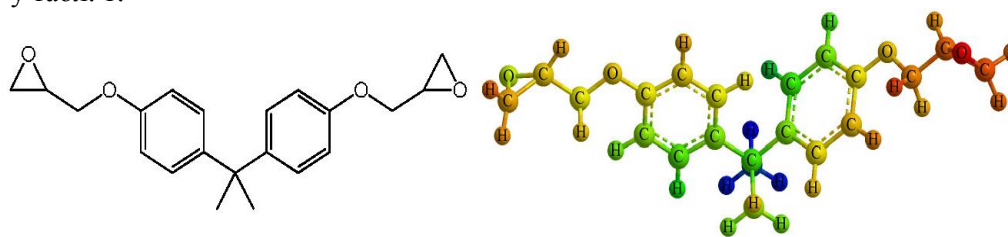


Рис. 1. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [4]

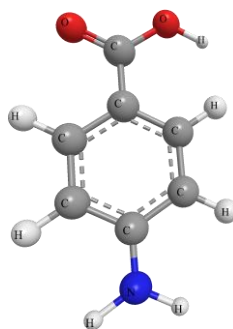


Рис. 2. Структурна формула фрагменту модифікатора 4-амінобензойної кислоти ( $C_7H_7NO_2$ )

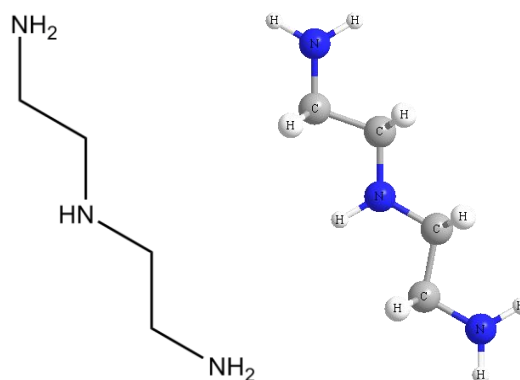


Рис. 3. Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [4]

Таблиця 1.

Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД-20	Модифікатор 4-амінобензойна кислота ( $C_7H_7NO_2$ )	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	137,14	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–
Середня функціональність за епоксидними групами, $f_n$	2,0	–	–
Вміст вуглецю, %	–	61,31	–
Вміст водню, %	–	5,14	–
Вміст азоту, %	–	10,21	19,5...22,0
Вміст кисню, %	–	23,33	–
В'язкість, $\eta$ , Па·с	13...20	–	0,9
Густина, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,16	1,37	1,05



Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Адгезійну міцність матриці до металевію основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склесних зразків згідно ГОСТ 14760-69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759-69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 за швидкості навантаження  $v = 10$  м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив  $d = 25$  мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [5]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,8$  мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина  $l = 100$  мм, робоча довжина  $l_0 = 80$  мм, товщина  $\delta = 0,3$  мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Експериментально встановлено, що адгезійна міцність модифікованої епоксидної матриці при відриві становить  $\sigma_a = 24,8$  МПа, адгезійна міцність при зсуві  $\tau = 8,5$  МПа, а залишкові напруження  $\sigma_3 = 1,4$  МПа (рис. 4).

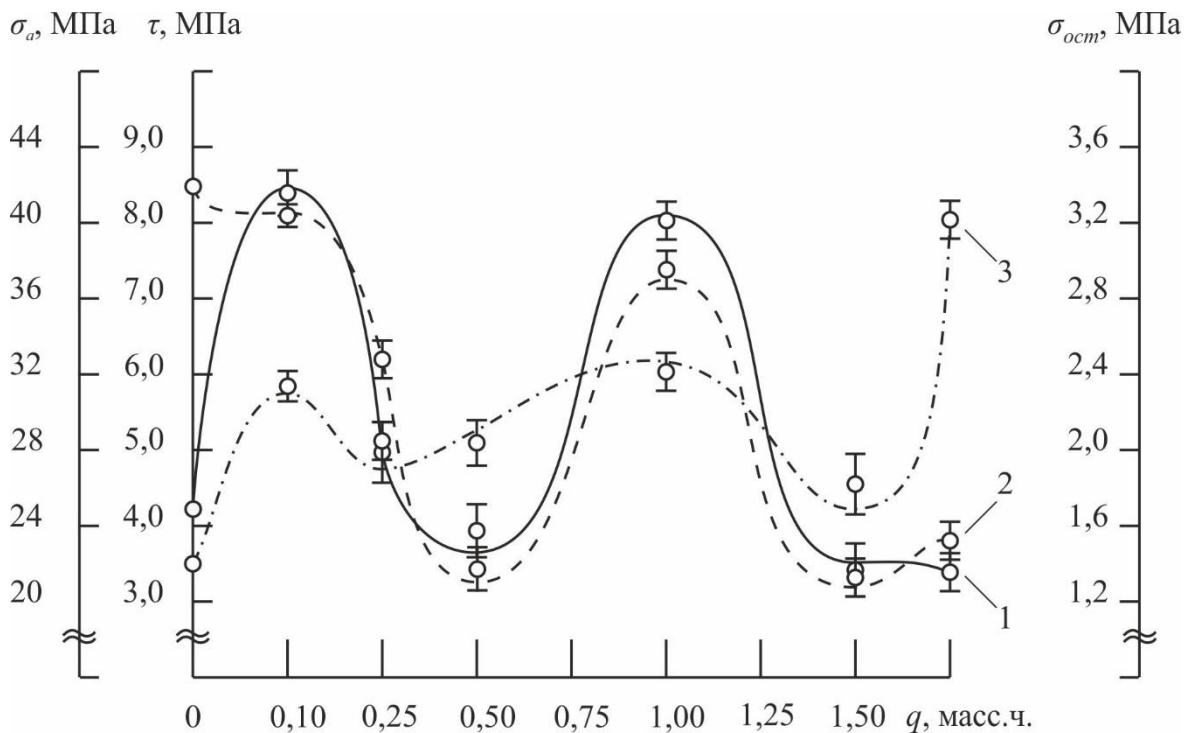


Рис. 4. Залежність адгезійної міцності та залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти ( $C_7H_7NO_2$ ):  
1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ );  
3 – залишкові напруження ( $\sigma_3$ ). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Доведено, що введення модифікатора 4-амінобензойної кислоти в епоксидний олігомер ЕД-20 приводить до зміни адгезійних властивостей досліджуваних матеріалів. Зокрема (рис. 4, крива

1), при введенні модифікатора  $C_7H_7NO_2$  за вмісту  $q = 0,10$  мас.ч. у епоксидний олігомер спостерігали максимальне збільшення показників адгезійної міцності при відриві досліджуваних КМ порівняно з матрицею, попередньо обробленою ультразвуком. У цьому випадку формуються КМ, які мають адгезійну міцність  $-\sigma_a = 41,8$  МПа. Вважали, що отриманні результати дають змогу стверджувати про суттєву фізичну взаємодію полімеру та модифікатора, що свідчить про міцний зв'язок молекул полімеру з поверхнею основи. При введенні 4-амінобензойної кислоти у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. та  $q = 0,50$  мас.ч. значення адгезійної міцності знижуються до  $\sigma_a = 27,8$  МПа та  $\sigma_a = 22,6$  МПа відповідно, але знаходяться у межах показників епоксидної матриці. Наступне збільшення вмісту модифікатора  $C_7H_7NO_2$  до  $q = 1,00$  мас.ч. спричиняє появу на кривій залежності адгезійної міцності при відриві від вмісту модифікатора другого піка. У цьому випадку формується КМ, що відзначається адгезійною міцністю  $-\sigma_a = 40,4$  МПа. Отримані результати дозволяють констатувати, що за даного вмісту модифікатора у КМ відбуваються фізико-хімічні процеси активації міжфазової взаємодії при структуроутворенні полімеру у присутності добавки. При подальшому збільшенні кількості модифікатора 4-амінобензойної кислоти в епоксидному олігомері ( $q = 1,50$  мас.ч. та  $q = 2,00$  мас.ч.) виявлено значне зниження адгезійної міцності при відриві ( $\sigma_a = 20,5$  МПа та  $\sigma_a = 21,3$  МПа відповідно). Відповідно до отриманих результатів адгезійної міцності при відриві епоксидної матриці від сталеві основи марки Ст 3 можна стверджувати, що у КМ формуються елементи надмолекулярних утворень з дефектною структурою, а це, у свою чергу, показує на перенасичення вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти у матеріалах.

Аналіз кривої залежності адгезійної міцності при зсуві епоксидної матриці від сталеві основи марки Ст 3 (рис. 4, крива 2) дає можливість відзначити, що при введенні модифікатора відбувається погіршення адгезійної міцності при зсуві. Однак, слід зазначити, що за вмісту модифікатора  $q = 0,10$  мас.ч. зниження показників є несуттєвим, причому міцність становить  $\tau = 8,2$  МПа (значення адгезійної міцності при зсуві епоксидної матриці  $-\tau = 8,5$  МПа). Також незначне зниження можна відмітити при введенні у олігомер 4-амінобензойної кислоти у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. та  $q = 1,00$  мас.ч. Показники адгезійної міцності при зсуві знижуються до  $\tau = 6,2$  МПа та  $\tau = 7,2$  МПа відповідно. Вважали, що за вмісту модифікатора у кількості  $q = 0,10$  мас.ч.,  $q = 0,25$  мас.ч. та  $q = 1,00$  мас.ч. активуються фізико-хімічні процеси структуроутворення КМ. Суттєве зниження результатів отримано при кількості модифікатора  $C_7H_7NO_2$   $q = 0,50$  мас.ч.,  $q = 1,50$  мас.ч. та  $q = 2,00$  мас.ч. Зокрема, за вмісту модифікатора  $q = 0,50$  мас.ч. адгезійна міцність при зсуві становить  $-\tau = 3,3$  МПа, за вмісту  $q = 1,50$  мас.ч.  $-\tau = 3,2$  МПа та за вмісту  $q = 2,00$  мас.ч.  $-\tau = 3,8$  МПа. Наведені результати адгезійної міцності КМ за вмісту модифікатора у кількості  $q = 1,50$  мас.ч. та  $q = 2,00$  мас.ч. дають змогу припустити про недоцільність введення у епоксидний зв'язувач модифікатора понад вмісту  $q = 1,00$  мас.ч. Необхідно відзначити, що найвищі показники адгезійної міцності при зсуві та максимальні результати адгезійної міцності при відриві було отримано для КМ за вмісту модифікатора 4-амінобензойної кислоти у кількості  $q = 0,10$  мас.ч. та  $q = 1,00$  мас.ч.

На наступному етапі досліджено залишкові напруження у КМ за різного вмісту модифікатора (рис. 4, крива 3). Порівнюючи результати дослідження впливу вмісту модифікатора на адгезійну міцність при відриві та зсуві й залишкові напруження, визначили, що отримані дані корелюють між собою. При збільшенні адгезійної міцності КМ залишкові напруження у матеріалах, в основному, також зростають. Експериментально встановлено, що епоксидна матриця, попередньо оброблена ультразвуком, має залишкові напруження  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Введення модифікатора  $C_7H_7NO_2$  забезпечує утворення композитів, які мають залишкові напруження, абсолютні значення яких знаходяться у межах  $\sigma_3 = 1,7 \dots 3,2$  МПа залежно від вмісту добавки. Зниження залишкових напружень на межі поділу фаз є критерієм збільшення довговічності захисних покриттів. Однак, зростання залишкових напружень є показником підвищення когезійних характеристик епоксикомпозитних покриттів за рахунок покращення структуроутворення на межі поділу фаз. Відомо [11, 12], що кінетика зміни залишкових напружень на межі поділу фаз показує, що природа модифікатора та його кількісний вміст значно впливають на фізико-хімічні процеси при формуванні композитів.

**Висновки.** На підставі результатів експериментальних досліджень можна зазначити, що аналіз процесів формування композитних матеріалів дає можливість встановити оптимальний вміст модифікатора 4-амінобензойної кислоти ( $C_7H_7NO_2$ ) у епоксидних композитах з підвищеними адгезійними властивостями до сталеві основи марки Ст 3, який складає  $q = 0,10$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомера ЕД-20. За такого вмісту модифікатора формується матеріал з такими

показниками властивостей: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 41,8$  МПа; адгезійна міцність при зсуві –  $\tau = 8,2$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 2,3$  МПа.

Введення оптимального вмісту модифікатора забезпечує утворення максимальної кількості фізичних і хімічних зв'язків між макромолекулами добавки та олігомером, а також між зв'язувачем і металевою основою.

### Література

1. Спорягін Е.О. Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів: навч. посіб. / Е.О. Спорягін, К.Є. Варлан. – Д.: Вид-во ДНУ, 2012.
2. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 232 с.
3. Мартинюк М.І., Сіренко Г.О., Бойко Л.Я. Епоксидні смоли і композиційні матеріали на їх основі (огляд) // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. – Випуск XVIII. – 2014. – С. 115-132.
4. Букетов А.В. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтилфосфата / А.В. Букетов, А.В.Акимов, Д.А. Зинченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – №5. – С. 126-134.
5. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий [Текст] / М.И.Корякина. – М.:Химия, 1988. – 272 с.
6. Стухляк П.Д. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості [Текст] / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, О.Г. Редько. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
7. Тхір І.Г. Фізико-хімія полімерів: навч. посібник [Текст] / І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький. – Львів: Вид. нац. універ. "Львівська політехніка", 2005. – 240 с.
8. Методы исследования структуры и свойств полимеров: Учеб. пособие / И.Ю. Аверко-Антонович, Р.Т. Бикмуллин. – Казань: КГТУ, 2002. – 604 с.
9. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
10. Стухляк П.Д., Добротвор І.Г., Сорівка І.Т., Карташов В.В., Вербицький О.І. Дослідження і моделювання залежностей залишкових напружень епоксикомпозитних покриттів від вмісту дисперсних часток // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2012. – №2 (7). – С. 217-222.
11. Букетов А.В., Левицький В.В. Оптимізація складу інгредієнтів адгезійного шару для епоксикомпозитних багат шарових покриттів // Вісник Житомирського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2008. – №4 (47). – С. 8-14.
12. Букетов А.В., Сапронов О.О., Яцюк В.М. Дослідження властивостей і структури нанокompозитних епоксидних матеріалів // Вісник Житомирського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 20013. – №3 (66). – С. 8-19.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2018

УДК 629.113

**В.П. Волков, В.М. Павленко***Харківський національний автомобільно-дорожній університет***ПРИНЦИП СТВОРЕННЯ БАЗИ ЗНАТЬ ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЛЕГКОВИХ  
АВТОМОБІЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОНТОЛОГІЙ**

*Був проведений аналіз використання бази знань та методи створення бази знань з використанням відповідного програмного забезпечення. Дистанційний контроль технічного стану транспортних засобів з використанням бази знань, дозволить оптимізувати технічне регламентне обслуговування автомобілів, скоротити час очікування на обслуговування транспортного засобу, запобігти більшій частині несправностей, які можуть виникати на дорозі і забезпечити виконання екологічних норм.*

*Ключові слова: автомобіль, технічне обслуговування, база знань, онтологія, програма, класи.*

**В.П. Волков, В.Н. Павленко****ПРИНЦИП СОЗДАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЛЕГКОВЫХ  
АВТОМОБИЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОНТОЛОГИЙ**

*Был проведен анализ использования базы знаний и методы создания базы знаний с использованием соответствующего программного обеспечения. Дистанционный контроль технического состояния транспортных средств с использованием базы знаний, позволит оптимизировать техническое регламентное обслуживание автомобилей, сократить время ожидания обслуживания транспортного средства, предотвратить большей части неисправностей, которые могут возникать на дороге и обеспечить выполнение экологических норм.*

*Ключевые слова: автомобиль, техническое обслуживание, база знаний, онтология, программа, классы.*

**V. Volkov, V. Pavlenko****THE PRINCIPLE OF CREATING A KNOWLEDGE BASE FOR SERVICING CARS WITH  
ONTOLOGIES**

*An analysis was made of the use of the knowledge base and methods for creating a knowledge base using appropriate software. Remote monitoring of the technical condition of vehicles using the knowledge base will allow to optimize technical routine maintenance of vehicles, reduce waiting time for servicing the vehicle, prevent most of the malfunctions that can occur on the road and ensure compliance with environmental standards.*

*Keywords: car, maintenance, knowledge base, ontology, program, classes.*

**Постановка проблеми.** Сучасний автомобіль являє собою досить складний електротехнічний комплекс, в якому відбуваються процеси передачі та обробки електротехнічної інформації. Технологічна недосконалість, застосовуваної елементної бази, призводить до появи відмов, а отже до необхідності своєчасного діагностування при організації технічного обслуговування. Організація діагностики всього електронного обладнання автомобіля в нашій країні ще тільки розвивається [1, 2].

Сервісне обслуговування в автоцентрах в даний час здійснюється на спеціальних діагностичних постах, де використовується досить складне і дороге діагностичне обладнання. Такий спосіб обслуговування призводить до появи черг та супутніх до цього проблем. Вирішення цих проблем можливе шляхом створення нової технології сервісного обслуговування, сенс якої полягає в розробці комплексу дистанційної діагностики електронних систем автомобіля.

Застосування сучасних інформаційних технологій з використанням Bluetooth – комунікацій або Internet доступом дає можливість створювати досить надійні і працездатні діагностичні комплекси. Підвищення оперативності технічного обслуговування вирішує й інше завдання організації роботи великого автоцентру – визначення номенклатури та кількості запасних частин для ремонту.

Дистанційний контроль технічного стану транспортних засобів дозволить оптимізувати технічне регламентне обслуговування автомобілів, скоротити час очікування на обслуговування транспортного засобу, запобігти більшу частину несправностей, які можуть виникати на дорозі і забезпечити виконання екологічних норм в масштабах регіону.

У зв'язку з цим **метою роботи** є визначення шляхів підвищення якості технічного обслуговування легкових автомобілів з урахуванням інформаційних, інтелектуальних та телематичних технологій за допомогою онтологій.

**Результати досліджень.** Як приклад виконання онтологічного аналізу за допомогою редактора онтологій Protégé 4.3 розглянута предметна область «Діагностування автомобіля».

Версія 4.3 Protégé дозволяє побудувати онтологію для семантичної мережі на OWL (Web Ontology Language) [3].

Перед створенням онтології необхідно налаштувати відображення у вікні програми необхідних вкладок (рис. 1).

Призначення вкладок:

- Active Ontology – відображення IRI, загальних характеристик (кількості аксіом, класів, властивостей, об'єктів і т.п.) і анотації онтології;
- Classes – перегляд і редагування класів;
- Object Properties – перегляд і редагування властивостей-відносин між індивідами;
- Data Properties – перегляд і редагування властивостей-даних індивідів;
- Individuals by class – перегляд і редагування примірників класів (індивідів);
- OWLVis і OntoGraf – візуалізація онтології у вигляді графа;
- SPARQL Query – виконання запитів.

Насамперед при створенні онтології необхідно створити класи. Всі спроектовані нами класи будуть відображатися у вікні Class hierarchy [4].

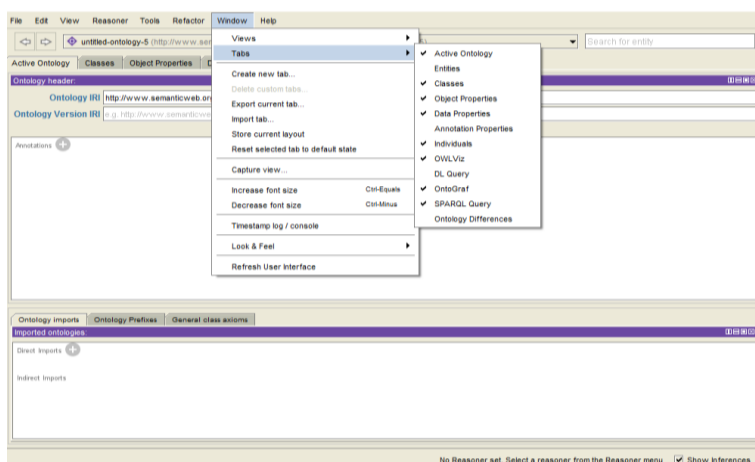


Рис. 1. Вибір вкладок

Класи – абстрактні групи, колекції або набори об'єктів. Вони можуть включати в себе екземпляри, інші класи, або ж поєднання і того, і іншого. Класи описують поняття предметної області.

Основними поняттями даної предметної області є (рис. 2):

- транспортний засіб (ТЗ) – головний клас;
- водій – клас, що містить інформацію про людину-власника ТЗ;
- дорога – клас, що містить інформацію про місце знаходження ТЗ;
- станція технічного обслуговування (СТО) – клас, що містить інформацію про найближче місце для обслуговування ТЗ.

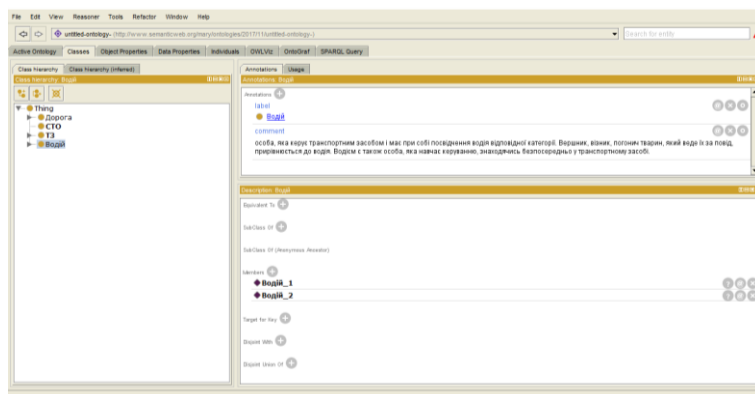


Рис. 2. Класи предметної області

Робимо опис класів предметної області. Далі створюємо підкласи даної предметної області (рис. 3)

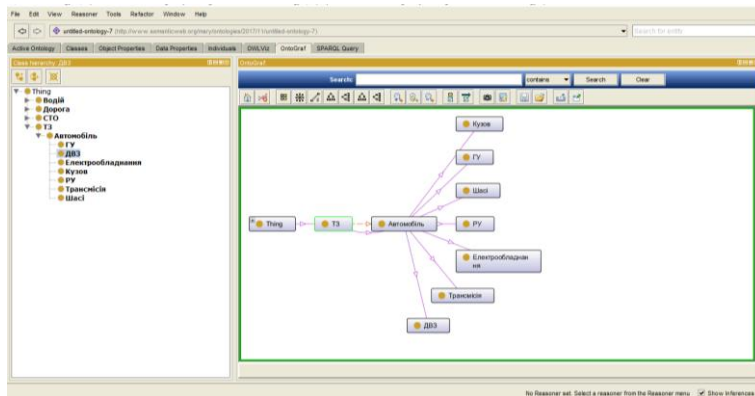


Рис. 3. Підкласи предметної області

На прикладі більш детально розглянемо підклас – гальмівного керування (рис. 4).

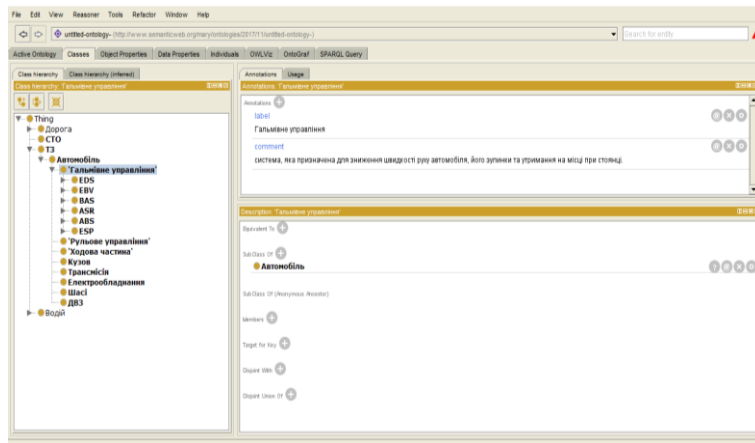


Рис. 4. Розклад підкласу «гальмівне керування»

Об'єкти в онтології можуть мати атрибути. Кожен атрибут має принаймні ім'я та значення і використовується для зберігання інформації, яка специфічна для об'єкта і прив'язана до нього.

Важлива роль атрибутів полягає в тому, щоб визначити відносини (залежно) між об'єктами онтології. Зазвичай ставленням є атрибут, значенням якого є інший об'єкт (рис. 5).

Властивості класів і їх примірників (предикати RDF-трійок) діляться на два види:

–властивості-відносини задаються на вкладці «Object Properties» і визначають деякі відносини між двома індивідами (екземплярами класів), тобто суб'єктом і об'єктом RDF-трійки будуть індивіди;

–властивості-дані задаються на вкладці «Data Properties» і визначають деякі фактичні характеристики індивідів (примірників класів), тобто суб'єктом RDF-трійки буде індивід, а об'єктом значення характеристики у вигляді рядка, числа, дати і т.п.

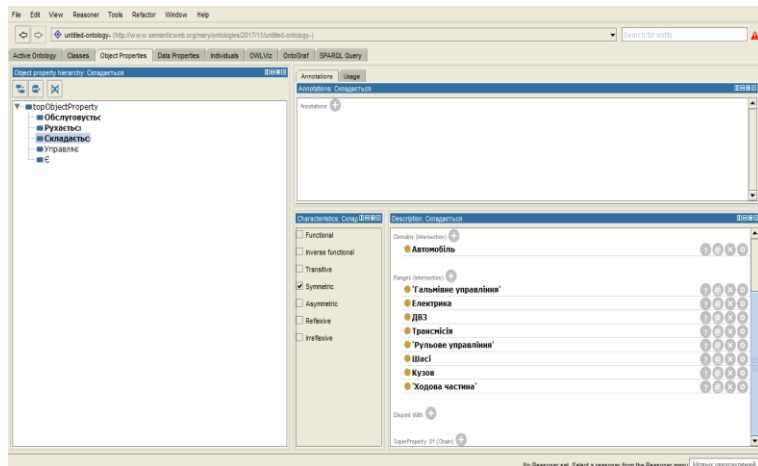


Рис. 5. Відносини класів предметної області

Домен (англ. Domain) вказує, екземпляри яких класів в RDF-трійці при використанні даного властивості будуть виступати в якості суб'єктів, а діапазон (англ. Range) – в якості об'єктів.

На панелі «Характеристики» (англ. Characteristics) вибираються додаткові показники якості: транзитивність (англ. Transitive), симетричність (англ. Symmetric), рефлексивність (англ. Reflexive) і т.п.

Створення та редагування властивостей-даних виконується на вкладці «Data Properties» (рис. 6).

Створюємо екземпляри і заповнюємо значення атрибутів екземплярів (рис. 7).

Примірники (англ. Instances) або індивіди (англ. Individuals) – це основні, ніжчеуровневі компоненти онтології. Примірники можуть являти собою як фізичні об'єкти (люди, будинки, планети), так і абстрактні (числа, слова). Онтологія може обійтися і без конкретних об'єктів [5]. Однак, однією з головних цілей онтології є класифікація таких об'єктів, тому вони також включаються. Створення індивідів в Protégé відбувається у вкладці Individuals.

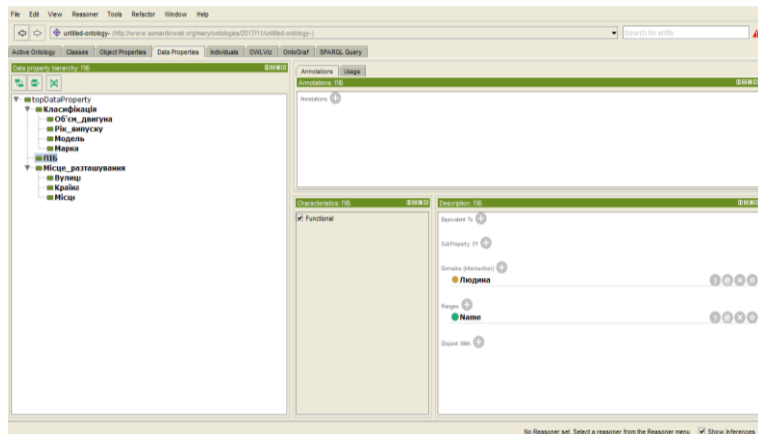


Рис. 6. Заповнення даних предметної області

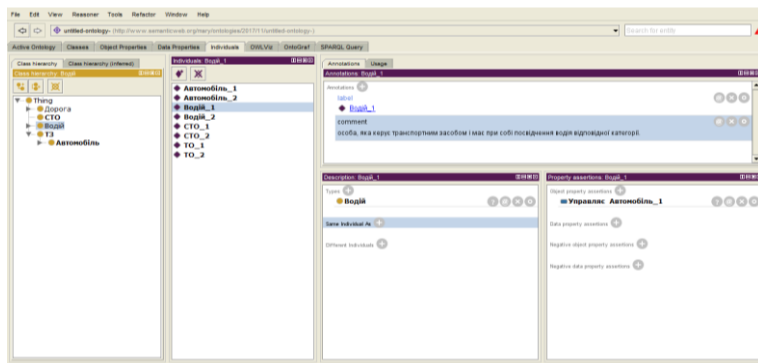


Рис. 7. Заповнюємо значення атрибутів



Автоматична побудова і відображення графа онтології і взаємозв'язків між класами виконується при виборі вкладки «OntoGraf» (рис. 8)

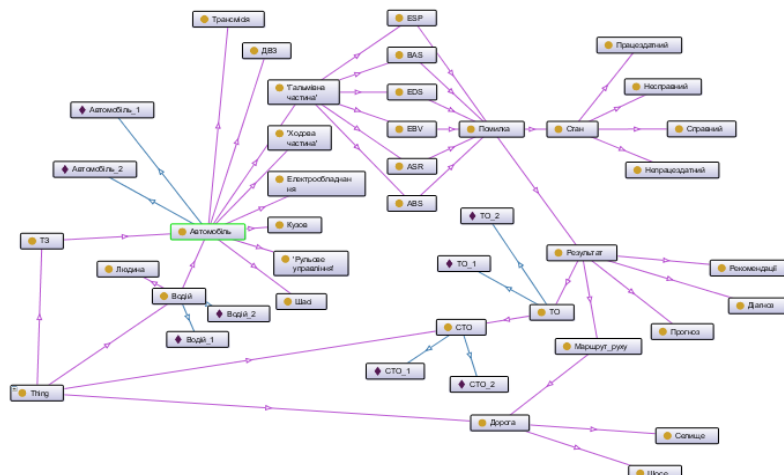


Рис. 8. Графічне відображення онтології

Розглянемо основні поняття стану транспортного засобу.

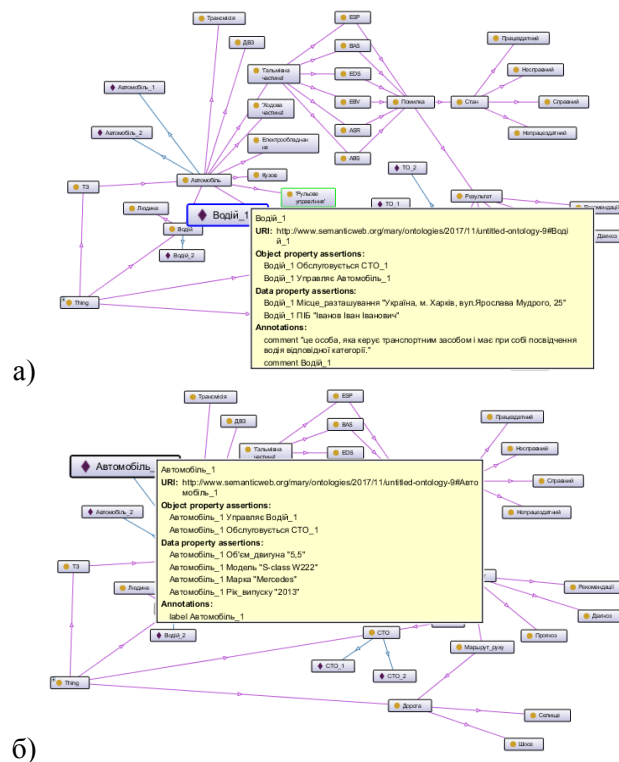
Працездатний стан (працездатність) – стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

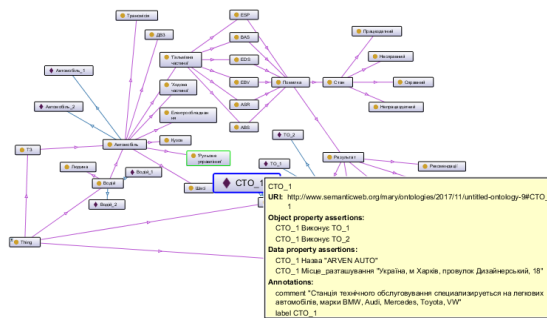
Непрацездатний стан (непрацездатність) – стан об'єкта, при якому значення хоча б одного параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Несправний стан (несправність) – стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Справний стан (справність) – стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Пошук інформації за розробленою предметною онтологією (рис. 9)





в)

Рис. 9. Пошук інформації: а) «Водій\_1», б) «Автомобіль\_1» та в) «СТО\_1»

Для заповнення даної онтології необхідний детальний опис гальмівної системи, коди помилок, несправності та рекомендації, щодо обслуговування даної системи.

**Висновки.** Використання методів аналізу та обробки діагностичних показників для створення бази знань та створення відповідного програмного забезпечення дасть можливість створити єдину базу знань для автомобільного транспорту.

Бази знань з постійним використанням дистанційного контролю технічного стану транспортних засобів, дозволить оптимізувати технічне обслуговування автомобілів, скоротити час очікування на обслуговування та запобігти виникненню супутніх несправностей, які можуть виникати на дорозі.

### Література

1. Интеллектуальные транспортные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://m2m-t.ru/solutions/its/> – Загл. с экрана.
2. Ощепкова Е. А. Информационные технологии на автомобильном транспорте / Е. А. Ощепкова // Кемерово: КузГТУ, 2012. – 144 с.
3. Онтологічний інжиніринг знань в системі Protégé [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/243.pdf>
4. Технологія створення web-проєкту [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://info-pages.com.ua/e/43>
5. Кучуганов В.Н. Система визуального проектирования баз знаний / Кучуганов В.Н., Габдрахманов И.Н.: Информационные технологии, 2001. – С. 140-143.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 53.082.36:531.755

**А.Я. Ганзюк, О.І. Стремецький***Хмельницький національний університет, Україна***ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО - АДСОРБЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САПОНІТОВИХ ГЛИН, МОДИФІКОВАНИХ АМІНАМИ**

*З метою збільшення сорбційної здатності сапонітових глин проведено модифікацію їх поверхні з використанням аліфатичних і ароматичних амінів. Утворений органо-неорганічний сорбційний матеріал на основі сапоніту, і модифікований саме етилендіаміном показав найвищі результати сорбційної здатності по відношенню до барвників як катіонного, так і аніонного типів. Досліджено параметри пористої структури природного і модифікованого амінами сапоніту методом низькотемпературної адсорбції/десорбції азоту:  $S_{\text{нпт}}$  за БЕТ природного сапоніту дорівнює  $47 \text{ м}^2/\text{г}$ , а модифікованого етилендіаміном -  $66 \text{ м}^2/\text{г}$ , об'єм пор зменшується від  $0,1336$  до  $0,1103 \text{ см}^3/\text{г}$ , і, їх діаметр відповідно від  $55,99$  до  $33,29 \text{ А}^\circ$ . Проведені дослідження фізико-хімічних та адсорбційних властивостей природних і модифікованих форм сапонітових глин показали доцільність його застосування в якості сорбенту для очищення стічних вод від органічних сполук, а саме барвників катіонного та аніонного типів. При цьому його перевагами є дешевизна, доступність, нескладна технологія модифікування, висока вибірковість, можливість проведення простої та ефективної регенерації.*

*Ключові слова:* глинистий мінерал, аміни, інфрачервона спектроскопія, структурно-адсорбційні характеристики, барвники.

**A. Hanyuk, O. Stremetsky****THE STUDY OF STRUCTURAL AND ADSORPTION CHARACTERISTICS OF SAPONITE GLINES MODIFIED BY AMINES**

*In order to increase the sorption capacity of saponite clays the modification of their surface has been carried out using aliphatic and aromatic amines. An organo-inorganic sorption material was created on the basis of the saponite. Modified by the ethylenediamine it showed the highest level of sorption ability in relation to dyes of cationic and anionic types. Using the method of low-temperature adsorption/desorption of nitrogen the parameters of the porous structure of natural and modified saponite amines have been analysed. As a result  $S$  of BET of a natural saponite is  $47 \text{ m}^2 / \text{g}$ , and modified by the ethylene diamine -  $66 \text{ m}^2 / \text{g}$ , pore volume decreases from  $0.1336$  to  $0.1103 \text{ cm}^3 / \text{g}$ , and their diameter fluctuates from  $55.99$  to  $33.29, \text{ A}^\circ$  respectively. Studies of physicochemical and adsorption properties of natural and modified forms of saponite clays have shown the feasibility of its use as a sorbent for purifying sewage from organic compounds, namely dye carriers of cationic and anionic types. Its advantages are cheapness, affordability, simple technology of modification, high selectivity, and the possibility of simple and efficient regeneration.*

*Key words:* clay minerals, amines, infrared spectroscopy, structural-adsorption characteristics, dyes.

**А.Я. Ганзюк, А.И. Стремецкий****ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-АДСОРБЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САПОНИТОВЫХ ГЛИН, МОДИФИЦИРОВАННЫХ АМИНАМИ**

*С целью увеличения сорбционной способности сапонитовых глин проведена модификация их поверхности с использованием алифатических и ароматических аминов. Образованный органо-неорганический сорбционный материал на основе сапонита, и модифицированный именно этилендиаминном показал высокие результаты сорбционной способности по отношению к красителям как катионного, так и анионного типов. Исследованы параметры пористой структуры природного и модифицированного аминами сапонита методом низкотемпературной адсорбции/десорбции азота: Суд.по БЭТ природного сапонита равна  $47 \text{ м}^2/\text{г}$ , а модифицированного этилендиаминном -  $66 \text{ м}^2/\text{г}$ , объем пор уменьшается от  $0,1336$  до  $0,1103 \text{ см}^3/\text{г}$ , и их диаметр соответственно от  $55,99$  до  $33,29 \text{ А}^\circ$ . Проведенные исследования физико-химических и адсорбционных свойств природных и модифицированных форм сапонитовых глин показали целесообразность его применения в качестве сорбента для очистки сточных вод от органических соединений, а именно красителей катионного и анионного типов. При этом его преимуществами являются дешевизна, доступность, несложная технология модифицирования, высокая избирательность, возможность проведения простой и эффективной регенерации.*

*Ключевые слова:* глинистый минерал, амины, инфракрасная спектроскопия, структурно-адсорбционные характеристики, красители.

В умовах зростаючої уваги до питань здоров'я та екології все більш актуальною стає проблема збереження навколишнього середовища, а також його відновлення на основі широкомасштабного використання дешевої, доступної, ефективної та екологічно чистої сировини, яка сприяє поглинанню різних шкідливих і токсичних речовин, а також може бути використана як ефективний сорбційний матеріал для виведення радіонуклідів і токсинів з організму. Одним з таких природних утворень є сапонітові глини Ташківського родовища, до хімічного складу яких входять (мас. %) :  $\text{SiO}_2$ -52,594;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -17,007;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -14,978;  $\text{MgO}$ -9,301;  $\text{CaO}$ -3,767;  $\text{TiO}_2$ -1,639;  $\text{MnO}_2$ -0,349;  $\text{SO}_2$ -0,156;  $\text{V}_2\text{O}_5$ -0,126;  $\text{CuO}$ -0,0328;  $\text{ZnO}$ -0,0263;  $\text{ZrO}_2$ -0,0188 [15].

Саме тому актуальним є використання природних сорбентів, які здатні приймати участь в очищенні забруднених вод від колоїдно-, молекулярно- і йонно- розчинених речовин. Практично ми маємо на місцевому рівні величезні поклади природних мінералів з високими сорбційними, іонообмінними, каталітичними і фільтраційними властивостями [2-4].

**Мета роботи** – вивчення доцільності використання ароматичних і аліфатичних амінів у якості модифікаторів поверхні сапонітових глин з метою збільшення їх сорбційної здатності.

**Об'єктом дослідження** є процес формування пористої структури природного глинистого матеріалу до та після його модифікації амінами.

**Предметом дослідження** є глинистий мінерал сапоніт Ташківського родовища Хмельницької області.

#### Матеріали та методи

##### Зразки сапоніту

Сапоніт готували шляхом дроблення кускового природного мінералу в фарфоровій ступці, просіювали через сито з розмірами комірки 0,2 мм із нержавіючої сталі. Природний сапоніт у вигляді порошку зберігали при нормальній температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  і відносній вологості  $\varphi = 65\%$ . Модифікацію сапонітів, в основі якої лежить принцип іонного обміну проводили таким чином: 0,6 г аміну змішували з 0,6 мл концентрованої хлоридної кислоти (37%) і 20 мл води. Отриманий розчин добавляли до 50 мл водної суспензії, яка містила 1,5 г природного глинистого мінералу. Концентрація амінів в даному розчині була менша за наважку мінералу в 2,5 рази. Отриману суміш ретельно перемішували при  $80^\circ\text{C}$ . Через 1 год осад відфільтровували і багаторазово промивали холодною і гарячою водою, а потім висушували. Також у роботі використовувались ароматичні (дифеніламін) і аліфатичні (диетиламін, етилендіамін) аміни.

Дифеніламін ((N-феніл)-анілін) – вторинний ароматичний амін, речовина з формулою  $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{NH}$ , молярна маса якого дорівнює 169,23 г/моль. Безбарвні кристали, що темніють на світлі; температура плавлення від  $54^\circ\text{C}$  до  $55^\circ\text{C}$ , температура кипіння  $302^\circ\text{C}$ . Легко розчинний у діетиловому ефірі, бензолі, ацетоні, чотирихлористому вуглеці, не розчинний у холодній воді. Розчинність при  $25^\circ\text{C}$  в 100 г етанолу – 44 г, метанолу – 57,5 г, води – 0,03 г.

Етилендіамін ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{-NH}_2$ ) – рідина без кольору з запахом аміаку, випаровується при контакті з вологим повітрям.  $t_{\text{кип}} = 116,5^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{пл}} = 8,5^\circ\text{C}$ , щільність  $0,899 \text{ г/см}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ); етилендіамін добре розчиняється у воді (з розігріванням розчину), етанолі, гірше – в ефірі, розчиняється в бензолі та інших вуглеводнях. Є сильним лугом.

Диетиламін ( $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH}$ ) – вторинний амін, похідне аміаку, в молекулі якого два атоми водню заміщені метильними радикалами. Газ з різким неприємним запахом, легко зріджується при охолодженні в безбарвну рідину.

Для вивчення кінетики сорбції та процесів адсорбції сапоніту у природному і модифікованому видах використано наступні класи барвників: метиленовий блакитний, що носять катіонний характер, і добре асоційований барвник прямий яскраво-оранжевий. Формули барвників наведено на рисунках 1 та 2:

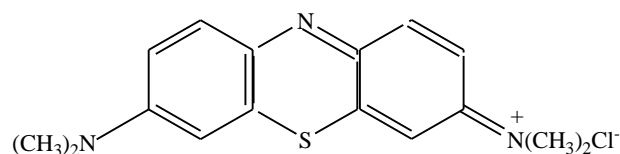


Рис. 1. – Структурна формула метиленового блакитного

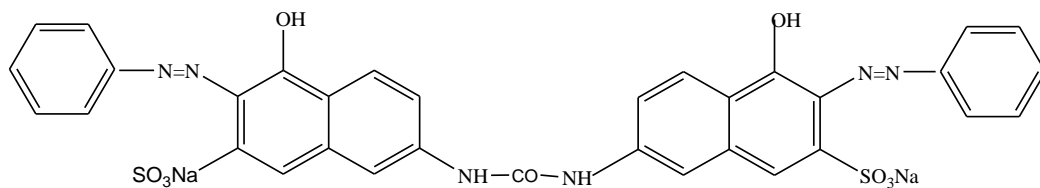


Рис. 2 – Структурна формула прямого яскраво-оранжевого

### Скануюча електронна мікроскопія (SEM)

Структуру і морфологію поверхні природного і модифікованого зразків сапоніту було досліджено за допомогою скануючої електронної мікроскопії з сфокусованим іонним променем (SEM / FIB Quanta 200 3D FEG).

### Рентгенофлуоресцентна спектроскопія

Елементний склад природного сапоніту досліджували на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі CEP-01, за допомогою аналізатора EXPERT 3L. Розшифровка спектрів здійснювалась в програмі Elva X 2.9.5.

### Метод низькотемпературної адсорбції азоту

Параметри пористої структури - питома поверхня(S), загальний об'єм ( $V_{total}$ ), об'єм мікропор ( $V_{mic}$ ) та мезопор ( $V_{mes}$ ), діаметр пор (D), розподіл пор за розмірами сапонітових глин встановлено на основі отриманих ізотерм низькотемпературної (77K) адсорбції/десорбції парів азоту. Дослідження адсорбції азоту проведені на газовому сорбційному аналізаторі Autosorb – 6B версії 3.0 Quantachrome Instruments (Corp., NOVA 2200 E). Зразки попередньо дегазували у вакуумі при 453 K протягом 20 годин.

### ІЧ спектроскопія

Зразки змішували з попередньо прожареним KBr (spectroscopy, «Aldrich») у співвідношенні зразок/KBr дорівнює 1:40. ІЧ спектри пропускання записували на спектрометрі «Shimadzu FTIR» (Японія) в області від  $4000 \text{ cm}^{-1}$  до  $400 \text{ cm}^{-1}$ . Для обробки спектрів використовували програмне забезпечення фірми-постачальника. ІЧ спектри відбиття в цій області записували з використанням пристрою «SMART Collector» при роздільній здатності  $8 \text{ cm}^{-1}$  [3].

### Результати досліджень

Елементний склад природного сапоніту отриманий за допомогою енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного методу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

### Хімічний склад сапонітової породи Ташківського родовища ( мас. %)

Зразок	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CuO	ZnO	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Сапоніт природний	52,594	17,007	14,978	9,301	3,767	1,639	0,349	0,126	0,032	0,026	0,018	0,156

Слід зазначити, що дана сапонітова порода характеризується значним вмістом заліза. При чому іони  $\text{Fe}^{n+}$  можуть бути присутні як у міжшаровому просторі у вигляді обмінних катіонів, в структурній формі у вигляді ізоморфних заміщень, так і у вигляді мінеральних домішок оксиду заліза [13, 15]. Відповідно до [14] обмінні катіони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  та  $\text{Ca}^{2+}$  містяться у міжшаровому просторі та катіони  $\text{Mg}^{2+}$  і  $\text{Al}^{3+}$  зафіксовані в структурній решітці сапоніту.

Як відомо обробка глин мінеральними кислотами середніх концентрацій (2-4Н) призводить до вимивання із міжшарового простору обмінних катіонів ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) та катіонів октаедричної решітки ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), при цьому розвпорядковує алюмокремнієві пакети в базальному напрямку, не порушуючи структуру алюмосилікатних шарів, значно розвиваючи поровий простір, збільшуючи питому поверхню [4, 11,13].

На електронно-мікроскопічних знімках (Рис.3) зображено характерну морфологію для даного глинистого мінералу, яка представлена шаруватою структурою у вигляді ізометричних тонко дисперсних плитчастих частинок. Для зразка природного сапоніту характерна структура більш аморфно-желеподібної маси, після модифікації спостерігається розшарування на пластинки

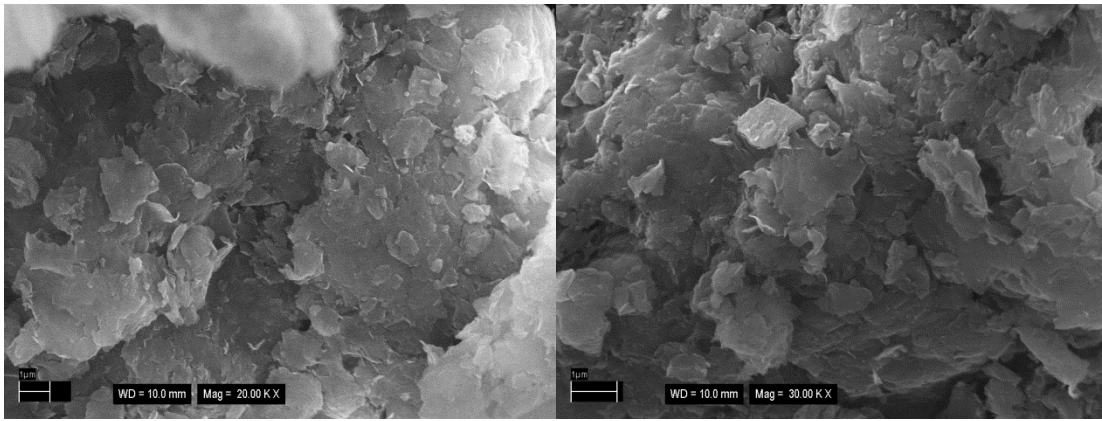


Рис. 3. – Мікрофотографія СЕМ зразка сапоніту: а) природний; б) модифікований диметиламіном

На рисунку 4 приведено ІЧ спектри природного і модифікованого етилендіаміном сапоніту

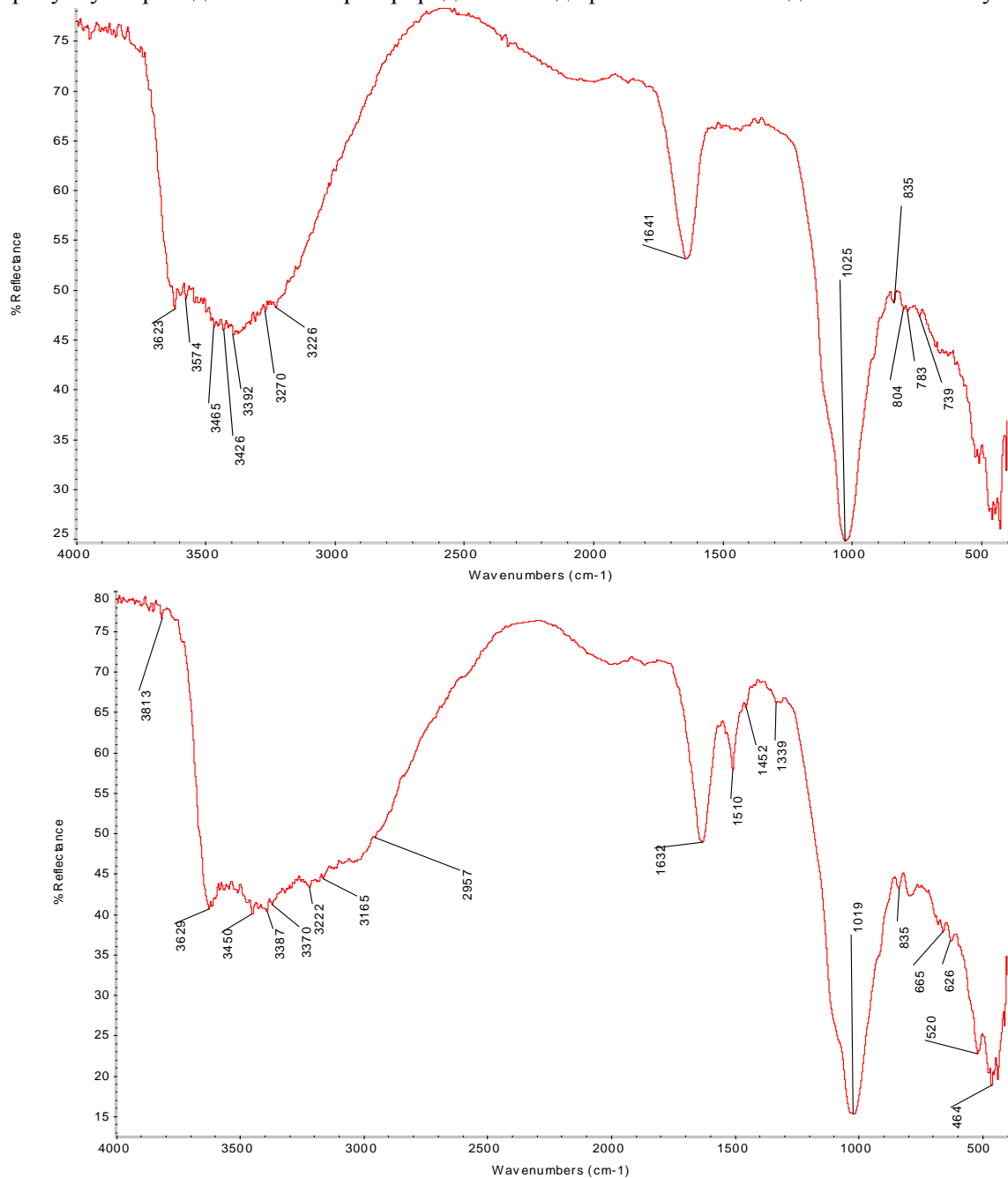


Рис. 4. ІЧ спектри природного сапоніту і модифікованого етилендіаміном

Вміст адсорбованої води можна визначити по смузі  $1630\text{ см}^{-1}$ , отже при активації в сапоніті відбувається зменшення смуги деформаційних коливань молекул сорбованої води, що вказує на видалення відповідної кількості гідрофільних домішок. Смуга поглинання  $1020\text{ см}^{-1}$  характеризує симетричні коливання  $\text{Si-O-Al}$  валентних груп. Наявність в ІЧ-спектрі модифікованого етилендіаміном зразка глини широкої смуги поглинання середньої інтенсивності при її довжині  $1200\text{ см}^{-1}$  вказує на присутність валентних аліфатичних амінів, а смуги інтенсивністю  $3630\text{ см}^{-1}$  на валентні коливання  $\text{O-H}$  вільних груп.

На рисунку 5 наведені результати адсорбції барвника прямого яскраво-оранжевого на природному сапоніті та модифікованому дифеніламіном. Результати досліджень показують, що рівновага настає практично при концентрації розчину  $0,03\text{ ммоль/л}$ . Максимальна адсорбція складає  $0,0815\text{ ммоль/г}$ , або  $61,94\text{ г}$  барвника на  $1\text{ кг}$  модифікованого сапоніту.

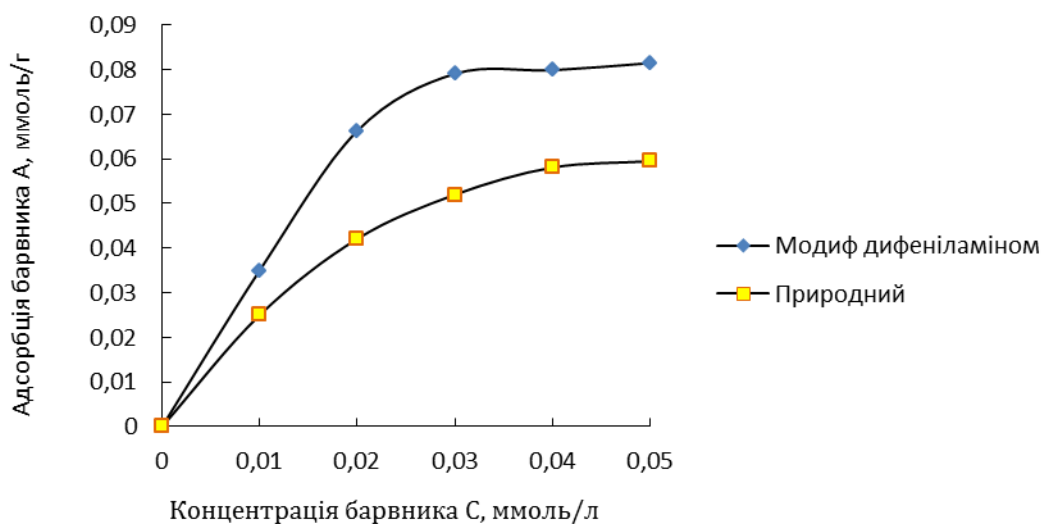


Рис. 5. – Адсорбція барвника прямого яскраво-оранжевого на природному сапоніті та модифікованому дифеніламіном

В таблиці 2 наведені дані щодо адсорбції сапонітової глини, модифікованої дифеніламіном (барвник метиленовий блакитний).

Таблиця 2

**Адсорбція барвника метиленового блакитного сапонітом, модифікованим дифеніламіном**

№ колби	$C_0$ , ммоль/л	$C_K$ , ммоль/л	$\Delta C$ , ммоль/л	$A_{\text{барв.}}$ , ммоль/г
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,01	0,0005	0,0095	0,0473
3	0,02	0,0007	0,0193	0,0963
4	0,03	0,0031	0,0269	0,1489
5	0,04	0,0066	0,0334	0,1796
6	0,05	0,0052	0,0448	0,1800

На рисунку 5 представлено результати адсорбції барвника метиленового блакитного на сапоніті природному та модифікованому дифеніламіном. Результати досліджень показують, що рівновага настає практично при концентрації розчину  $0,04\text{ ммоль/л}$ . Максимальна адсорбція дорівнює  $0,1800\text{ ммоль/г}$  або  $67,23\text{ г/кг}$  модифікованого сапоніту.



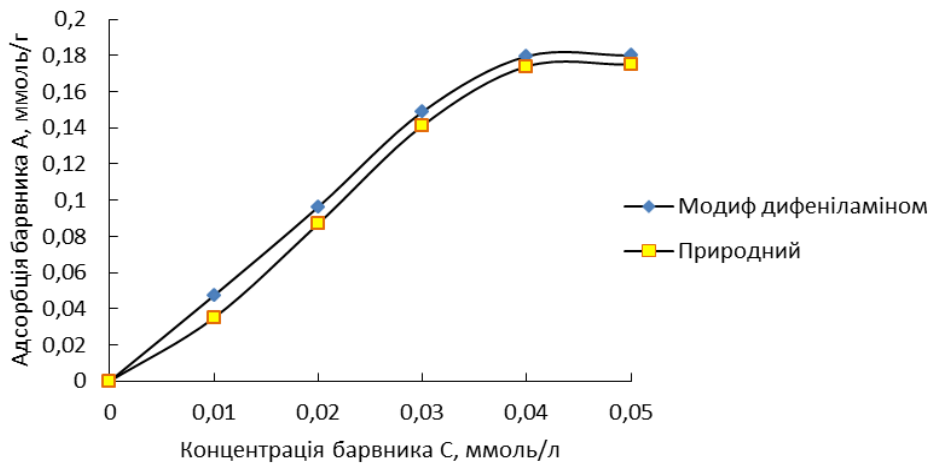


Рис. 5 – Адсорбція барвника метиленового блакитного на сапоніті природному та модифікованому дифеніламіном

Варто зауважити, що проводити модифікацію сапонітової глини ароматичним аміном було складно та екологічно недоцільно, так як, дифеніламін речовина токсична. Після модифікації сапоніт змінив забарвлення з коричневого на зелене, а після сушіння при  $T=80^{\circ}\text{C}$  він став чорного кольору і виділив неприємний запах, можливо, незафіксованого дифеніламіну. Так як, модифікація дифеніламіном проводилась в присутності концентрованої хлоридної кислоти, в результаті якої утворювалися кристали комплексної солі, які і були наявні в модифікованому сапоніті. Незважаючи на те, що дифеніламін є отруйною речовиною дана частина експериментальної роботи була проведена виключно з наукової точки зору, щоб переконатись про закономірність зростання основних властивостей аліфатичних і ароматичних амінів. Отриманий сорбційний матеріал, який модифікований дифеніламіном характеризувався високою плавучістю. А цей показник, як відомо з літературних джерел є важливим при розробці нафтових сорбентів. І, на наш погляд, незважаючи на токсичність використаного ароматичного аміну, проводити дослідження з ним потрібно у напрямку зростання сорбційної здатності з використанням його у якості модифікатора сапонітових глин.

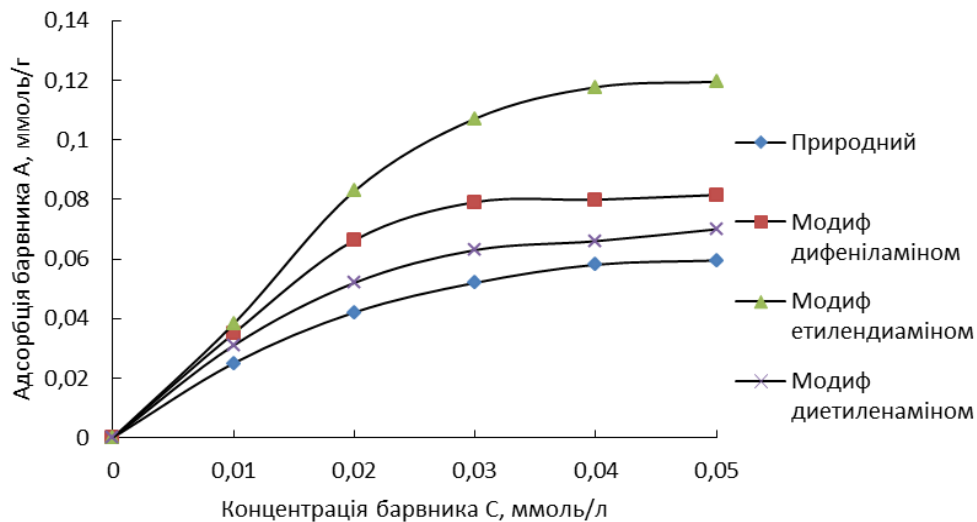
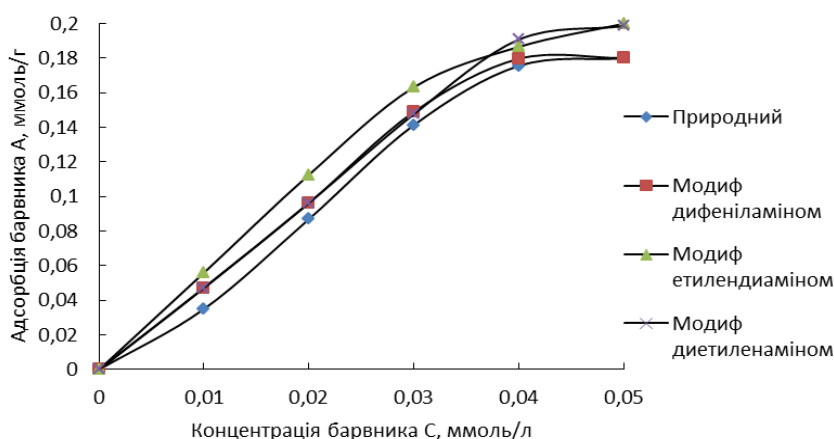


Рис. 6 – Порівняння адсорбції барвника прямого яскраво-оранжевого на сапоніті природному та модифікованому аліфатичними і ароматичними амінами



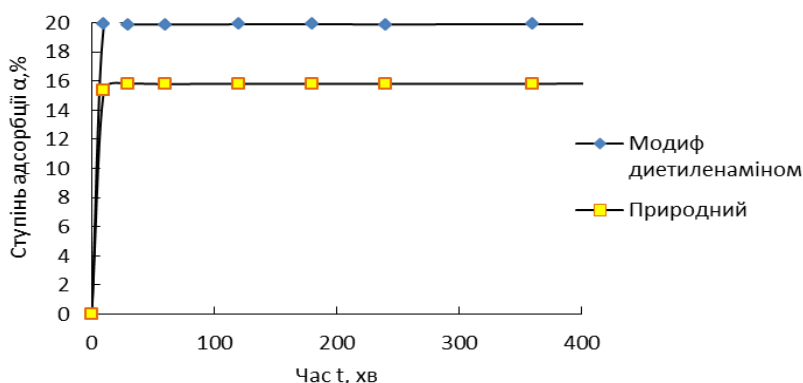
**Рис. 7 – Порівняння адсорбції барвника метиленового блакитного на сапоніті природному та модифікованому аліфатичними і ароматичними амінами**

Проведені дослідження показали, що природний сапоніт є ефективним сорбентом до органічних сполук катіонного типу, а щодо барвників аніонного типу, то спостерігається їх невисока адсорбція.

При проведенні модифікації ароматичними і аліфатичними амінами спостерігається підвищення сорбційної здатності по відношенню до барвників катіонного типу: сапоніт модифікований етилендіаміном характеризується зростанням сорбційної здатності в 2 рази, на відміну від диетиленаміну, сорбційна здатність якого зростає незначно. Така ж тенденція характерна для сорбційного матеріалу, модифікованого дифеніламіном. Утворений органо-неорганічний матеріал на основі сапоніту, і модифікований саме етилендіаміном показав найвищі результати сорбційної здатності по відношенню до барвників як катіонного, так і аніонного типу.

Досліджено кінетики адсорбції прямого яскраво-оранжевого на зразках природного сапоніту та модифікованого ароматичними і аліфатичними амінами. Вони свідчать про те, що цей природний мінерал не є ефективним сорбентом по відношенню до барвників, які дисоціюють по аніонному типу. При проведенні модифікації глинистого матеріалу спостерігається підвищення ступеня адсорбції барвників щонайбільше на 4,9%.

Так як приріст питомої адсорбції дещо відстає від приросту маси адсорбенту, то можна стверджувати, що сорбція має переважно поверхневий характер і розвивається за двома механізмами, розділеними в часі. В перші 10 та 30 хвилин молекули барвника займають вільні активні центри на поверхні сапонітової породи, після чого швидкість процесу знижується і починається адсорбція в порах мінералу, де і проходить до встановлення сорбційної рівноваги, для чого достатньо близько однієї години [5-9].



**Рис. 8 – Кінетика адсорбції прямого яскраво-оранжевого на сапоніті природному та модифікованого диетиленаміном**

Переважає більшість неорганічних і органічних матеріалів, речовин і компонентів володіє тією чи іншою ступенем гігроскопічності, тобто мають властивість поглинати (сорбувати) водяні

пари з повітря. Для всіх пористих матеріалів існує певна залежність між кількістю поглинутої ним води (так званої гігроскопічної вологості) і відносною вологістю навколишнього повітря [10-12].

Дослідження вологовмісту природного сорбенту були проведені відповідно до ГОСТ 3594.11-93 «Глины формовочные огнеупорные. Метод определения влаги порошкообразных глин». Результати досліджень зображені у вигляді діаграми на рисунку 1.28.

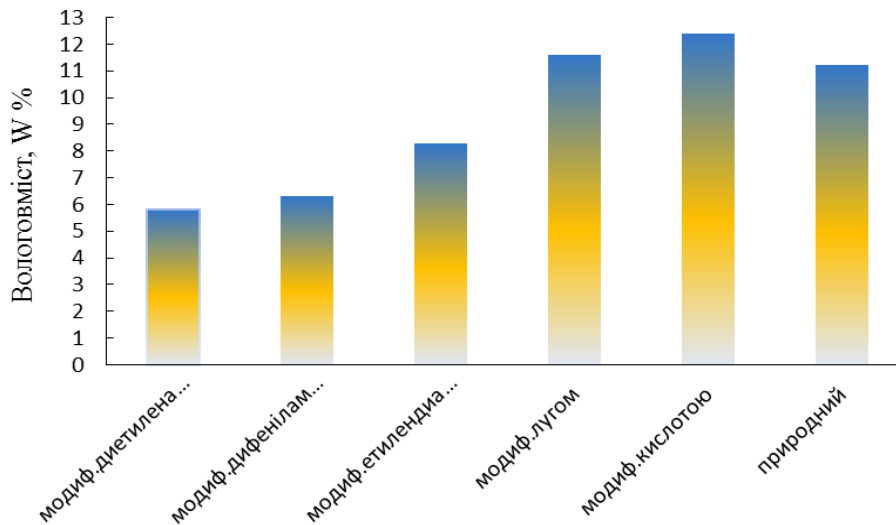


Рис. 9 – Вологовміст природних і модифікованих форм сапонітових глин

Дослідження залежності вологовмісту сорбційних матеріалів від відносної вологості повітря показали цікаві та неочікувані результати, суть яких полягає в наступному: вологовміст сапонітів, модифікованих сульфатною кислотою зріс незначно до 2%, активованих лугом - практично не змінився, зате, модифікованих дифеніламіном і діетиленаміном зменшився на 50%. Модифікація подільської глини Ташківського родовища етилендіаміном призвела до зменшення вологовмісту до 35%. Активація кислотою призводить до її взаємодії з оксидами, що входять в склад сапоніту; при цьому утворюються солі які вимиваються з глини залишаючи за собою місце або мезо- та макропори, куди проникають різні поллютанти, а також вода. Можливо, за рахунок руйнівної дії кислоти відбувається зростання як сорбційної здатності природного мінералу, так і його вологовмісту. Обробка сапонітових глин ароматичними і аліфатичними амінами призвела до того, що відбулася адсорбція тільки на зовнішній поверхні частинок мінералу, що призвело до їх склеювання. Можливо, це і є причиною різкого зменшення вологовмісту матеріалу, з одночасним створенням органо-мінерального гідрофобного сорбційного матеріалу, який містить меншу кількість сорбційної води.

Параметри пористої структури природного та модифікованого амінами сапоніту досліджували з використанням методу низькотемпературної адсорбції/десорбції азоту. Дослідження адсорбційних характеристик модифікованого сапоніту здійснювали за ізотермами адсорбції/десорбції по азоту. Питома поверхня визначалась із використанням методу BET в області ізотерми, обмеженої діапазоном відносних тисків  $P/P_0$  від 0,05 до 0,35 та за методом DFT, який базується на теорії функціоналу густини. Метод ВДН був використаний для визначення загального об'єму мезопор, діаметру пор, розподілу мікропор за розмірами, об'єму мікропор  $V_{mic,t}$ , зовнішньої площі поверхні  $S_{ext,t}$ , площі поверхні мікропор  $S_{mic,t}$ .

Загальний об'єм пор розраховували шляхом перетворення обсягу адсорбованого азоту при  $P/P_s = 0,99$  до об'єму рідкого адсорбату. Вихідною моделлю для всіх подальших розрахунків є ізотерми сорбції зразків, тобто залежність кількості рівномірно адсорбованого зразком азоту від відносного тиску азоту  $P/P_0$ , де  $P$  і  $P_0$  – тиск пари адсорбату (азоту) і тиск його насиченої пари при 77 К. Отримані ізотерми для різних зразків сапоніту є якісно подібні між собою і відносяться до IV типу згідно з класифікацією, представленою Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT). Ізотерми проявляють гістерезис, який згідно класифікації IUPAC [14-15] належить до типу H3, зазвичай, пов'язують з порами, що складаються із плоскопаралельних шарів. Форми ізотерм вказують на наявність пор двох типів – мікро і мезопор у досліджуваному глинистому мінералі. Показники питомої поверхні, об'єму пор та їх діаметру наведені в таблицях 3-5:

Таблиця 1

## Питома поверхня природних і модифікованих зразків сапонітової глини

Проба	Питома поверхня S, м <sup>2</sup> /г						
	БЕТ	ВН ad/de	ДН ad/de	t <sub>ext</sub>	t <sub>mic</sub>	DR	DFT
1 Природний	47	22,37/ 68,50	22,74/ 70,24	31,14	16,57	78,50	47,16
2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 25%	177	24,45/71,87	71,87/ 24,89	38,55	139,3	215,5	189,8
3 Етилендіамін	66	19,54/49,25	19,90/ 50,42	27,60	38,69	73,11	75,48
4 NaOH	46	20,14/55,54	20,49/ 57,01	27,92	18,06	50,20	47,32

Таблиця 2

## Об'єм пор природних і модифікованих зразків сапонітової глини

Проба	Об'єм пор V, см <sup>3</sup> /г							
	total	ВН ad/de	ДН ad/de	t <sub>mic</sub>	DR	HK	SF	DFT
1 Природний	0,1336	0,1198/ 0,1414	0,1165/ 0,1389	0,0084	0,0280	0,028	0,021	0,117
2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 25%	0,2012	0,1304/ 0,1518	0,1268/ 0,1490	0,0624	0,0766	0,086	0,076	0,175
3 Етилендіамін	0,1103	0,0869/ 0,0988	0,0847/ 0,0969	0,0185	0,0259	0,0358	0,029	0,096
4 NaOH	0,1200	0,106/ 0,122	0,103/ 0,120	0,0094	0,0178	0,0268	0,021	0,104

Таблиця 3

## Діаметр пор природних і модифікованих зразків сапонітової глини

Проба	Діаметр пор, А°								
	Aver	ВН ad/de	ДН ad/de	DR	DA	HK	SF	DFT	
1 Природний	55,99	15,46/21,43	15,46/21,43	11,68	8,7	2,158	3,784	26,42	
2 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 25%	22,62	15,39/21,44	15,39/21,41	9,302	8,4	2,158	2,261	7,160	
3 Етилендіамін	33,29	15,41/21,41	15,41/21,41	7,729	7,8	2,158	2,261	26,42	
4 NaOH	52,21	15,45/21,38	15,45/21,38	7,273	7,8	2,158	2,261	26,42	

Досліджено параметри пористої структури природного та модифікованого сапоніту методом низькотемпературної адсорбції/десорбції азоту: S<sub>пит.</sub> за БЕТ природного зразка дорівнює 47 м<sup>2</sup>/г, а модифікованого етилендіаміном - 66 м<sup>2</sup>/г, об'єм пор зменшується від 0,1336 до 0,1103 см<sup>3</sup>/г, і, їх діаметр відповідно від 55,99 до 33,29 А°. Тобто сапоніт являє собою мікро-мезопористий сорбційний матеріал.

**Висновки**

Таким чином, при модифікації сапонітових глин ароматичними і аліфатичними амінами спостерігається підвищення сорбційної здатності по відношенню до барвників катіонного типу: сапоніт модифікований етилендіаміном характеризується зростанням сорбційної здатності в 2 рази, на відміну від диетиленаміну, сорбційна здатність якого зростає незначно. Така ж тенденція

характерна для сорбційного матеріалу, модифікованого дифеніламіном. Утворений органо-неорганічний сорбційний матеріал на основі сапоніту, і модифікований саме етилендіаміном показав найвищі результати сорбційної здатності по відношенню до барвників як катіонного, так і аніонного типу. Визначено, що на кінетичних кривих можна виділити дві ділянки з різною швидкістю адсорбції, яка різко зростає на першій ділянці на протязі 10 та 20 хвилин за лінійним законом, що пов'язано з взаємодією між барвником і поверхнею сорбційного матеріалу за допомогою сил електростатичного притягування, а потім процес адсорбції уповільнюється. Так як приріст питомої адсорбції дещо відстає від приросту маси адсорбенту, то можна стверджувати, що сорбція має переважно поверхневий характер і розвивається за двома механізмами, розділеними в часі.

Дослідження залежності вологовмісту сорбційних матеріалів від відносної вологості повітря показали цікаві та неочікувані результати, суть яких полягає в наступному: вологовміст сапонітів, модифікованих сульфатною кислотою зріс незначно до 2%, активованих лугом - практично не змінився, зате, модифікованих дифеніламіном і диетиленаміном зменшився на 50%. Модифікація подільської глини Ташківського родовища етилендіаміном призвела загалом до зменшення вологовмісту до 35%. Затє питома поверхня зростає, а об'єм і діаметр пор зменшуються.

1. Рудь В.Д. Порошкові фільтруючі матеріали на основі природних мінералів / В.Д. Рудь, С.В. Храпатий, Н.М. Гулієва // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. (за напрямом «Інженерна механіка»). – 2013. – Вип. 42. – С. 224 – 227.
2. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды / Ю.И. Тарасевич - К: Наукова думка. – 1981. – 208 с.
3. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. – М. : Изд. иностранной литературы, 1963 – 590 с.
4. Финевич В.П. Композиционные наноматериалы на основе кислотно-активированных монтмориллонитов / В.П. Финевич Н.А. Аллерт Т.Р. Карпова В.П. Дуплякин // Рос. хим.ж. им. Д.И. Менделеева. – 2007. – Вып. 4 – С. 70 – 74.
5. AGGARWAL V. Triazine adsorption by saponite and beidellite clay minerals /Vaneet Aggarwal, Hui Li, and Brian J. Teppen // J. Environmental Toxicology and Chemistry. USA. –2006. –Vol. 25.–No. 2.– P. 392–399.
6. Breen Ch. Characterization and Catalytic Activity of Acid-Treated, Size-Fractionated Smectites / Breen Ch., Deeba Zahoor F., Madejova J., Komadel P. // J. Phys. Chem. American Chemical Society. –1997. – Vol. 101. – No. 27. – P324 -331.
7. Brigatti M.F. Structures and mineralogy of clay minerals /M.F. Brigatti , B.E. Galan, K.G. Theng // Handbook of Clay Science. – Elsevier Ltd. Developments in Clay Science. – 2006. – Vol. 1.–P.19-86.
8. Dmitrenko Yu. A. Estimation of Saponite Sorptive Properties with Regard to Fluoride Ions / Yu. A. Dmitrenko, A. V. Mamchenko, and N. I. Shpilevaya // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2012. – Vol.34 – No. 6. – P.271–276.
9. Dmitrenko Yu. A. Sorption of Hydrochloric Acid with Saponite / Yu. A. Dmitrenko and A. V. Mamchenko //Journal of Superhard Materials. Allerton Press, Inc. – 2013. – Vol. 35 – No. 1. – P. 15–22.
10. IUPAC/ IUPAC manual of symbols and terminology // Pure Appl. Chem. – 1972 –Vol 31–578 p.
11. Jozefaciuk G. Effect of acid and alkali treatments on surface areas and adsorption energies of selected minerals / G.Jozefaciuk G. Bowanko // Clays and Clay Minerals. – 2002. –Vol. 50. – No. 6–P. 771–783.
12. Ганзюк А. Я. Дослідження сорбційних процесів на природному і кислотно активованому сапоніті / А. Я. Ганзюк, О. І. Кулаков // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 2. – С. 85-90.
13. Ogorodova L. P. Calorimetric Determination of the Enthalpy of Formation of Natural Saponite /L. P. Ogorodova, I. A. Kiseleva, L. V. Mel'chakova, M. F. Vigasina, V. V. Krupskaya and V. V. Sud'in // Geochemistry International. Pleiades Publishing, Ltd. – 2015. – Vol. 53. – No. 7 –P. 617–623.
14. Tarasevich, Yu.I. The Composition and Thermal Resistance of Hydrates of Exchange Cations of Saponite / Yu.I. Tarasevich, V.E. Polyakova, Z.G. Ivanova, M.Yu.Trifonova // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2011.– Vol. 33. – No. 4. – P. 381–391.
15. Сокол Г. М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою / Міжвузівський збірник наукових праць “Наукові нотатки” Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2017. – № 56. – С. 149–153

Стаття надійшла до редакції 08.06.2018

УДК 666.914

Ю.Г. Гасан, В.И. Тарасевич, О.В. Дроздова

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ОБЛИЦОВОЧНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ГИПСА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЗОЛОЙ И СЕРОЙ**

*В работе рассмотрены вопросы получения композиционного материала на основе гипса и серы с повышенными эксплуатационными характеристиками. Установлены закономерности пропитки гипсозольной матрицы расплавом серы с учетом капиллярно-пористой структуры гипсозольного камня и физико-технических свойств серы. Анализ результатов показывает, что прочность пропитанных серой образцов повышается с увеличением степени заполнения ею порового пространства. Так, при увеличении относительного серосодержания ( $v=U_s/U_{smax}$ ) с 0,30 до 0,90 предел прочности при сжатии повышается с 10,1 до 42 Мпа. Установлено, что водостойкость пропитанных образцов существенно зависит от степени пропитки и количества золы-уноса. Установлено, что гипсовые и гипсозольные образцы, пропитанные расплавом серы, имеют коэффициент химической стойкости не менее 0,7, это позволяет отнести их к химически стойким.*

*Ключевые слова:* сера, гипс, зола, водостойкость, химическая стойкость, расплав серы.

Ю.Г. Гасан, В.И. Тарасевич, О.В. Дроздова

**СПЕЦІАЛЬНИЙ ОБЛИЦІВАЛЬНИЙ БУДІВЕЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ГІПСУ, МОДИФІКОВАНИЙ ЗОЛОЮ І СІРКОЮ**

*В роботі розглянуті питання отримання композиційного матеріалу на основі гіпсу і сірки з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Встановлено закономірності просочення гіпсозольної матриці розплавом сірки з урахуванням капілярно-пористої структури гіпсозольного каменю і фізико-технічних властивостей сірки. Аналіз результатів показує, що міцність просочених сіркою зразків підвищується зі збільшенням ступеню заповнення нею пор. Так, при збільшенні відносного вмісту сірки ( $v = U_s / U_{smax}$ ) з 0,30 до 0,90 межа міцності при стиску підвищується з 10,1 до 42 МПа. Встановлено, що водостійкість просочених зразків істотно залежить від ступеню просочення і кількості золи-винесення, встановлено, що гіпсові і гіпсозольні зразки, просочені розплавом сірки, мають коефіцієнт хімічної стійкості не менше 0,7, це дозволяє віднести їх до хімічно стійких.*

*Ключові слова:* сірка, гіпс, зола, водостійкість, хімічна стійкість, розплав сірки.

Y.G. Gasan, V.I. Tarasevich, O.V. Drozdova

**SPECIAL CONSTRUCTION BUILDING MATERIAL BASED ON GYPSUM MODIFIED BY ASH AND SULFUR**

*The paper considers the issues of obtaining a composite material based on gypsum and sulfur with increased building and technical properties. The regularities of impregnation of the gypsum ash matrix with a sulfur melt are determined taking into account the capillary-porous structure of the gypsum stone and the physical and technical properties of sulfur. Analysis of the results shows that the strength of sulfur impregnated samples increases with increasing degree of filling it with pore space. Thus, with an increase in the relative sulfur content ( $v = U_s / U_{smax}$ ) from 0.30 to 0.90, the compressive strength is increased from 10.1 to 42 MPa. It has been established that the water resistance of impregnated samples essentially depends on the degree of impregnation and the amount of fly ash. Thus, with a partial impregnation of the gypsum samples, the softening factor is 0.50, while at the full 0.72. The chemical resistance of impregnated samples was determined in solutions of magnesium sulfate, sulfuric acid, acetic acid and oxalic acid, which are the most characteristic components of the aggressive media of livestock houses, food shops and chemical industries. It has been established that gypsum and gypsum ash samples impregnated with a melt of sulfur have a chemical resistance coefficient of at least 0.7. This allows them to be classified as chemically resistant in these environments.*

*Key words:* sulfur, gypsum, ash, water resistance, chemical resistance, sulfur melt.

**Постановка проблеми.** Известно, что сера является типичным неорганическим термопластом, способным к образованию многочисленных аллотропных модификаций, и при этом, в расплавленном состоянии, она имеет небольшую вязкость. Сера хорошо совместима с различными полимерными модификаторами. Вводя различные добавки, можно регулировать вязкость и поверхностное натяжение в широких пределах. Сера имеет сильные адгезионные связи к минеральным наполнителям и заполнителям. При нормальных условиях она химически инертна. Даже при нагревании практически нерастворима в воде и кислотах. Сера диамагнитна, является плохим проводником тепла, обладает инсектицидными свойствами, гидрофобна. Обладает низкой температурой плавления, что позволяет при небольших энергозатратах переводить ее из твердого состояния в жидкое. С технологической точки зрения процесс кристаллизации расплава серы при охлаждении является более простым, чем полимеризация мономеров при изготовлении бетонополимеров.

Из вышеизложенного следует, что сера, как пропиточный материал, обладает многими ценными свойствами и может быть использована для пропитки различных строительных капиллярно-пористых материалов, в частности, гипсобетонов.

Кроме того, сера менее дефицитна и ее стоимость значительно ниже чем мономеров, которые используются для пропитки бетонов. В Украине имеются большие запасы природной серы в Роздольском и Яворовском серных месторождениях. Увеличение производства серы связано не только с увеличением добычи природной серы, но и с резким увеличением выхода серы при очистке природного газа, топочных газов и других промышленных отходов [1]. Поэтому утилизация серы и серных продуктов является сама по себе важнейшей и неотъемлемой задачей современности с экономической, экологической и энергетической точек зрения [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время известно несколько технологических приемов получения строительных материалов и изделий с применением серы различных модификаций. Один из них - пропитка традиционных строительных материалов и изделий расплавом серы, другой - изготовление серных бетонов.

Известное свойство расплава серы образовывать сильные адгезионные связи с различными минеральными наполнителями позволяет использовать серу в качестве основы серного связующего - мастики, которая, в свою очередь, является основой структуры серных бетонов [3].

Важнейшим компонентом структуры мастики является наполнитель, введение которого снижает расход серы и способствует изменению структуры и всех свойств серной мастики [4]. Одним из наиболее ценных свойств композиционных материалов на основе серы является их высокая коррозионная стойкость. В ряде работ отмечается, что серный бетон стоек к воздействию разных кислот.

Однако в этих работах не исследованы вопросы, связанные с физико-химическими явлениями, протекающими при взаимодействии гипсовой или гипсозольной матрицы и серы, стойкости пропитанных образцов в агрессивных средах и недостаточно рассмотрены процессы сушки и пропитки с точки зрения их оптимизации.

**Постановка задач.** Цель работы состоит в том, чтобы рассмотреть вопросы получения композиционного материала на основе гипса и серы с повышенными строительно-техническими свойствами. Установить закономерности пропитки гипсовой или гипсозольной матрицы расплавом серы с учетом капиллярно-пористой структуры искусственного камня и определить физико-технические свойства модифицированных материалов.

**Изложение основного материала.** Эффективным способом повышения водостойкости и других эксплуатационных характеристик капиллярно-пористых строительных материалов, в том числе и на основе гипса, является пропитка веществами, способными отвердевать в поровом пространстве этих материалов, что способствует уплотнению структуры и препятствует проникновению в них влаги.

Оптимальным пропитывающим веществом для модификации гипсобетонов является сера, поскольку ее расплав имеет достаточно хорошие пропиточные свойства, высокую адгезию к различным минеральным наполнителям и высокую химическую стойкость в различных агрессивных средах [5].

Пропитку гипсозольных образцов в расплаве серы производили в специальной камере при атмосферном давлении [6, 7].

Оценку эффективности пропитки образцов производили по коэффициенту упрочнения (К), который определяли, как отношение прочности образца после пропитки к исходной прочности.

Результаты исследования влияния водогипсового отношения и серосодержания в пропитанных гипсовых образцах на прочность и коэффициент упрочнения представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Анализ результатов показывает, что прочность пропитанных серой образцов повышается с увеличением степени заполнения ею порового пространства. Так, при увеличении относительного серосодержания ( $v=U_s/U_{smax}$ ) с 0,30 до 0,90 предел прочности при сжатии повышается с 10,1 до 42 Мпа.

Значительное увеличение прочности в результате пропитки серой связано с тем, что высокая пористость гипсового камня, которая увеличивается и за счет удаления части кристаллогидратной воды, позволяет создать при пропитке серный каркас. Образование серного каркаса с мелкокристаллической структурой серы обуславливает высокую прочность полученного материала.

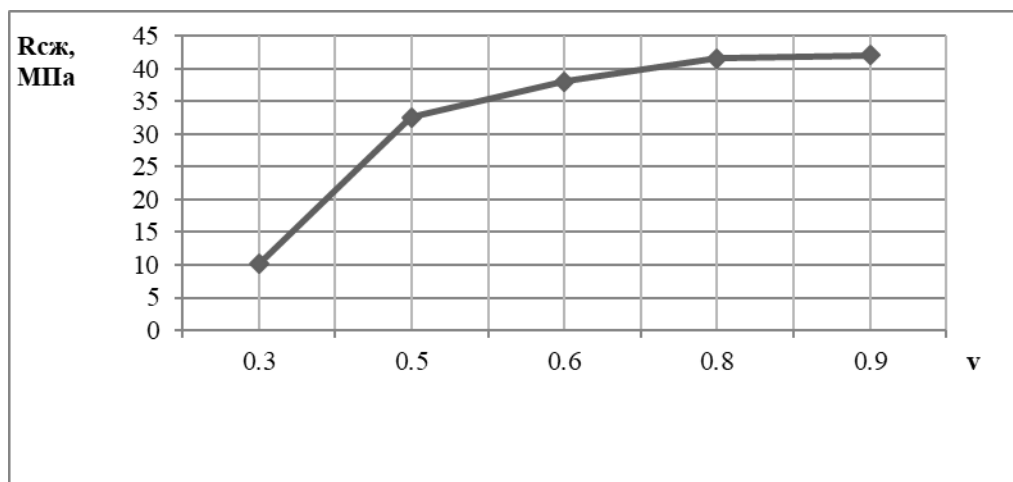


Влияние водогипсового отношения на прочность гипсового камня, пропитанного расплавом серы, приведено в табл. 1 и рис.1, рис.2.

Таблиця 1

**Влияние водогипсового отношения на прочность гипсового камня, пропитанного расплавом серы**

В/Г	П, %	U <sub>s</sub> , %	R <sub>сж</sub> , МПа	R <sub>изг</sub> , МПа	K <sub>y</sub> (R <sub>сж</sub> )	K <sub>y</sub> (R <sub>изг</sub> )
0,45	50,0	71,2	34,1	10,5	4,7	5,0
0,50	53,2	83,5	38,0	10,8	6,5	6,7
0,55	55,8	90,8	42,4	12,5	8,3	8,8
0,60	58,4	97,1	42,8	12,1	9,4	9,8
0,65	60,7	100,0	40,2	11,8	10,2	11,2
0,70	63,1	102,0	36,5	10,2	10,6	12,5

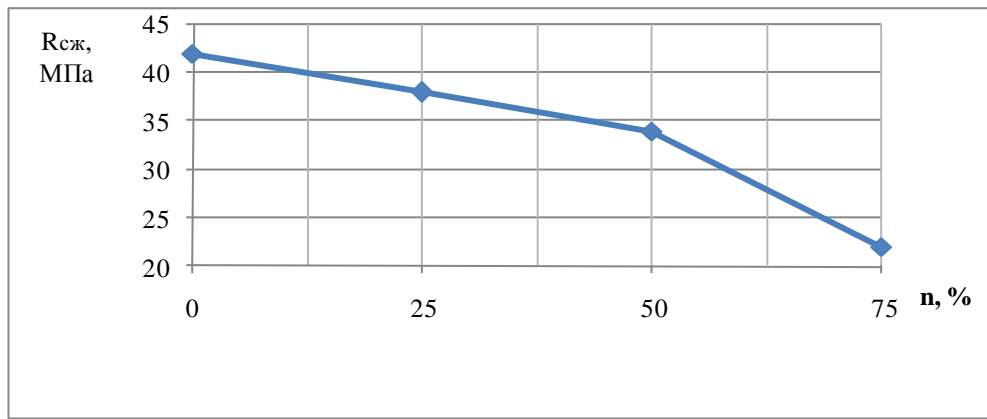


**Рис.1. Зависимость предела прочности при сжатии пропитанного гипсового камня от относительного содержания серы  $v=U_s/U_{smax}$**

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что коэффициент упрочнения пропитанных гипсовых образцов повышается при увеличении водогипсового отношения. Так, при увеличении В/Г с 0,45 до 0,70 коэффициент упрочнения при сжатии возрастает с 4,7 до 10,6, а при изгибе – с 5 до 12,1. Такая зависимость объясняется тем, что при повышении водогипсового отношения увеличивается пористость гипсового камня, что позволяет при пропитке получить более «мощный» серный каркас. В результате этого повышается прочность пропитанных образцов. Однако при повышении водогипсового отношения увеличивается количество пор размером более 0,2 мм, которые частично кольматируются серой, что приводит к снижению прочности серного каркаса. Этим можно объяснить некоторое снижение (в 1,17 раза) прочности пропитанных образцов при увеличении В/Г с 0,60 до 0,70, но при этом прочность исходного гипсового образца снижается в 1,3 раза, что и обуславливает увеличение коэффициента упрочнения.

После пропитки серой гипсовая матрица во многом теряет свои свойства и роль каркаса, поскольку при дегидратации она значительно снижает и без того невысокую прочность.

На рис.2 показана зависимость предела прочности при сжатии пропитанного гипсозольного камня от содержания золы-уноса.



**Рис. 2. Залежність межної міцності при сжатті пропитанного гіпсово-солевого каменю від вмісту золи-уносу**

Експерименти показали (рис. 2.), що міцність пропитаних зразків зменшується при збільшенні вмісту золи-уносу. Це обумовлено тим, що при збільшенні кількості золи-уносу зменшується пористість і, як наслідок, зменшується максимальне вмісту сірки в пропитаних зразках. Однак при збільшенні вмісту золи-уносу коефіцієнт ущільнення зростає. Це пов'язано з тим, що при збільшенні кількості золи-уносу міцність вихідного гіпсово-солевого зразка зменшується швидше, ніж у пропитанного.

Збільшення вмісту полімерної сірки в пропитаних зразках сприяє підвищенню їх міцності за рахунок зменшення внутрішніх напружень і утворення більш міцних адгезійних зв'язків сірки з гіпсово-солевим каменем.

З метою визначення області раціонального використання в будівництві виробів з матеріалу на основі гіпсу і сірки були проведені дослідження їх водостійкості і хімічної стійкості.

Результати дослідження водостійкості пропитаних сіркою зразків при варіюванні вмісту золи-уносу і відносного сіркового вмісту наведені в табл. 2.

*Таблиця 2*

**Залежність коефіцієнта розм'якчення від складу пропитаних зразків**

Склад зразка			Відносне вмісту сірки	Коефіцієнт розм'якчення
гіпс, %	зола-унос, %	В/Г		
100	0	0,55	0,75	0,50
			1,00	0,72
75	25	0,48	0,75	0,58
			1,00	0,78
50	50	0,41	0,75	0,64
			1,00	0,85
25	75	0,34	0,75	0,68
			1,00	0,88

Аналіз даних показує, що водостійкість пропитаних зразків суттєво залежить від ступеня пропитки і кількості золи-уносу. Так, при частковій пропитці гіпсових зразків коефіцієнт розм'якчення становить 0,50, в той час як при повній 0,72. Більш значуще зменшення водостійкості в разі часткової пропитки обумовлено наступними причинами. По-перше, тим, що за рахунок дифузії вологи через зовнішній пропитаний шар в внутрішній області зразка відбувається гідратація напівводного гіпсу завдяки топоміхічному приєднанню молекул води з утворенням високодисперсного двоводного сульфату кальцію. Виникаючі внутрішні напруження призводять до появи мікротріщин в зовнішньому пропитаному шарі. По-друге, за рахунок наступної за топоміхічною гідратацією капілярної конденсації виникають значущі кількості води, що призводять до інтенсивного розчинення контактних зон між кристалами гіпсу і виникненню розклинюючого ефекту. Повністю очевидно, що при зменшенні глибини пропитки зразків, інтенсивність деструктивних процесів буде

увеличиваться и их водостойкость снизится. Установлено, что коэффициент водостойкости пропитанных гипсозольных образцов возрастает при повышении концентрации золы-унос и составляет 0,80...0,88. Это связано, с более плотной структурой пропитанного гипсозольного камня, что обеспечивает снижение его проницаемости. При увеличении концентрации золы-унос уменьшается относительное содержание водорастворимых межкристаллизационных контактов гипса. В-третьих, при пропитке гипсозольных образцов (особенно при высоком содержании золы-унос) расплав серы, заполняя межзерновое пространство золы-унос, выступает в роли связующего, поскольку между серой и золой-унос возникают достаточно прочные адгезионные связи. В результате образуется матрица из водостойкого материала наподобие серной мастики, которая, как известно [8], имеет высокую водостойкость (0,92).

Проведенные эксперименты дают основание считать, что материал на основе гипса, золы и серы, относится к водостойким материалам, поскольку коэффициент размягчения выше 0,7. Поэтому, можно прогнозировать, что облицовочные изделия из такого материала будут иметь высокую долговечность.

Известно, что химическая стойкость материала зависит, главным образом, от его проницаемости и реакционной способности компонентов материала к воздействию агрессивных сред.

Как установлено, пропитка гипсозольных образцов серой значительно снижает их общую пористость, что позволяет существенно снизить проницаемость гипсозольной матрицы, и поэтому возможно прогнозировать снижение потенциальной агрессивности среды [5].

Химическую стойкость пропитанных образцов определяли в растворах сернистой кислоты, уксусной и щавелевой кислот, которые являются наиболее характерными компонентами агрессивных сред животноводческих помещений, пищевых цехов и химических производств.

Результаты испытаний образцов после шестимесячного выдерживания в названных средах приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты испытания пропитанных образцов на химическую стойкость**

Состав образца		U <sub>s</sub> , %	Коэффициент химической стойкости			
гипс, %	зола-унос, %		Уксусная кислота	Щавелевая кислота	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>
100	0	92,0	0,71	0,71	0,70	0,70
75	25	74,2	0,76	0,78	0,75	0,75
50	50	61,4	0,84	0,84	0,83	0,84
25	75	54,0	0,88	0,88	0,88	0,88

Установлено, что гипсовые и гипсозольные образцы, пропитанные расплавом серы, имеют коэффициент химической стойкости не менее 0,7. Это позволяет отнести их к химически стойким в этих средах.

Повысить химическую стойкость пропитанных образцов можно применением расплава модифицированной серы, поскольку известно, что полимерная сера по сравнению с кристаллической характеризуется повышенной химической стойкостью и известна как нерастворимая.

Таким образом, установлено, что величина коэффициента упрочнения возрастает при увеличении количества поглощенной серы, содержания золы-унос и водотвердого отношения. Показана положительная роль золы-унос в повышении водостойкости (Кв.с.>0,8) и химической стойкости (Кх.с.>0,8) пропитанного гипсозольного камня за счет уменьшения относительного содержания водорастворимых контактов гипса и образования матрицы из серозольного материала наподобие серной мастики.

Анализ основных строительно-технических характеристик материала на основе гипса и серы показывает, что облицовочные изделия, изготовленные из такого материала, имеют высокие эксплуатационные характеристики и их целесообразно применять для облицовки хранилищ удобрений, лотков для навозоудаления, дренажных систем, полов и стен животноводческих комплексов, предприятий химической и пищевой промышленности.

**Выводы.**

1. Доказано, что в результате модификации гипсозольных образцов расплавом серы коэффициент размягчения в диапазоне 0,5 – 0,88, в зависимости от кратности обработки.
2. Установлено, что коэффициент химической стойкости у образцов, пропитанных серой больше 0,7, что делает их химически стойкими.
3. Показано, что описанный в статье метод модификации штучного гипсозольного камня позволяет повысить прочность при сжатии в пределах 34 – 43 Мпа, при изгибе 10 – 12,5 Мпа.

**Литература.**

1. Менковский М.А. Технология серы. / М.А. Менковский, В.Т. Яворский. – М.: Химия, 1985. –328 с.
2. Мовчан Н.И. Интенсификация пропитки бетонных изделий расплавом серы и повышение физико-механических характеристик пропитанного бетона: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.05. / Н.И. Мовчан. – Харьков, 1988. –20 с.
3. Патуроев В.В. Серные бетоны и бетоны, пропитанные серой / В.В. Патуроев, А.Н. Волгушев, Ю.И. Орловский. – Обзорн. информ. Строительные материалы. Сер.7, вып.1. ВНИИИС Госстроя СССР. –М.,1985. – 60 с.
4. Шестеркина Н.Ф. Некоторые вопросы структурообразования серных композиционных материалов. / Н.Ф. Шестеркина. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1990. —129 с.
5. Гасан Ю.Г. Химически стойкий облицовочный материал из гипсобетона, пропитанного серой. / Ю.Г. Гасан, В.И. Тарасевич. // Докл. I Межгосударст. Семинара «Проблемы огнезащиты строительных материалов и конструкций». – Львов, 1994. – 202-206 с.
6. Тарасевич В.И. Патент № 6526 Украина, МКИ С 04 В 41/45. Способ пропитки гипсовых изделий / В.И. Тарасевич, В.М. Казанский, Ю.Г. Гасан, В.Б. Ратинов. – Опубл. 29.12.94. Бюл. №8-1. – 3 с.
7. Гасан Ю.Г. Гипсосодержащие композиты, модифицированные серой и золой. / Ю.Г. Гасан, А.Ю. Дорошенко. // Збірник наукових праць Київського інституту залізничного транспорту. –Т.1, вип. 1. – К., 1998. – 120-124 с.
8. Орловский Ю.И. Бетоны, модифицированные серой: Диссертация: 05.23.05. / Ю.И. Орловский. – Харьков, 1992. – 529 с.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018

УДК: 621.86.

**Б.М. Гевко<sup>1</sup>, О.Л. Ляшук<sup>1</sup>, М.І. Клендій<sup>2</sup>, Н.М. Марчук<sup>1</sup>, Р.М. Котик<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя<sup>2</sup>Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
«Бережанський агротехнічний інститут»**ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЇВ І РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ  
ОБРОБЛЕННЯ РІЗЬБОВИХ ПОВЕРХОНЬ***Приведені прогресивні конструкції технологічного оснащення і різальні інструменти для нарізання різи і їх захисту від поломок, як в нормальному режимі так і під час перевантаження.**Ключові слова: технологічний процес, нарізання різи, високопродуктивні інструменти, пристрої, мітчики, запобіжний патрон.***Б.М. Гевко, О.Л. Ляшук, М.И. Клендий, Н.М. Марчук, Р.М. Котик  
ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ УСТРОЙСТВ И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ***Приведены прогрессивные конструкции технологической оснастки и режущие инструменты для резки рези и их защиты от поломок, как в нормальном режиме так и во время перегрузки.**Ключевые слова: технологический процесс, нарезанные рези, высокопроизводительные инструменты, устройства, метчики, предохранительный патрон.***В.М. Gevko, O.L. Lyashuk, M.I. Klendy, N.M. Marchuk, R.M. Kotyk  
TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION OF DEVICES AND RISAL TOOLS FOR PROCESSING  
OF CUTTING SURFACES***The progressive designs of technological equipment and cutting tools for cutting and defending against damage, both in normal mode and during overload, are presented.**Key words: process, chisel cutting, high-performance tools, devices, taps, safety chuck.*

**Постановка проблеми.** Широке використання різьбових з'єднань у машинобудуванні обумовлене їхньою простотою, високою несучою здатністю, експлуатаційною надійністю і довговічністю, а також зручністю з'єднання та роз'єднання деталей. Інтенсивний розвиток машинобудування тісно пов'язаний з розробленим прогресивних конструкцій технологічного оснащення для оброблення зовнішніх і внутрішніх поверхонь і різей. Відомо, що близько 60-70% деталей загального машинобудування сучасних машин і механізмів мають різьбові отвори, оброблення, яких ріжучими інструментами представляють собою складну технологічну задачу і особливо при виготовленні точних різьбових отворів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями захисту металорізальних верстатів і технологічного обладнання від перевантаження і поломки металорізальних інструментів присвячені праці Полякова В.С. [1], Ряховського О.А. [2], Малащин В.О. [3], Павлице В.Т. [4], Решетова Д.Н. [5], Тепинкичева В.К. [6], Иванова И.А. [7], Элиха Л.Б. [8], Анурьева В.И [9], Рогатинського Р.М. [10] та багатьох інших. Однак цілий ряд питань захисту від перевантажень як верстатів так і металоріжучих інструментів потребують свого вирішення.

Для більшості обладнання, його механізмів, деталей і ріжучих інструментів характерна робота в умовах змінних режимів навантаження. Система діючих навантажень має різну структуру в залежності від послідовності, порядку і числа різних технологічних операцій, переходів, робочих чи холостих ходів, форми поверхні оброблювальної деталі, різноманітних силових дій, тобто формується під дією періодичних і випадкових факторів.

**Мета роботи** – розробка конструкцій пристроїв ріжучих інструментів для нарізання різи і їх заміру від поломок.

**Результати досліджень.** Розроблена конструкція реверсивного патрона [11], особливістю конструкції якого є захист різальних інструментів при обробленні корпусних деталей і виходу їх з отворів від поломок і включені реверсивного їх виводу з отворів. При цьому обертовий рух передається зі шпінделя верстату на верхню конічну шестерню де спрацьовують сателіти – конічні шестерні і обертовий рух здійснюється в протилежну сторону і мітчик викручують з заготовки і захищають його від поломки.

Пристрій для нарізання гайок зігнутих мітчиком зображено рис.1, який виконано у вигляді станини 1, на якій встановлені всі вузли і деталі, а кожна із шестигранних секцій 2 знизу є у

взаємодії з заготовками гайок 3, відсувним диском 5, а магазин оснащений центральним механізмом повороту 6 кожної із шести секцій на 60°. Це шестигранний магазин 2 для подачі заготовок гайок 3, де у внутрішній корпус з шести сторін жорстко встановлені (приклеєні) пластичні пластини 4, які гасять динамічні навантаження при взаємодії з заготовками гайок.

Внизу під магазином 2 встановлена завантажувальна секція 7 з внутрішнім шестигранником з конусною зручною західною частиною для гайок 3, який є у періодичній взаємодії з зовнішніми гранями гайок з можливістю осьового переміщення, яка знизу підтримує потік гайок і за допомогою пневмоприжима 8 подає гайку до контакту з мітчиком 9, який лівим кінцем різцю загвинчується у внутрішній отвір 10 мітчика 9 в напрямок само закручування. Для мітчиків збільшених типорозмірів така конструкція, яка складається з двох деталей дає значну економію металу.

Знизу під завантажувальною секцією в станині жорстко встановлена на двох підшипниках 11 шестигранна труба 7 з можливістю кругового повертання. Зверху шестигранна труба виконана з індивідуальним приводом 12 зі зручним заходом шестигранних гайок в середині труби. Знизу шестигранна труба 7 встановлена співвісно до Г-подібної труби 13 дещо збільшеного діаметра і жорстко закріплена до станини 1.

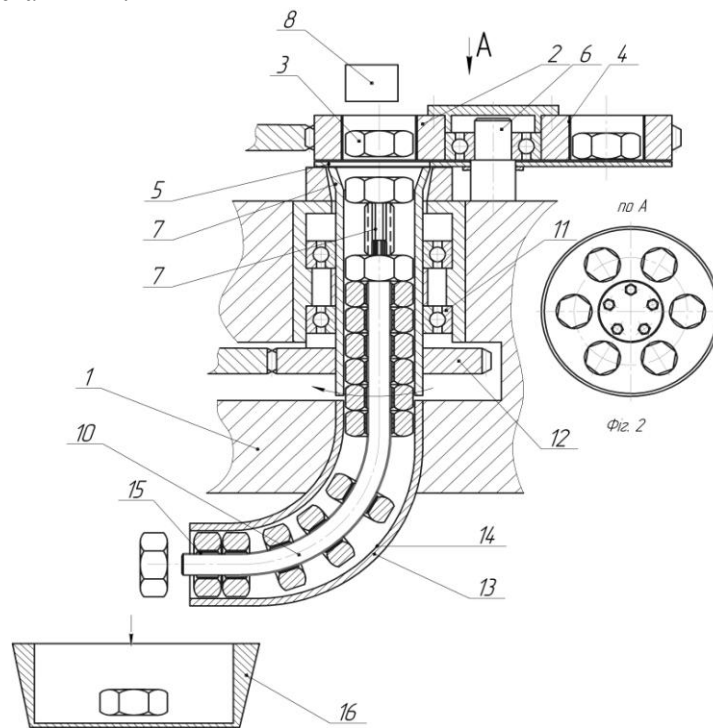


Рис. 1. Пристрій для нарізання різі в гайках

Г-подібний мітчик 10 дещо збільшених розмірів виконано з двох частин вертикальної верхньої, яка обертається і нижньої 15 Г-подібної, яка центрується в Г-подібній трубі із гайками 3. Зверху над завантажувальною позицією 8 магазину встановлено притискний механізм поверхні гайки 3 до верхньої ріжучої частини мітчика 9, який працює в автоматичному реверсному режимі відомим способом.

Для зменшення шуму при роботі пристрою у внутрішній отвір труби 13 жорстко встановлено пластичну трубу 14 (приклеєна), яка по внутрішньому діаметру є у взаємодії з зовнішніми параметрами гайок 3 з можливістю їх вільного осьового переміщення. На зовнішній діаметр Г-подібного хвостовика 10 жорстко одягнена пластична труба 15, яка зовнішнім діаметром є у взаємодії з внутрішніми діаметрами гайок для зменшення шуму від взаємодії гайок з Г-подібним хвостовиком.

При цьому гайка накручується і зміщується в зігнутій трубі 13, після чого прижим 8 подає наступну гайку 3 та інші де відбувається нарізання різі. При цьому гайки прошовують одна другу і по зігнутому хвостовику 14 вони переміщуються і збираються в ємкість 16. Використання пластмасових пружних труб 14, 15 і пластин 4 при нарізанні різі забезпечує безшумну роботу і покращує умови роботи при неперервній подачі мастила.

При наповненні ємкості 16 її забирають і встановлюють нову порожню.

До переваг пристрою відноситься зменшення шуму і покращення умов роботи.

Розроблена конструкція мітчик-протяжка (рис. 2) [12], яка виконана у вигляді збірного інструмента, де циліндрична поверхня валу 1 виконана з хвостовиком 2 прямокутного поперечного січення із шпоночними канавками 3, які є у взаємодії з внутрішніми шпоночними пазами окремих ріжучих секцій 4, 5, 6 через шпонки. Причому ріжучі канавки на окремих ріжучих секціях повинні бути на одній лінії. Секції протяжок мають по 3...6 поздовжніх канавок 6 для виходу стружки. При цьому на робочій частині секцій мітчика-протяжки по зовнішньому діаметру прорізані гвинтові стружки канавки 7, напрямом яких є протилежним напрямку витків різі зі змінними кроками.

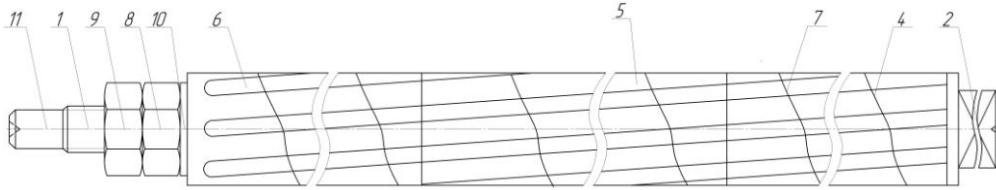


Рис. 2. Мітчик-протяжка

Протяжні елементи мають свої підйоми на зуб по мірі збільшення розмірів діаметрів. Крім цього на початку валу 1 нарізана різь, яка є у взаємодії з затискною гайкою 8 і контргайкою 9, при цьому упорні збірні елементи мітчика протяжки в разі потреби є у взаємодії з упорними мідними шайбами прокладок 10, а кінець валу 11 виконаний циліндричної форми, який є опорою інструмента при його нарізанні різі.

Для нарізання різби розточено по внутрішньому діаметру заготовку надягають на хвостовик мітчика-протяжки (на кресленні не показано), а кінець валу 11 вставляють в отвір державки, встановленої і закріпленої в різцетримачі токарного верстату, і кріплять клином. Перед цим отвір державки встановлюють по лінії центрів верстату. Після закріплення заготовки в патроні верстату здійснюється нарізання різби при обертанні деталі і поздовжній подачі (зліва на право) мітчика-протяжки від ходового гвинта верстату, рівній кроку нарізної різби. Продуктивність при нарізанні двох-трьохзахідних гайок з трапецеїдальною різьбою збільшується в 5-10 раз в порівнянні з багато проходною обробкою різбовим різцем (згідно Аршинова В.А. – прототипу). Рекомендують мітчик-протяжку [6] застосовувати для нарізання різб різних параметрів діаметрами 8-75мм, довжиною 30...150мм, 5,7 класів чистоти.

До переваг інструменту відноситься розширення технологічних можливостей і значне підвищення продуктивності праці.

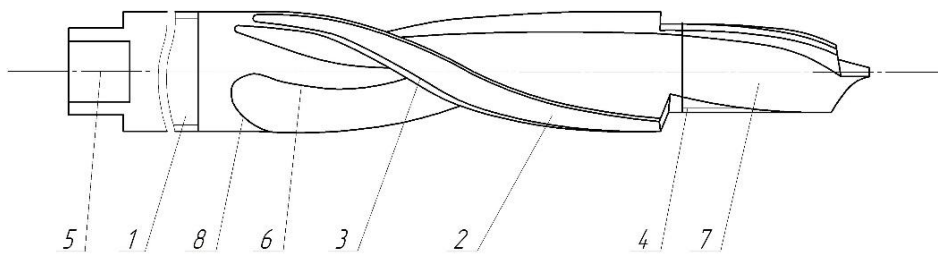


Рис. 3. Сверло-мітчик

На рис. 3 зображено комбіноване сверло-мітчик [13], що виконано у вигляді комбінованого ступінчастого свердла 1 з чотирма ріжучими стрічками 2 на обох ступенях, а ріжучі кромки свердла на більшій ступені розвернуті відносно кроком меншої ступені 3 на 35...45°.

Крім цього на ріжучих кромках двох ступенів виконані виїмки 4 для подрібнення стружки і покращення умов відведення стружки. В хвостовій частині інструменту виконано різбовий отвір для його кріплення в пристрої чи верстаті 5 і для підведення охолоджуючої рідини в зону різання 6.

Крім цього на ріжучій частині меншого діаметра 6 зверху нарізана різь 7 для розширення технологічних можливостей інструмента. В разі потреби і на більшому діаметрі 7 свердла теж виконана різь 8 для розширення технологічних можливостей. Робота свердла мітчика здійснюється наступним чином. Воно жорстко кріпиться в шпінделі верстату за допомогою оправки і її різбовим отвором 5 свердла-мітчика. Оправка має центральний отвір через який поступає охолоджуюча рідина в зону різання при обертанні свердла і здійснювання технологічного процесу свердління і нарізання різі з двох сторін обох ступеней свердла позиції.



До переваг комбінованих інструментів свердло-мітчик відноситься можливість послідовного виконання кількох переходів без змін інструментів. Їх, як правило, використовують для виготовлення наскрізного різьбового отвору.

Безканавочний мітчик зображено на рис.4 [14], виконано у вигляді гвинта 1, вздовж осі якого рівномірно по колу прорізані, наприклад гвинтові канавки 2, які розміщені під кутом  $\alpha=10...13^\circ$  до осі мітчика і вони направлені протилежно напрямку різі. Форма хвостовика укорочені квадратної форми 3, радіальні розміри якого є меншими зовнішнього діаметра тіла мітчика. А на двох плоских протилежних поверхнях 4 виконані фасонні виїмки 5, які є у взаємодії з кульками 6, які підпружинені по осі мітчика пружиною 7 і вони за вальцьовані з можливістю їх утримання в тілі з'єднувальної втулки 8. При цьому зовнішня квадратна поверхня тіла мітчика є у взаємодії з внутрішнім квадратним отвором 9 приводної оправки 10 з квадратним закінченням 11, яким мітчик приводиться в рух під час нарізання різі.

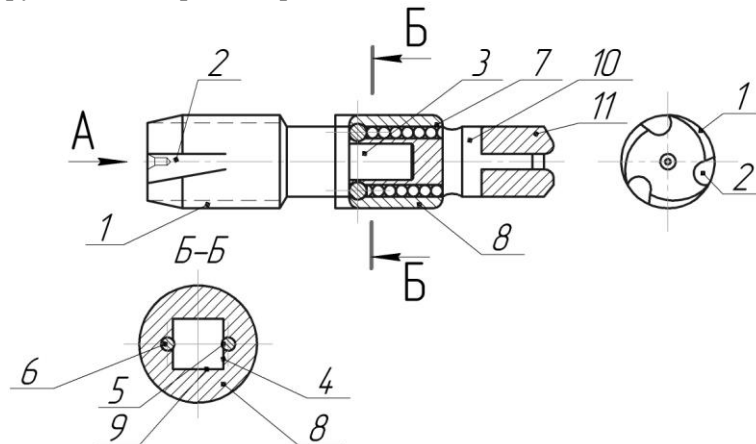


Рис. 4. Безканавочний мітчик

Ці мітчики доцільно використовувати при нарізанні глухих або наскрізних отворів в кількості 2...3 в комплекті.

До переваг мітчика відноситься покращення умов їх роботи, відведення стружки, який формує чистішу поверхню і особливо при роботі із в'язкими матеріалами. Вони також забезпечують більшу щільність переточувань мітчиків, дає можливість уникати з'їдань отворів і їх поломки.

Універсальний пристрій для швидкісного нарізання різі рис.5, який виконано у вигляді корпуса 1, який встановлено на місці різцетримальної головки, знаходиться піноль 2 з закріпленням в ній сухарем 3. В корпусі знаходиться копірувальний валок 4 прямокутного поперечного січення 5, причому кожна із площин розрахована на певний тип різі. Під дією пружин 6 і сухаря 3 постійно знаходиться в контакті з копірувальним валком 4. Перед початком нарізання різі сухар 3 впирається на верхню площину 5 копірувального валка 4, який утримується пружиною 6 в крайньому лівому положенні. В процесі нарізання різі, коли супорт разом з пристроєм рухається по напрямленню до передньої бабки, торець копірувального валка 4 з закріпленням в ньому регулювальним упором 7 зустрічає на своєму шляху упор 8, який його зупиняє і тим самим заставляє його переміщатися в корпусі пристрою в напрямку оберненому зворотному напрямку руху супорта і стискаючи пружину 9.

В момент, коли скос на валку 4 ввійде в контакт з сухарем 3, різьбовий різець 10, який закріпленням в пінолі 2 плавно починає виходити з різі. На вихід різця з різі потребується 0,02-0,05с. при прокольній подачі супорта в напрямку до передньої бабки 40...100мм/с.

Після виходу різця 10 з різі виключають маточну гайку, або переключують фрикціон на обернений хід і переводять у вихідне положення. Потім за допомогою рукоятки 11 повертають ексцентрик 12, який подає в піноль 2 вперед до тих пір поки сухар 3 не перестане дотикатися валка 4. в цей момент пружина 9 повертає валок 4 в початкове положення. Після цього повертають у вихідне положення ексцентрик 12.

В корпусі 1 під копіювальним валком 4 жорстко встановлена півкругла підставка 13 для забезпечення нормальних умов роботи копірувального валка 4, а на правому торці копірувального валка 4 нанесені мітчик I, II, III, IV робочих поверхонь різей під копірувальний валок 4 деталі 14.

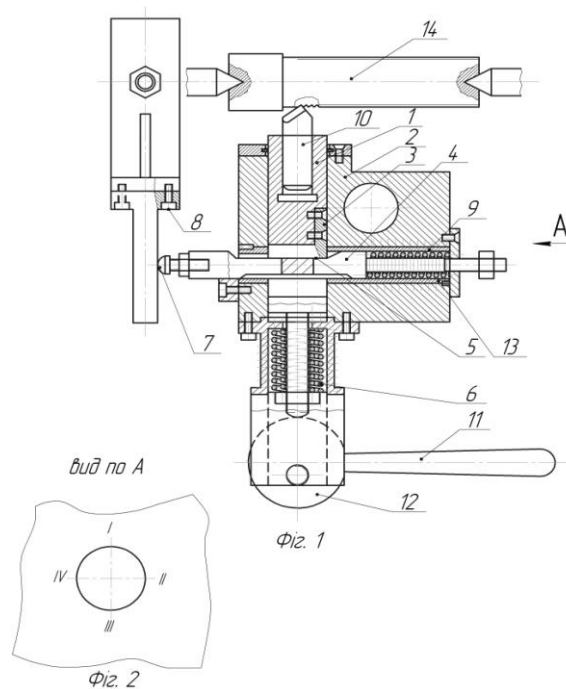


Рис. 5. Універсальний пристрій для швидкісного нарізання різі

В разі зміни профілю нарізання різі копірувальний валок 4 переустановлюють на необхідну різь, його встановлюють в пристрій і здійснюють подальшу роботу пристроєм.

До переваг пристрою для швидкісного нарізання різі є плавний вихід різця з різі в одній і тій точці деталі є зменшення втомленості робочого, покращення якості різі в декілька разів підвищення продуктивності праці, при цьому швидкість продольного супорта в напрямку до передньої бабки знаходиться в межах 40...100%. [15].

**Висновки.** На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

Розроблено технологічне оснащення і різальні інструменти для нарізання різей, які забезпечують підвищення продуктивності праці, підвищення міцності і експлуатаційної надійності і довговічності і захисту від поломок.

Розроблені конструкції захищені деклараційними патентами України на винаходи.

#### Список використаних джерел:

1. Поляков В.С., Барабаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам. -Л.:Машиностроение, 1979.-344с.
2. Ряховский О.А., Иванов С.С. Справочник по муфтам. -Л.:Политехника, 1991.-383с.
3. Малащенко В.О. Муфты приводів. Конструкції та приклади розрахунку. Навчальний посібник - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – 196 с.
4. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. - К.: Вища школа, 1993. – 556 с.
5. Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков. –М.:Машиностроение,1972.
6. Тепинкичев В.К. Предохранительные устройства от перегрузки станков. – М.:Машиностроение, 1968.-109с.
7. Иванов Е.А. Муфты приводов. М.:Машгиз 1959.
8. Эрмих Л.Б. Справочник машиностроителя. Том 4. Предохранители от перегрузки. М.:Машгиз, 1955.
9. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3<sup>х</sup> томах. М.:Машиностроение, 1979-1982.-728с.
10. Рогатинський Р.М., Гевко І.Б., Дячун А.Є. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів. Тернопіль, 2014 ТНТУ.
11. Патент №107031 Реверсивний патрон для нарізання різі. Марчук Н.М. та інші. Бюл.№10,2016.
12. Патент №107215, Мітчик протяжка. Марчук Н.М. та інші. Бюл.№10,2016.
13. Патент № 106937 Комбіноване сверло-мітчик. Марчук Н.М. Бюл.№9,2016.
14. Патент №124001 Безканавочний мітчик. Марчук Н.М. та інші. Бюл.№5,2018.
15. Семенський В.К. и др.. Приспособления и инструменты для токарных работ. К.: Техніка, 1977.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 621.86

**Б.М. Гевко, І.І. Стойко, В.М. Клендій, Н.М. Марчук**  
 Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТІЙКОСТІ СВЕРЛА-МІТЧИКА М7-7Н**

*Досліджено стійкість сверла-мітчика М8\*125 при сверлінні отворів і нарізанні різі на вертикально-свердильному верстаті ЧПК2Р135Ф2. Матеріал листовий прокат товщиною 8мм, Сталь 08КП, Сталь20 і Ст45.*  
*Ключові слова:* міцність, стійкість інструменту, різання матеріалів, режими різання.

**Б.М. Гевко, І.І. Стойко, В.М. Клендій, Н.М. Марчук**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ СВЕРЛА-МЕТЧИКОВ М7-7Н**

*Исследована устойчивость сверла-метчика М8 \* 125 при сверления отверстий и нарезании резьбы на вертикально-свердильном станке ЧПК2Р135Ф2. Материал листовой прокат толщиной 8мм, Сталь 08КП, Сталь20 и Ст45.*  
*Ключевые слова:* прочность, стойкость инструмента, резки материалов, режимы резания.

**B.M. Gevko, I.I. Stoyko, V.M. Klendii, N.M. Marchuk**  
**RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDY STUDY OF SQURLA MITCHIC M7-7N**

*The stability of the M8 \* 125 drill bit is explored when drilling holes and cutting a cut on a vertical drilling machine CHPK2P135F2. The material is flat-rolled 8mm thick, Steel 08KP, Steel20 and St45.*  
*Key words:* strength, tool stability, cutting materials, cutting modes.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями дослідження міцності і стійкості різальних інструментів присвячені праці Вульфа А.М. [1], Костецький Б.І. [2], Крагельський І.В. [3], Макаров А.Д. [4], Ординарцев І.А. [5], Семенченко І.А. [6], Четвериков С.С. [7], Шагалова З.Ю. [8], Аршинов В.А. [9].

**Постановка питання.** Процес різання дуже складний. Результати його визначаються багатьма параметрами, іноді скритого характеру. Нерівномірність фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, його анізотропія, велика глибина фрезерування, деформування і нагрів, зміна різальної крайки зуба фрези, різні фізико-хімічні ефекти (налипання, окисні плівки тощо) появляються і зникають в процесі різання, і інші візуально непомітні фактори значно відбиваються на стійкості різального інструменту – нестабільність матеріалу інструменту, термічної обробки і заточки інструменту, його неконтрольовані параметри (мікрогеометрія різальної крайки, радіус її заокруглення), зміна зони жорсткості у зв'язку з режимами роботи верстата – все це у великій степені впливає на стійкість інструменту, а в кінцевому результаті – на продуктивність.

**Метою.** Метою експериментальних досліджень є дослідження стійкості мітчика у комбінованому інструменті свердло-мітчик, що у першу чергу дозволить обґрунтувати параметри обох інструментів у комбінації свердло-мітчик, оскільки стійкість комбінованого інструменту залежить якраз від стійкості мітчика, оскільки у свердлі можлива необмежена кількість переточок.

Експеримент проводимо за методикою, розробленою проф. Боксом при вивченні оптимізації процесів хімічної технології і в 1964 році застосований для випробування стійкості різального інструменту [3]. Він носить назву «метод оптимального планування». Для експериментального визначення стійкості свердла-мітчика створюється математична модель, яка описує поведінку даної організованої системи. Вона дає представлення про поведінку даної системи із зміною ряду факторів і створюється на основі досліджень. Комбінований інструмент свердло-мітчик зображено на рис. 1.

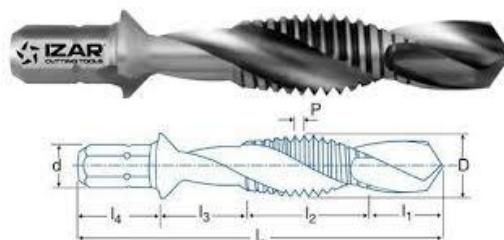


Рис. 1. Комбінований інструмент свердло-мітчик

Матеріал інструменту HSSG-E має наступний хімічний склад: С – 0,93%, Cr – 4,2%, Мо – 6,4%, W – 6,4%, V – 1,8%, Со – 5%.

Дослідження стійкості свердла-мітчика М8×1,25 проводимо на вертикально-свердильному верстаті з ЧПК 2P135Ф2. Матеріал – листовий прокат товщиною 8 мм із сталі 08кп, сталь 20 і сталь 45.

Для визначення стійкості інструменту «свердло-мітчик» використовуємо математичну модель зміни стійкості.

Зміна стійкості інструменту  $T$  залежно від швидкості різання  $v$ , подачі на зуб  $s_z$  (визначається кількістю західних зубів мітчика) і твердістю оброблювального матеріалу  $HB$  визначається математичною моделлю [3]:

$$Tm = C v s_z^p HB^q \quad (1)$$

У даній залежності приймаємо  $T$  – залежна і  $v$ ,  $s_z$ ,  $HB$  – незалежні змінні.

Треба обмовитися: математична модель не описує систему в цілому, а лише окремий комплекс факторів, які нас цікавлять.

В логарифмічному масштабі рівняння буде поліномом першого степеню:

$$\ln T = \frac{\ln C}{m} + \frac{1}{m} \ln v + \frac{p}{m} \ln s_z + \frac{q}{m} \ln HB$$

або, враховуючи помилки експерименту  $\varepsilon$ ,

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \varepsilon \quad (2)$$

Експеримент плануємо на основі багатофакторного аналізу, тобто одночасно варіюємо усі змінні фактори,  $x_1(v)$ ,  $x_2(s_z)$ ,  $x_3(HB)$ . Необхідно визначити постійну  $b_0$  і коефіцієнти  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ . Кожна із цих змінних варіюється на двох рівнях ( $2^k$ ), де  $k$  – число змінних.

Швидкість різання досліджуємо для 3, 5, 8 м/хв., що відповідає обертам фрези 120, 200, 320 об/хв. відповідно; подачу на зуб мітчика використовуємо 0,18 (7 західних зубів), 0,25 (5 західних зубів) 0,38 (3 західні зуби) мм/зуб; твердість матеріалу сталі  $HB$  – 126 (сталь 08кп), 159 (сталь 20), 193 (сталь 45).

План дванадцяти дослідів передбачає дві серії по шість дослідів у кожній – шість основних і шість додаткових. Вибір режимів обробки проводиться таким чином, щоб спростити кодування із врахуванням можливостей обладнання і граничних режимів обробки, як це показано у табл.1.

Таблиця 1

Режими різання і кодові позначення

Рівень	Режими дослідження			Кодові позначення		
	$v$ м/х в.	$s_z$ мм/зу б	$HB$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Верхній	8	0,38	193	1	1	1
Середній	5	0,25	159	0	0	0
Нижній	3	0,18	126	-1	-1	-1

Ці рівні закодовані за допомогою рівнів перетворення таким чином, щоб верхній рівень відповідав +1, а нижній -1.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\ln v - \ln 8)}{(\ln 8 - \ln 3)} + 1 \\ x_2 &= \frac{2(\ln s_z - \ln 0,38)}{(\ln 0,38 - \ln 0,18)} + 1 \\ x_3 &= \frac{2(\ln HB - \ln 193)}{(\ln 193 - \ln 126)} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Тут, в плані експерименту, наприклад, за одиницю швидкості нарізання різі прийнята величина  $\frac{\ln 8 - \ln 3}{2}$ . Таким чином швидкість нарізання різі  $v$  перетворюється шляхом ділення її

на прийнятті одиницю.

Аналогічно поступаємо з подачею  $s_z$  і твердістю  $HB$ . Для спрощення розрахунків композиційний план будується згідно так званого "італійського куба" [3], побудованого на трьох ортогональних координатах з початком в центрі куба (рис. 2). На вершинах куба позначені номери дослідів, режимів нарізання різі і твердості матеріалу заготовки згідно табл. 2.

Дослідні точки позначені темними кружками згідно перших чотирьох дослідів; додатково два досліді ставляться в центрі куба для перевірки гіпотези адекватності (досліді 9 і 10). Якщо гіпотеза адекватності не проходить, виконуємо ще шість дослідів: добудовуються ще вершини куба (позначені кружками) і ще два досліді в центрі.

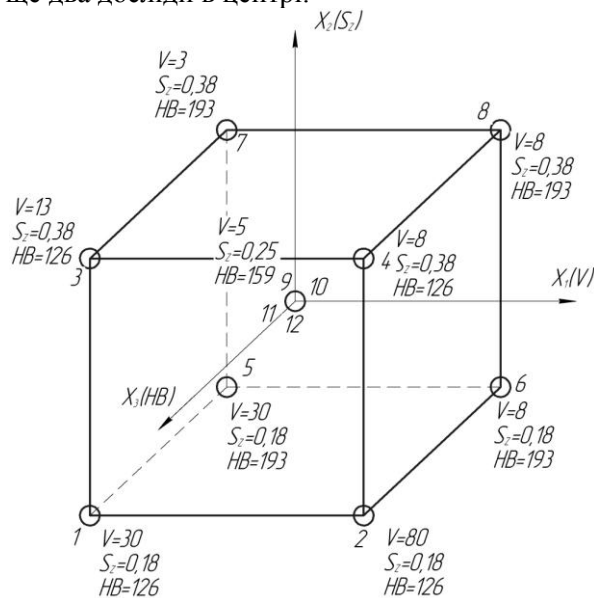


Рис 2. Композиційний план дослідження згідно "італійського куба"

Таблиця 2

Режими різання, твердість матеріалу, кодові значення і стійкість інструменту

№ з/п	№ серії	Режими різання			Кодові позначення			T, хв.	y=lnT
		v, м/хв.	s <sub>z</sub> , мм/зуб	HB	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>		
1	2	3	0,18	126	-1	-1	-1	90	4,49
2	1	8	0,18	126	1	-1	-1	60	4,09
3	1	3	0,38	126	-1	1	-1	70	4,24
4	2	8	0,38	126	1	1	-1	45	3,81
5	1	3	0,18	193	-1	-1	1	35	3,55
6	2	8	0,18	193	1	-1	1	25	3,21
7	2	3	0,38	193	-1	1	1	20	2,99
8	1	8	0,38	193	1	1	1	12,5	2,52
9	1	5	0,25	159	0	0	0	40	3,68
10	1	5	0,25	159	0	0	0	45	3,8
11	2	5	0,25	159	0	0	0	40	3,68
12	2	5	0,25	159	0	0	0	45	3,8

Оцінка параметрів.

На основі результатів серії №1 із шести дослідів зручно оцінити чотири коефіцієнти в емпіричній формулі

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3,$$

використовуючи метод найменших квадратів і властивості скалярного добутку основних векторів.

Згідно способу найменших квадратів необхідно, щоб сума квадратів відхилень фактичних значень у від формальних, отриманих за рівнянням (3)  $y_{x_1x_2x_3}$ , була найменшою, тобто:

$$\Sigma(y-y_{x_1x_2x_3})^2 = \min \tag{4}$$

Ліву частину виразу (4) позначимо буквою  $f$  ( $f$  – функція від невідомих параметрів  $b_0, b_1, b_2, b_3$ ).

Мінімум цієї функції знайдемо із рівнянь:

$$\frac{df}{db_0} = 0; \quad \frac{df}{db_1} = 0; \quad \frac{df}{db_2} = 0; \quad \frac{df}{db_3} = 0. \quad (5)$$

Продиференціювавши, напишемо систему цих рівнянь у кінцевому вигляді:

$$\begin{aligned} \sum y &= nb_0 + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + b_3 \sum x_3; \\ \sum yx_1 &= b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3; \\ \sum yx_2 &= b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_2 x_1 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3; \\ \sum yx_3 &= b_0 \sum x_3 + b_1 \sum x_3 x_1 + b_2 \sum x_3 x_2 + b_3 \sum x_3^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння (6) дають можливість визначити  $b_0 = \frac{\sum y}{n}$ , де  $n$  – число дослідів;  $n = 6$ .

$$b_1 = \frac{\sum yx_1}{\sum x_1^2} = \frac{\sum yx_1}{4}; \quad b_2 = \frac{\sum yx_2}{\sum x_2^2} = \frac{\sum yx_2}{4}; \quad b_3 = \frac{\sum yx_3}{\sum x_3^2} = \frac{\sum yx_3}{4}. \quad (7)$$

Необхідно додати, що інші члени рівнянь (6) будуть рівні нулю, оскільки вектори  $x_1, x_2, x_3$  є ортогональними і  $\sum x_i = 0$ .

Очевидно, було б простіше не вирішувати рівнянь (4)–(6), а використати матриці  $(x'x)$  і  $(x'x)^{-1}$ :

$$x'x = \begin{vmatrix} 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{vmatrix}, \quad [x'x]^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{vmatrix}.$$

Залежності для визначення коефіцієнтів  $b_0 \dots b_3$  згідно рівнянь (7) будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= 1/6(y_2 + y_3 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10}) \\ b_1 &= 1/4(y_2 - y_3 - y_5 + y_8) \\ b_2 &= 1/4(-y_2 + y_3 - y_5 + y_8) \\ b_3 &= 1/4(-y_2 - y_3 + y_5 + y_8) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Тут індекси при  $y$  визначають номери дослідів (табл. 2).

Підставляючи в останні рівняння (8) значення дослідів із табл. 2, отримаємо:

$$b_0 = \frac{1}{6}(4,09 + 4,24 + 3,55 + 2,52 + 3,68 + 3,80) = 3,65;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(4,09 - 4,24 - 3,55 + 2,52) = -0,3;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-4,09 + 4,24 - 3,55 + 2,52) = -0,22;$$

$$b_3 = \frac{1}{4}(-4,09 - 4,24 + 3,55 + 2,52) = -0,57.$$

У цьому випадку для серії дослідів №1 отримаємо формулу для визначення стійкості прорізних фрез:

$$\ln T \approx 3,65 - 0,3x_1 - 0,22x_2 - 0,57x_3. \quad (9)$$

Формулу (9) необхідно розшифрувати згідно рівнянь (3), тобто:

$$x_1 = \frac{2(\ln v - \ln 8)}{\ln 8 - \ln 3} + 1 \approx \frac{2(\ln v - 2,07)}{2,07 - 1,09} + 1 = 2,04 \ln v - 4,22;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln s_z - \ln 0,38)}{\ln 0,38 - \ln 0,18} + 1 \approx \frac{2(\ln s_z + 0,96)}{-0,96 + 1,71} + 1 = 2,66 \ln s_z + 3,55;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln HB - \ln 193)}{\ln 193 - \ln 126} + 1 \approx \frac{2(\ln HB - 5,26)}{5,26 - 4,83} + 1 = 4,65 \ln HB - 23,46.$$

Підставляємо значення  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  в рівняння (9) і отримуємо уточнену формулу для визначення логарифма стійкості фрези:

$$\ln T = 3,65 - 0,3(2,04 \ln v - 4,22) - 0,22(2,66 \ln s_z + 3,55) - 0,57(4,65 \ln HB - 23,46) = 14,98 - 0,61 \ln v - 0,58 \ln s_z - 2,65 \ln HB.$$

Отже, кінцева формула для визначення стійкості комбінованого свердла-мітчика для оброблення сталених деталей прийме вигляд:

$$T = \frac{e^{14,98}}{v^{0,61} s_z^{0,58} HB^{2,65}} = \frac{3,06 \times 10^6}{v^{0,61} s_z^{0,58} HB^{2,65}}, \text{ хв.} \quad (10)$$

Після статистичного аналізу результатів серії №1, коли виявилися сильно великі інтервали стійкості для 95% достовірності, були виконані ще шість дослідів серії №2 досліджень.

В результаті всіх 12 дослідів відповідно до вище наведених розрахунків і табл. 2, отримуємо уточнені коефіцієнти для визначення стійкості свердла-мітчика:

$$b_0 = \frac{1}{12} \left( 4,49 + 4,09 + 4,24 + 3,81 + 3,55 + 3,21 + 2,99 + 2,52 + 3,68 + \right. \\ \left. + 3,80 + 3,68 + 3,80 \right) = 3,65;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (-4,49 + 4,09 - 4,24 + 3,81 - 3,55 + 3,21 - 2,99 + 2,52) = -0,21;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} (-4,49 - 4,09 + 4,24 + 3,81 - 3,55 - 3,21 + 2,99 + 2,52) = -0,22;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} (-4,49 - 4,09 - 4,24 - 3,81 + 3,55 + 3,21 + 2,99 + 2,52) = -0,54.$$

$$\ln T = 3,65 - 0,21(2,04 \ln v - 4,22) - 0,22(2,66 \ln s_z + 3,55) - 0,54(4,65 \ln HB - 23,46) = 14,85 - 0,42 \ln v - 0,58 \ln s_z - 2,51 \ln HB$$

$$T = \frac{e^{14,85}}{v^{0,42} s_z^{0,58} HB^{2,51}} = \frac{2,2 \times 10^6}{v^{0,42} s_z^{0,58} HB^{2,51}}, \text{ хв.} \quad (11)$$

Аналіз формули (11) показує, що результат обчислення мало відрізняється від результату, отриманого за формулою (10), але 95-процентні довірчі інтервали значно покращилися завдяки більшій кількості дослідів.

Діаграма зміни стійкості від твердості оброблювального матеріалу зображена на рис. 3



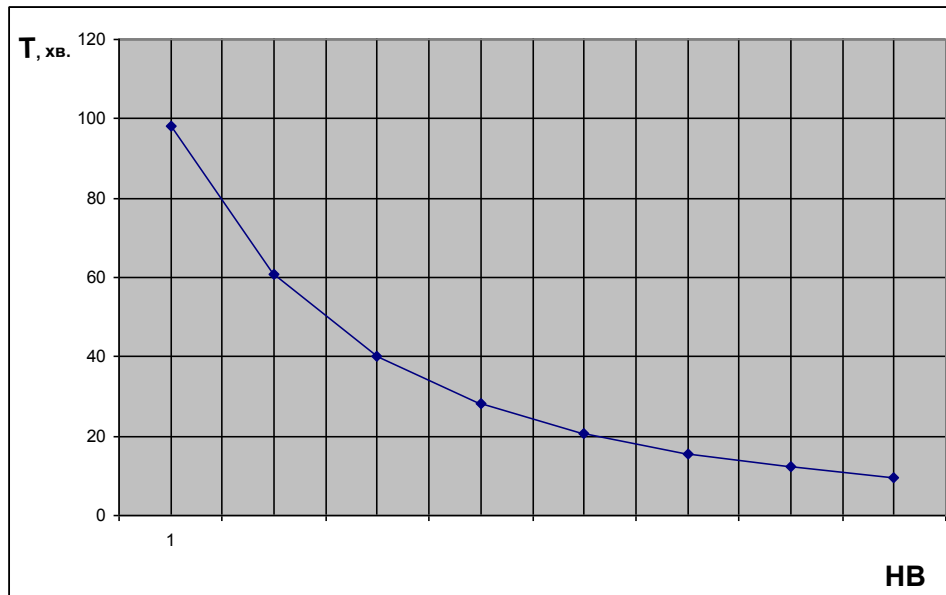


Рис. 3. Діаграма зміни стійкості мітчика від твердості оброблювального матеріалу

**Висновки.** На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Досліджено стійкість мітчика у комбінованому виконанні зі сверлом вертикально-свердлильному верстаті ЧПК2Р135Ф2. Матеріал – листовий прокат товщиною 8мм, Сталь 08КП, Сталь20 і Ст45. Для проведення досліджень використовували математичну модель зміни стійкості. Залежно від швидкості різання, подачі на зуб і твердості оброблюваного матеріалу.

2. Досліджено зміни стійкості від твердості оброблювального матеріалу.

#### Список використаних джерел:

1. Вульф А.М. Резание метал лов. Л.:Машиностроение. 1973, 495с.
2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и знос в машиностроении. М.: Машиностроение. 1970, 396с.
3. Крагельский И.В. Трение и знос. М.:Машиностроение. 1968, 480с.
4. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.:Машиностроение. 1966, 264с.
5. Ординарцев и.А. Справочник инструментальщика. Л.:Машиностроение. 1987, 848с.
6. Семенченко И.И. и др.. Проектирование метало-режущих инструментов. М.:Машгиз, 1962, 950с.
7. Четвериков с.С. Металорежущие инструменты. М.:Висшая школа. 1965, 650с.
8. Шагалова З.Ю., Сиротенко Н.Г. Конструювання різального інструменту. Видавн. Вища школа. К. 1970, 266с.
9. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. М.:Машиностроение. 1976, 440с.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК621.81

**О.Я. Гурик<sup>1</sup>, Н.М. Марчук<sup>1</sup>, В.В. Гупка<sup>1</sup>, В.І. Диня<sup>2</sup>, О.В. Фльонц<sup>2</sup>, І.І. Семенів<sup>2</sup>**  
*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя<sup>1</sup>*

*Відокремлений підрозділ НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»<sup>2</sup>*

### **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИГОТОВЛЕННЯ ВНУТРІШНІХ БАГАТОГРАННИКІВ**

*Приведена конструкція пристрою для прошивання внутрішніх багатогранників в болтах, метизах та інших деталях. Розраховані режими роботи.*

*Ключові слова: технологічний процес, внутрішні багатогранники, прошивання, пуансон.*

**О.Я. Гурик, Н.М. Марчук, В.В. Гупка, В.И. Дыня, А.В. Фльонц, И.И. Семенов**  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ**  
**МНОГОГРАННИКОВ**

*Приведена конструкция устройства для прошивки внутренних многогранников в болтах, метизов и других деталях. Рассчитаны режимы работы.*

*Ключевые слова: технологический процесс, внутренние многогранники, прошивки, пуансон.*

**O. Gurik, N. Marchuk, V. Hupka, V. Dyna, O. Flonts, I.I. Semenov**  
**TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURE OF INTERNAL MIGRATORIES**

*The design of the device for framing internal polyhedra in bolts, hardware and other details is given. Calculated modes of operation.*

*Key words: technological process, internal polyhedra, flashing, punch.*

**Постановка питання.** Виготовлення внутрішніх багатогранників може мати широке використання при виготовленні болтів, кріпильних елементів машин і механізмів, штампового оснащення метизів з внутрішніми багатогранниками та інше.

З'єднання деталей машин є дуже важливим елементом конструкції. Існують нерухомі і рухомі з'єднання. До рухомих з'єднань відносяться різьбові з'єднання, які дозволяють виконувати операції збирання і розбирання без пошкодження елементів з'єднання.

З'єднання деталей машин є дуже важливим елементом конструкції машини чи механізму, бо багато аварій або порушень нормальних режимів роботи машини обумовлено незадовільною міцністю та надійністю з'єднань.

Широке використання різьбових з'єднань у машинобудуванні обумовлене їхньою простотою, високою несучою здатністю, надійністю, а також зручністю з'єднань та роз'єднань деталей. Застосуванню різьбових з'єднань сприяють також наявність значної номенклатури спеціальних різьбових деталей, пристосованих до різних конструктивних варіантів з'єднань їхня широка стандартизація та мала вартість в умовах масового виробництва і використання.

Для забезпечення вимог міцності, надійності, довговічності вузлів машин здійснюють відповідні конструктивні елементи метизів – це внутрішні багатогранні отвори, які забезпечують надійність закріплення елементів конструкції кріпильними елементами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями пов'язаними з технологічним оснащенням і технологічними процесами прошивання внутрішніх багатогранників приймали участь: Грановський Г.І. [1], Аршинов В.А. [2], Руденко П.О. [3], Боженко Л.І. [4], Романовський В.П. [5], Решетов Д.М. [6], Аміров Ю.Д. [7], Панов Е.А. [8], Гевко Б.М. [9], Красніков В.Ф. [10] та інші. Однак цілий ряд питань виготовлення внутрішніх багатогранників різьбових деталей, метизів та інше потребують подальших досліджень.

**Мета роботи** – розробити універсальний пристрій для виготовлення багатогранників в головках метизів для надійного закріплення елементів конструкції машин.

**Реалізація роботи.** Пристрій для виготовлення внутрішніх багатогранників зображено на рис.1 [11], який виконано у вигляді кронштейна 1, який закріплено в різцетримачі 2 токарного верстата. Внутрішній конічний отвір 3 кронштейна 1 є у взаємодії з конічним конусом 4, всередині якого на підшипниках радіальному 5 і упорному 6 встановлено шпindel 7 з можливістю кругового повертання.

Лівий базуючий кінець 8 пуансона 9 виконано конічної форми, який у взаємодії з конічним отвором, який виконано на кінці шпинделя 7 і закріплений гвинтом 10, який встановлено під кутом і здійснює затиск пуансона 9 в конічному отворі шпинделя. Крайній лівий кінець багатогранного пуансона 9 виконана з оберненим конусом 1,5°.

З торця пуансона по його центру виконано конічну поверхню з загостренням пуансона під кутом  $\alpha \approx 3...5^\circ$  для полегшення прошивання багатогранників у внутрішніх отворах заготовок 11.

Отвір під прошитий багатогранник повинен бути рівним колу вписаному в цей багатогранник.

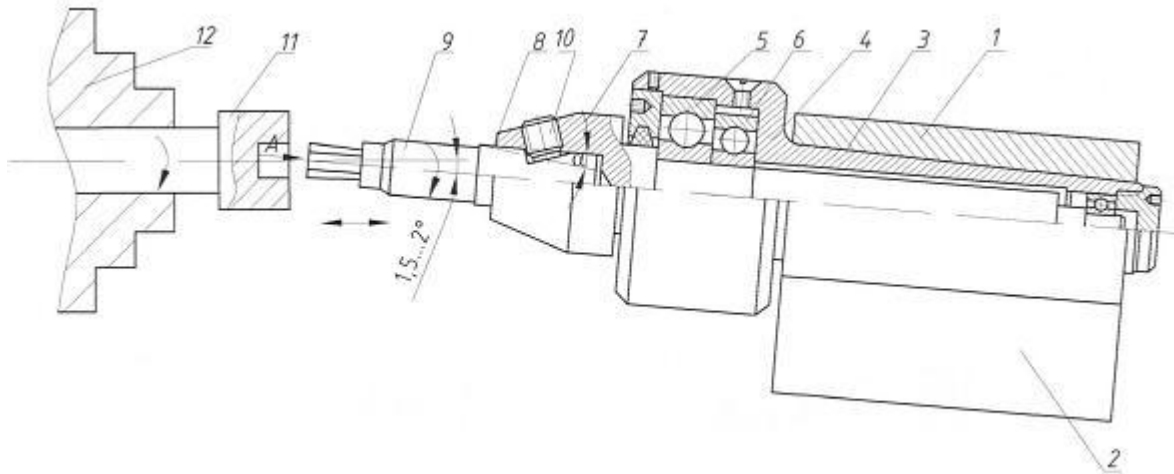


Рис.1. Пристрій для виготовлення внутрішніх багатогранників [11]

Робота пристрою здійснюється наступним чином. Пристрій жорстко закріплюють в різцетримачі токарного верстата, при цьому вісь пуансона 9 повинна бути нахилена в межах  $1...1,5^\circ$  до осі верстата. В патроні 12 токарного верстата закріплюють заготовку болта 11, в отвір заготовки підводиться торець пуансона, вмикається верстат в межах  $1,5...2$  тис. об/хв. і здійснюється рух осевої подачі, і при цьому здійснюється процес формування багатогранника. Після закінчення процесу пристрій відводиться вправо від заготовки і вона знімається з патрона 12.

Зменшення зусилля формоутворення здійснюється за рахунок відцентрових сил в заготовці, які сприяють зменшенню зусилля прошивання і підвищенню якості формоутворення.

Розрахунок технологічного процесу прошивання внутрішніх багатогранників складається з двох складових. Це зусилля прошивання отвору, його визначають із співвідношення [10]

$$P = KS \cdot \sigma_{zp} \quad (1)$$

де,  $K$  – коефіцієнт, який залежить від марки матеріалу заготовки і відцентрової швидкості її обертання і визначається експериментально;  $S$  - площа зрізу,  $\text{мм}^2$ ;  $\sigma_{zp}$  - напруження зрізу,  $\text{кг/мм}^2$ .

Величину відцентрової сили визначають із залежності

$$P_{\text{від}} = \frac{mV^2}{R_{\text{cp}}}, \quad (2)$$

де,  $m$  - маса головки заготовки,  $\text{мм}^3$ ,  $V$  - швидкість обертання заготовки,  $\text{м/с}$ ;  $R_{\text{cp}}$  - середній радіус головки заготовки,  $\text{мм}$ .

До переваг пристрою належить розширення технологічних можливостей, підвищена якість прошивання і зменшення зусилля формоутворення.

На точність оброблення впливає ряд факторів, які викликають сумарну похибку  $\Delta_{\Sigma}$ :

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{1}{K} \sqrt{(K_1 \Delta_{\varepsilon_y})^2 + (K_{12} \Delta_y)^2 + (K_3 \Delta_n)^2 + (K_4 \Delta_i)^2 + (K_5 \sum \Delta_b)^2 + (K_6 \sum \Delta_t)^2}, \quad (3)$$

де  $K$  - коефіцієнт відносного розсіювання вихідного параметра (коефіцієнт ризику);

$K_1 - K_6$  - коефіцієнти, що враховують відповідні закони розподілу похибок;

$\Delta_{\varepsilon_y}$  - похибка встановлення заготовки;

$\Delta_y$  - похибка оброблення заготовки, яка виникає внаслідок зміщення елементів технологічної системи під дією сил різання;

$\Delta_n$  - похибка налагодження технологічної системи;

$\Delta_i$  - похибка, яка виникає внаслідок зношення різального інструмента;

$\sum \Delta_b$  - сумарна похибка верстата, яка виникає внаслідок його зношення за період експлуатації;

$\sum \Delta_t$  - сумарна температурна похибка.

Похибка встановлення  $\Delta \varepsilon_y$  являє собою відхилення фактичного положення закріпленої деталі від необхідного теоретичного:

$$\Delta \varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{пр}^2}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_6$  - похибка базування заготовки у пристрої;

$\varepsilon_3$  - похибка закріплення заготовки;

$\varepsilon_{пр}$  - похибка положення заготовки у пристрої.

Похибка базування рівна нулю, оскільки конструкторська, технологічна і вимірювальна бази співпадають.

Похибка закріплення  $\varepsilon_3 = 0$ , так як даний пристрій передбачається оснастити пневматичним затискним механізмом, що забезпечить постійність сили затиску.

Похибка положення заготовки у пристрої  $\varepsilon_{пр}$  є наслідком неточності виготовлення пристрою  $\varepsilon_b$ , зношення його установчих елементів  $\varepsilon_{зн}$  та похибки встановлення самого пристрою на верстаті  $\varepsilon_{вст}$ :

$$\overline{\varepsilon_{пр}} = \overline{\varepsilon_b} + \overline{\varepsilon_{зн}} + \overline{\varepsilon_{вст}}, \quad (5)$$

Величина зношення установчих елементів  $\varepsilon_{зн}$ :

$$\varepsilon_{зн} = \beta \cdot N^n, \quad (6)$$

де  $N$  - кількість контактів заготовки з установчими елементами пристрою;

$\beta$  - постійна, яка залежить від виду установчих елементів.

В абсолютній формі рівняння (3) запишеться як:

$$\varepsilon_{пр} = t \sqrt{\lambda_1 \varepsilon_b^2 + \lambda_2 \varepsilon_{зн}^2} + \varepsilon_{вст}, \quad (7)$$

де  $t$  - коефіцієнт, який визначає частку можливого браку;

$\lambda_1, \lambda_2$  - коефіцієнти, які залежать від закону розподілу випадкових величин.

Похибку налагодження технологічної системи  $\Delta_n$  визначимо як

$$\Delta_n = \sqrt{(K_p \Delta_p)^2 + (K_{вим} \Delta_{вим})^2}, \quad (8)$$

де  $K_p, K_{вим}$  - коефіцієнти, які враховують закони розподілу випадкових величин;

$\Delta_p$  - похибка регулювання;

$\Delta_{вим}$  - похибка вимірювання.

Для пневматичних затискачів необхідна сила на штоці пневмоциліндру рівна:

$$W = Q \cdot \frac{1}{\eta}, \quad (9)$$

де  $Q$  - сила затиску заготовки;

$\eta$  - коефіцієнт тертя.

Необхідна сила затиску визначається за формулою:

$$Q = K \cdot P_z, \quad (10)$$

де  $P_z$  - тангенціальна складова сили різання, Н;

$K$  - коефіцієнт запасу, який визначимо за формулою

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5, \quad (11)$$

де  $K_0$  - гарантований коефіцієнт запасу;

$K_1$  - коефіцієнт, який враховує наявність випадкових нерівностей на поверхні заготовки;

$K_2$  - коефіцієнт, який залежить від прогресуючого затуплення різального інструменту;

$K_3$  - коефіцієнт, який враховує збільшення сили різання при переривчастому різанні;

$K_4$  - коефіцієнт, який характеризує затискний механізм з точки зору постійності сил, які він розвиває;

$K_5$  - коефіцієнт, що враховує наявність моментів, що намагаються повернути деталь.

**Висновки:** На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено пристрій для виготовлення внутрішніх багатогранників, які забезпечують покращення експлуатаційних параметрів різбових з'єднувальних елементів машин і механізмів.

2. Приведені аналітичні залежності для визначення параметрів технологічного процесу прошивання внутрішніх багатогранників.

#### Список використаних джерел

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М., «Высшая школа». 1985, с.305.
2. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов. М., Машгиз, 1959, с.490.
3. Руденко П.О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні. К., «Вища школа». 1993, с.416.
4. Боженко Л.І. Технологія машинобудування. Львів, «Світ», 1966, с.368.
5. Романовський В.П. Справочник по холодной штамповке. –Л.: Машиностроение, 1979.-с.520.
6. Решетов Д.Н. Детали машин.-М.:Машиностроение, 1989.-с.496.
7. Амиров Ю.Д. Справочник. Технологичность конструкции изделий. М.: Машиностроение, 1985.-с.456.
8. Панов Е.А. Основы теории листовой штамповки. –М.: Машиностроение, 1980.-с.432.
9. Гевко Б.М. та інші. Технологія сільськогосподарського машинобудування. К.Кондор, 2006.-с.490.
10. Красников В.Ф. Технология миниатюрных изделий. Изд. Машиностроение. 1976.-с.326.
11. Патент №99282 Україна “Пристрій для виготовлення внутрішніх багатогранників” Клендій В.М. Бюл.№10,2015.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК: 006.032

**В.О. Залога, К.О. Дядюра, І.М. Рибалка***Сумський державний університет***ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНІХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ**

*В ході дослідження кінцевий продукт (в нашому випадку компресорне устаткування) запропоновано розглядати як складну технічну систему, яка складається з 4 спільно діючих компонентів - комплекс технічних засобів, програмне забезпечення, оперативний персонал і документована інформація. При процесному моделюванні ці компоненти можуть бути в різних процесах входами, виходами, механізмами (ресурсами) або управлінням. На підставі нормативних вимог до кожного компоненту системи можна визначити ключовий показник результативності та ефективності.*

*Ключові слова:* складна технічна система, інтегрована система менеджменту, стандарти.

**В.А. Залога, К.А. Дядюра, І.Н. Рыбалка****ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

*В ходе исследования конечный продукт (в нашем случае компрессорное оборудование) предложено рассматривать как сложную техническую систему, которая состоит из 4 совместно действующих компонентов - комплекс технических средств, программного обеспечения, оперативный персонал и документированная информация. При процессном моделировании эти компоненты могут быть в разных процессах входами, выходами, механизмами (ресурсами) или управлением. На основании нормативных требований к каждому компоненту системы можно определить ключевой показатель результативности и эффективности.*

*Ключевые слова:* сложная техническая система, интегрированная система менеджмента, стандарты.

**V. Zaloga, K. Dyadyura, I. Rybalka****FEATURES OF IMPLEMENTATION OF INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS**

*During the study, the final product (in our case, compressor equipment) is proposed to be considered as a folding technical system, which consists of 4 jointly operating components - a set of hardware, software, operational staff and documented information. In process modeling, these components can be in different processes of inputs, outputs, mechanisms (resources) or management. Based on the regulatory requirements for each component of the system, a key indicator of effectiveness and efficiency can be identified. This will allow you to control the process and make appropriate decisions to improve the system. The application of the proposed methodology for the development and implementation of an integrated management system will reduce the cost of resources and improve the quality of the implementation of processes.*

*Keywords:* complex technical system, integrated management system, standards.

**Постановка проблеми.** Багато підприємств України уже мають сертифіковані систему управління якістю за стандартом ISO 9001 і систему управління навколишнім середовищем за стандартом ISO 14001, слідом за цим приступають до впровадження систем управління промисловою безпекою, охороною праці та інших. У цій ситуації виникає необхідність використання підходу, заснованого на ідеології інтегрованих систем управління, коли створюється єдина інтегрована система управління на підприємстві, що впливає на всі перераховані вище напрямки.

При створенні інтегрованих систем управління керуються такими аспектами:

- системи управління, що підлягають інтеграції, базуються на одних і тих же принципах;
- для демонстрації взаємозв'язку між елементами систем використана модель, побудована на основі циклу PDCA «плануй - роби - перевіряй - впроваджуй»;
- термінологія стандартів, що встановлюють вимоги до різних систем управління, однакова;
- структура систем управління, перерахованих вище, практично повністю збігається. Так, наприклад, назви розділів стандарту ISO 14001:2015, що встановлює вимоги до системи екологічного менеджменту і стандарту OHSAS 18001 (ISO 45001:2018), що регламентує систему менеджменту професійної безпеки та здоров'я, абсолютно ідентичні і гармонізовані зі стандартом ISO 9001:2015 [1-3];
- збігається досить велика кількість вимог, за оцінками деяких експертів - до 75 - 80%.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При спільному впровадженні стандартів на системи менеджменту, розроблених ISO, процес створення інтегрованої системи управління істотно полегшується тим, що всі ці стандарти розробляються з використанням єдиних підходів [4-6], в загальній, якщо можна так сказати, економічній ситуації і з використанням єдиної політики технічного регулювання. Все це дозволяє провести об'єднання вимог різних систем управління в єдиній, інтегрованій системі управління.

Однак в наявних наукових розробках і методичних матеріалах не розглядаються питання одночасного впровадження вимог стандартів, розроблених в різних країнах, і, отже, в різних економічних і соціальних умовах, і які мають специфічні національні відмінності.

Ще скрутнішою ситуація стає в разі, коли одна система стандартів уже впроваджена в організації і успішно функціонує і настає момент, коли споживач вимагає від свого постачальника впровадження системи менеджменту якості за галузевим міжнародним стандартом (наприклад, ISO/TS 22163:2017 [7]).

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – розробити методологію для полегшення опису процесів, розглядаючи кінцевий продукт виробництва як складну технічну систему (СТС), що сприятиме успішному впровадженню та функціонуванню інтегрованої системи менеджменту.

**Викладення основного матеріалу.** У складі складної технічної системи СТС в загальному випадку можуть бути виділені три різні компоненти [8] - комплекс технічних засобів (КТЗ), програмне забезпечення (ПЗ) і оперативний персонал (ОП) як показано на рис. 1.

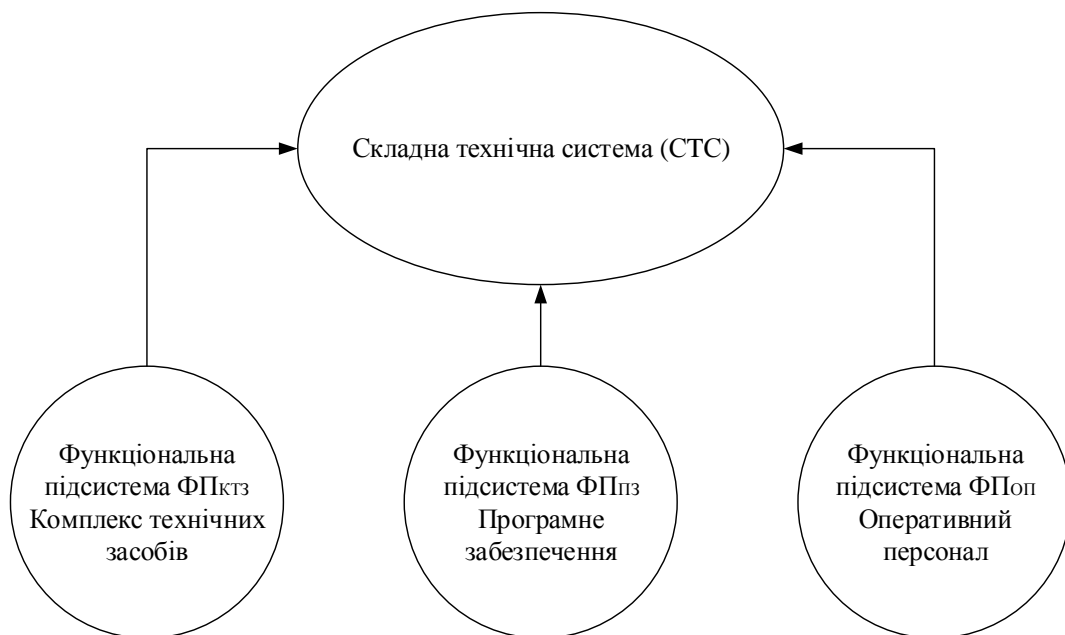


Рис.1. Функціональні підсистеми

Проектування, виготовлення і експлуатація компресорного устаткування, зумовлює спільність, що включає в себе документовану інформацію, технічні та програмні засоби, а також персонал, які взаємопов'язані в рамках єдиної системи за допомогою інформаційних, енергетичних і матеріальних потоків [9]. Компоненти СТС компресорне обладнання представлені на рис. 2.

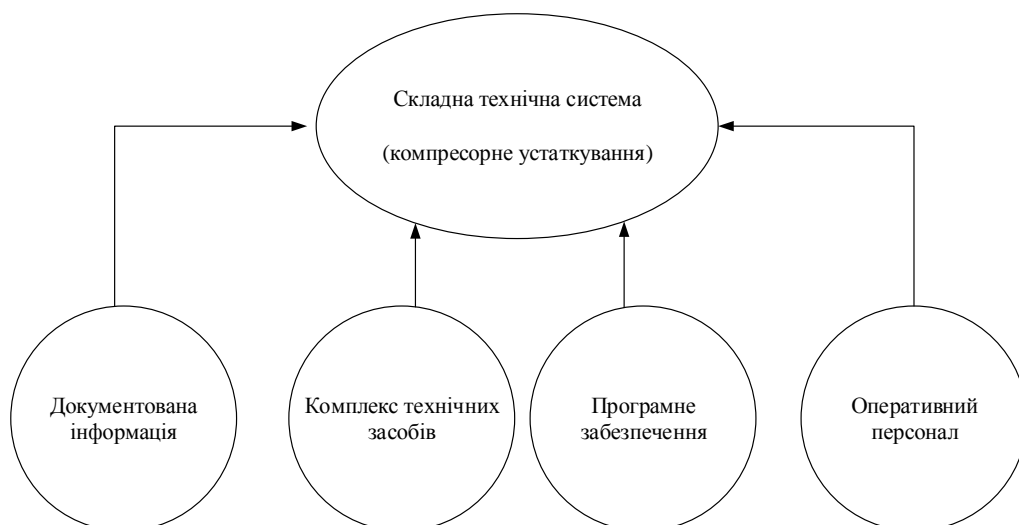


Рис.2. Компоненти СТС компресорне обладнання

Кожен компонент СТС повинен відповідати певним законодавчим і нормативним вимогам, ієрархія яких представлена на рис. 3.

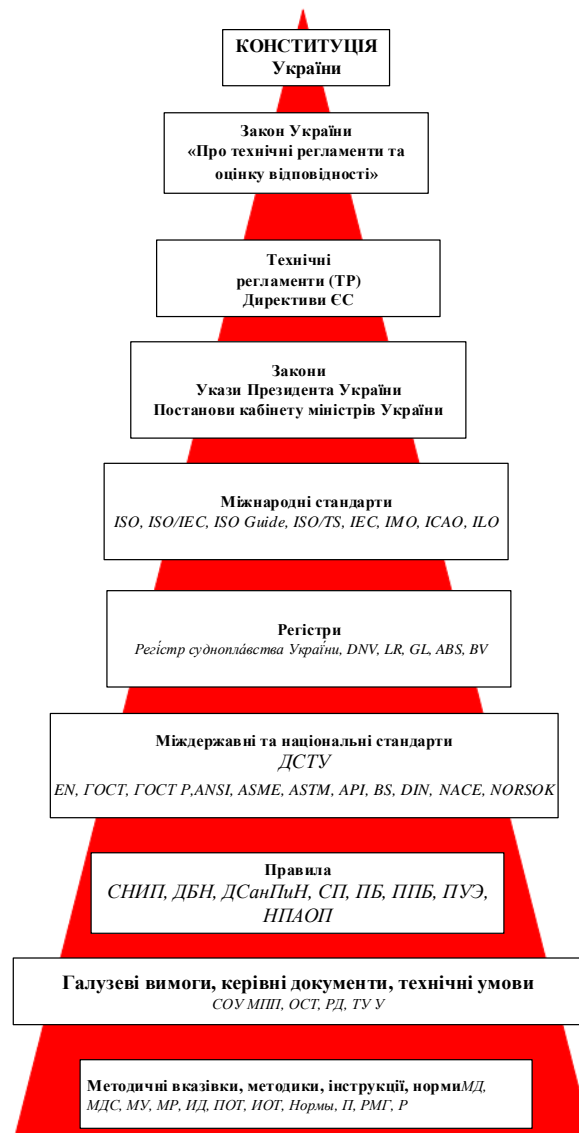


Рис.3. Ієрархія нормативно-технічних документів в області стандартизації з пріоритетності їх застосування в Україні

Для забезпечення якості СТС (компресорного устаткування) необхідно забезпечити відповідну якість вихідних даних кожного етапу життєвого циклу СТІ, що реалізується за рахунок визначення і моніторингу ключових показників діяльності KPI (Key Performance Indicator) процесів життєвого циклу. Виділяти показники найбільш зручно стосовно процесу, зображеному в нотації IDEF0 (рис. 4), коли на малюнку представлені входи, виходи, управління (правила виконання процесу) і механізми (обладнання, персонал).



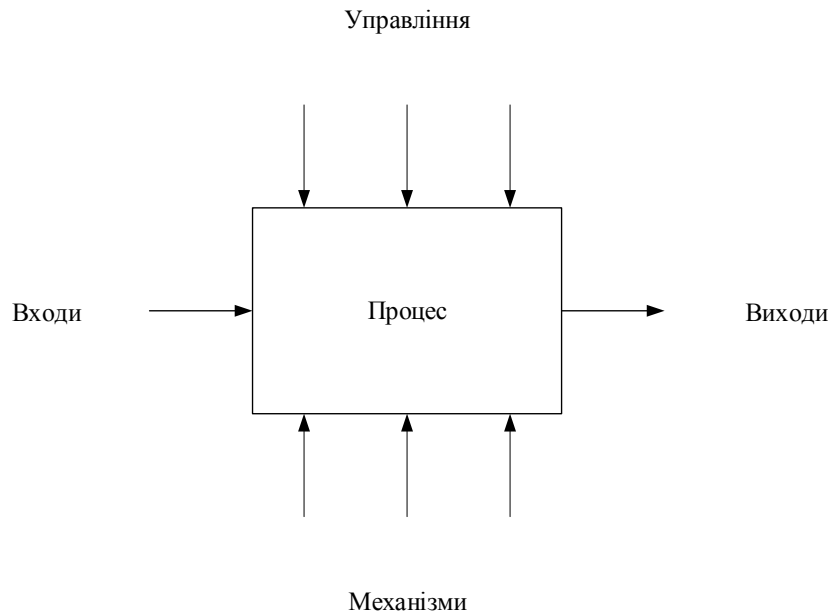


Рис.4. Процес в нотації IDEF0

Ключові показники ефективності і показники результативності, будучи похідними, при використанні такої схеми характеризують процес в цілому (рис.5).

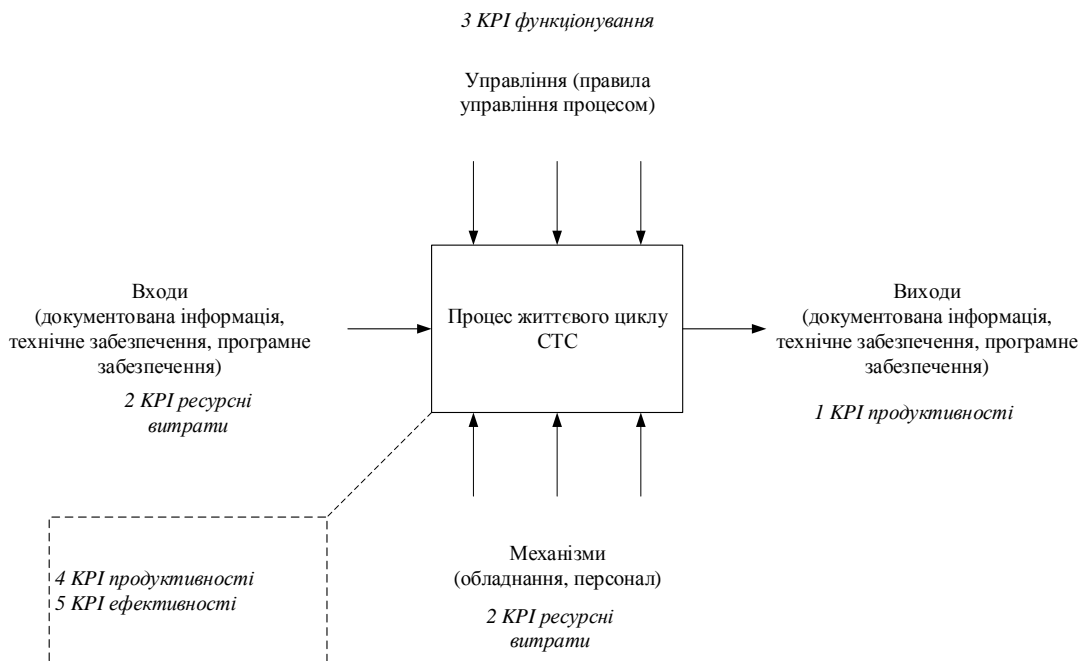


Рис.5. Показники KPI

Алгоритм розробки показників процесу наступний:

1. Ідентифікувати процес і його результат.
2. Ідентифікувати входи-ресурси (ресурси, що переробляються за один цикл процесу) і входи-механізми (ресурси, що забезпечують багаторазове виконання процесу - обладнання, персонал).
3. Ідентифікувати входи-управління (правила і вимоги до виконання процесу)
4. Знаючи результат, який повинен бути отриманий, необхідно оцінити його кількісно - сформулювати показники результату. Вони можуть бути як простими, так і розраховуються (за формулою або іншим способом).
5. На основі входів процесу можна сформулювати показники витрат.
6. На основі механізмів процесу можна сформулювати додаткові показники витрат.

7. Правильність виконання процесу, крім показників витрат на здійснення діяльності, відображають також показники функціонування.

8. Показники продуктивності розраховуються як співвідношення отриманого результату на часі.

9. Розрахунок ключових показників ефективності здійснюється на основі виділених попередньо КРІ результативності та КРІ витрат. Показники ефективності, таким чином, виступають інтегральними характеристиками діяльності.

Зазначені компоненти (рис. 2) впливають на ефективність і результативність реалізації життєвого циклу не ізольовано, а в тісному взаємозв'язку один з одним, що виражається в можливостях одного коригувати двома іншими ефективність і результативність реалізації її функцій. Між компонентами діє просторово-часові відносини, які відбуваються у певних процесах. Розглянемо процеси, які здійснюються на машинобудівному підприємстві. Процеси організації прийнято розділяти на основні, що забезпечують, процеси управління і процеси розвитку, визначення яких представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.

### Класифікація процесів

Типи процесів	Визначення	Процеси організації
Основні процеси	<ul style="list-style-type: none"> <li>Процеси, які створюють продукт, що представляє цінність для зовнішнього споживача.</li> <li>Процеси, які створюють додану цінність продукту або послуги.</li> </ul>	Продажі Проектування і розробка Сервісне обслуговування Постачання Виробництво
Забезпечуючі процеси	<ul style="list-style-type: none"> <li>Процеси, споживачами яких є основні процеси.</li> <li>Процеси, які створюють і підтримують інфраструктуру організації.</li> </ul>	Фінансово-економічний менеджмент Управління людськими ресурсами Управління технічним забезпеченням юридичне забезпечення Управління безпекою бізнесу Управління документованою інформацією управління знаннями управління комунікаціями управління логістикою ІТ забезпечення
Процеси управління	<ul style="list-style-type: none"> <li>Процеси, основною метою яких є управління діяльністю організації.</li> <li>Процеси, які забезпечують виживання і розвиток організації, регулюють її поточну діяльність.</li> </ul>	Стратегічне управління Управління якістю бізнес-процесів Управління ризиками
Процеси (проекти і програми) розвитку	<ul style="list-style-type: none"> <li>Нерегулярні і інноваційні види діяльності по вдосконаленню і розвитку організації.</li> <li>Види діяльності, орієнтовані на цілі довгострокової перспективи.</li> </ul>	Управління проектами

Якщо розглядати кожен процес окремо, описаний як взаємопов'язані компоненти СТС в рамках єдиної системи з урахуванням показників діяльності, можна поліпшувати процес за рахунок вимірювання показників та удосконалювати функціонування інтегрованої системи менеджменту організації взагалі.

**Висновки.** В статті запропоновано розглядати кінцевий продукт (в нашому випадку компресорне устаткування) як складну технічну систему, яка складається з 4 спільно діючих компонентів - комплекс технічних засобів, програмне забезпечення, оперативний персонал і

документована інформація. При процесному моделюванні ці компоненти можуть бути в різних процесах входами, виходами, механізмами (ресурсами) або управлінням. На підставі нормативних вимог до кожного компоненту системи можна визначити ключовий показник результативності та ефективності.

В процесі реалізації процесів під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів відбувається поступове і безперервне (еволюційний) зміна структури процесів.

Надалі системи процесів пропонується досліджувати в декількох напрямках:

- уявлення складних систем процесів як взаємопов'язаної сукупності підсистем різного ієрархічного рівня, побудова ієрархії завдань їх оптимізації з відповідним обміном інформацією в часі і за рівнями, тобто, так званий, ієрархічний підхід;

- розробка спеціальних підходів і методів для обліку невизначеності інформації, аналізу та прийняття рішень;

- розвиток ігрових підходів, включаючи ігри з протилежними інтересами і прийняття колективних рішень;

- розробка методів багатокритеріальної оптимізації, методів експертних оцінок і т.д.

Таким чином, застосування запропонованої методології розробки та впровадження інтегрованої системи управління зменшить витрати ресурсів і підвищить якість виконання процесів.

#### **Список використаних джерел:**

1. ISO 14 001:2015 Системы экологического менеджмента – Требования и руководство по применению

2. ISO 45001:2018 Системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда

3. ISO 9001:2015 Системы менеджмента качества – Требования

4. Репин В.В. Бизнес-процессы компании. Построение, анализ, регламентация. - М.: РИА "Стандарты и качество", 2007.-240 с.

5. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / Владимир Репин, Виталий Елиферов. — М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013.-544 с.

6. Джестон, Нелис. Управление бизнес-процессами. Практическое руководство по успешной реализации проектов. Символ – Плюс, 2008. – 511 с.

7. ISO/TS 22163:2017 Железные дороги. Система менеджмента качества. Требования к системам менеджмента бизнеса для предприятий железнодорожной отрасли: ISO 9001:2015 и частные требования, применимые в железнодорожной отрасли

8. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення.

9. Залога В. О. Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів : монографія / В. О. Залога, К. О. Дядюра, В. В. Нагорний – Суми: Вид-во СумДУ, 2012. – 347 с.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 622.831.2:539.422.3

**Л.М. Захарова, І.В. Назимко***Інститут фізики гірничих процесів НАН України***ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПІВ ГІРНИЧИХ РОБІТ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАХІД З УПРАВЛІННЯ ДИСИПАТИВНИМИ СТРУКТУРАМИ НАВКОЛО ВИРОБКИ**

*За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено вплив швидкості посування очисного вибію на стійкість підготовчих виробок. Показано, що підвищення швидкості посування очисного вибію є ефективним засобом для управління дисипативними структурами, які спонтанно виникають навколо підземних підготовчих виробок, що дозволяє зменшити деформації їх перерізу.*

*Ключові слова:* гірський тиск, механіка руйнування, необоротні деформації, дисипативні структури.

**Л.Н. Захарова, И.В. Назимко***Институт физики горных процессов НАН Украины***ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПОВ ГОРНЫХ РАБОТ КАК ЭФФЕКТИВНАЯ МЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫМИ СТРУКТУРАМИ ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ**

*С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние скорости подвигания очистного забоя на устойчивость подготовительных выработок. Показано, что повышение скорости подвигания очистного забоя является эффективным средством для управления диссипативными структурами, спонтанно возникающими вокруг подземных подготовительных выработок, что позволяет уменьшить деформации их сечения.*

*Ключевые слова:* горное давление, механика разрушения, необратимые деформации, диссипативные структуры.

**L.M. Zakharova, I.V. Nazymko***Institute for Physics of Mining Processes NAS Ukraine***AUGMENTING OF RATE ADVANCE AS EFFICIENT METHOD FOR DISSIPATIVE STRUCTURE CONTROL IN VICINITY OF AN UNDERGROUND ROADWAY**

*Purpose. The objective of this paper is to find the reason why convergence of an underground roadway sides or roof and floor diminishes due to augmenting of the rate of a longwall advance.*

*Methodology. FLAC3D computer code and actual measurements have been employed to simulate the irreversible ground movement around entry. We also used analysis of fractal characteristic of fragments from rock burst tests under different loading rates to verify our findings.*

*Findings. We found that dissipative structures that spontaneously arise in the adjacent to entry rock mass due to longwall movement could suppress irreversible ground movement into the entry cavity. The more the rate of the advance the better dissipative structures subdue the irreversible movement of the ground. Increase of the rate causes enlargement of the rock fragments that additionally restrains the irreversible movement of the fragments because their large dimensions detain process of accumulation of degree of freedom. Comparison of the modeling ground movement and the displacements of the roof and sides of the experimental roadway as well as floor's heave has demonstrated good agreement that is in 78% coherence.*

*Originality. We clarified the issue concerning the reason of ground displacement into roadway cavity due to augmenting the longwall rate advance. Both enlargement of the rock fragments and growth of the dissipative structure sizes cause jamming effect, what impedes further displacement of the rock fragment into roadway cavity.*

*Practical implications. New findings could assist practitioners to control of ground in hard geologic and technical environment, where underground coal seams are extracted.*

*Keywords:* ground control, irreversible ground movement, dissipative structures, longwalls, rate of advance.

**Вступ.** Забезпечення стійкості підготовчих виробок є важливою задачею, актуальність якої неухильно зростає зі збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин. Надійність процесу видобутку підземних корисних копалин перш за все залежить від стійкості підготовчих виробок, через які здійснюється доступ до корисних мінералів, транспортування, вентиляція, підтримання безпечного рівня гірничих робіт.

Існує декілька принципово різних технологій, які сприяють збереженню та навіть збільшенню стійкості підземних підготовчих виробок [1]. Найбільш популярний напрямок, яким слідує виробничники, пов'язаний з вдосконаленням кріплення підготовчих виробок. Застосовуються також технології відновлення міцності порід, що оточують підземні виробки [2]. Більшість технологій потребує прямих інвестицій, трудозатратні, металоємні. Проте є й такі технології, що сприяють стійкості підготовчих виробок без вкладення додаткових інвестицій. Такі технології є найперспективнішими і включають перш за все локальне чи масштабне розвантаження масиву від гірського тиску, а також забезпечення високих темпів видобутку корисних копалин.

Доведено [3,4], що збільшення темпів посування очисного вибію зменшує зміщення порід на контурі підготовчих виїмкових виробок, що просто примикають до діючої лави. Була встановлена безпосередня причина такого позитивного ефекту, яка пов'язана зі зміною процесу руйнування оточуючого виробку масиву гірських порід. Проте існує більш фундаментальний механізм скорочення величин необоротних зрушень і деформацій навколо виробки, яке відбувається на тлі швидкого навантаження масиву, оточуючого виробку. Для встановлення вказаної причини необхідно залучити нові закономірності спонтанного виникнення дисипативних структур унаслідок переходу порід у поза межній напружено-деформований стан [5-10].

Отже метою статті є уточнення закономірностей зменшення зрушень на контурі підготовчої виробки у результаті підвищення темпів посування очисного вибію.

**Викладення основного матеріалу.** Закономірності термодинаміки необоротних процесів, що відбуваються у масиві гірських порід і ґрунтів базуються на еволюції дисипативних структур, що спонтанно виникають у процесі необоротних зрушень зруйнованих гірських порід [5-7]. Встановлено, що під час ініціації необоротних зрушень ґрунту, або масиву гірських порід закономірно й спонтанно виникають дисипативні структури, які проявляються у вигляді характерного стійкого розподілу векторів інкрементальних зрушень і послідовно, стрибкоподібно змінюють одна одну на тлі зрушень фрагментів, які змінюються плавно, без розривів і зупинок [9]. Дисипативні структури являють собою стійкі утворення, що складаються з окремих короткоживучих кластерів, які зливаються, перегруповуються, або розділяються. Доведено, що в інкубаційний період розвитку необоротних зрушень переважають роторні й потокові паттерни, які сприяють накопиченню степенів вільності для фрагментів, що перетворює масив на дискретне середовище. Випадкові ж флуктуації дисбалансу внутрішніх сил, що діють усередині масиву гірських порід виконують роль тригерів, що запускають такі дискретні зміни паттернів дисипативних структур. З точки зору термодинаміки необоротних процесів інкрементальні вектори необоротних зміщень породних фрагментів виконують роль термодинамічних потоків, а флуктуації дисбалансу внутрішніх сил відіграють роль термодинамічних сил.

Ми вважаємо, що вирішальний вплив швидкості посування очисного вибію на стійкість підготовчої виробки здійснюється через далеку взаємодію кластерів дисипативних структур навколо гірничої виробки. Це було встановлено за допомогою шахтних інструментальних спостережень розтягування інтервалів масиву уздовж свердловин, в яких були розміщені глибинні репери. Дисипативні структури виявлялись у формі стрибкоподібного у часі і дискретного у просторі, а також несиметричного відносно осі виробки розширення зони зруйнованих порід а також несиметричного перерозподілу деформацій відносно розширення-стиснення порід навколо вертикальної осі перерізу виробки [9,10].

Далека взаємодія дисипативних структур ілюструється рис. 1, на якому за результатами комп'ютерного моделювання наведені розподіли полів інкрементальних зрушень породного масиву навколо підготовчої виробки під час необоротного деформування оточуючих порід. На рисунку наведено декілька послідовних розподілів приросту необоротних зміщень масиву навколо підготовчої виробки, що формували певні мозаїки або паттерни векторів-зміщень, з яких створювалися дисипативні структури, розсіюючи енергію гірського тиску. Видно, як на першому етапі (рис. 1, а) переважала структура, що формувалася потоком необоротних зрушень порід покрівлі. На другому етапі (фрагмент б) потік зрушень з покрівлі почав згасати, а замість нього розвинулося стікання зруйнованих порід з бокової стінки виробки.

На третьому етапі (рис. 1, в) вказаний потік вичерпався, а натомість активізувалось здимання порід, що залягали у підшві виробки. Характерно, що потік здимання додатково підживлюється з бокової стінки виробки завдяки вихору або ротору, вказаному стрілкою.

Моделювання виконано для умов пласта  $d_4$  шахтоуправління «Покровське», яке відпрацьовує запаси на глибині понад 900 м, що створює значні проблеми з підтриманням підготовчих виробок. На рис. 2,б наведено знімок підготовчої виробки, який підтверджує актуальність згаданої проблеми. Величина здимання підшви виробки сягає 2 м і навіть більше, а інтенсивні деформації порід покрівлі і бокових стінок призводять до пластичного деформування рамного піддатливого кріплення й втрати його несучої спроможності.

На рис. 2,а наведено результати моделювання таких деформацій за допомогою платформи FLAC3D. Площа перерізу виробки становила 17 м<sup>2</sup>, виробка кріпилась піддатливими рамами з профілю СВП33, що встановлені через 0,8 м. Додатково встановлено по 5-7 сталеполімерних анкерів довжиною 2,8 м у міжрамному просторі. Виїмкова потужність вугільного пласта становила 1,8 м, а у його покрівлі залягав 4-метровий шар алевроліту з міцністю на одноосьовий

стиск 50 МПа. Вище розташований потужний шар міцного пісковика. У підшві пласта розташований шар алевроліту що має міцність 40 МПа. Саме цей алевроліт й сприяв інтенсивному здиманню підшви виробки. Особливо інтенсивне здимання відбувалось у зоні опорного тиску лави, що рухалась повз підготовчої виробки.

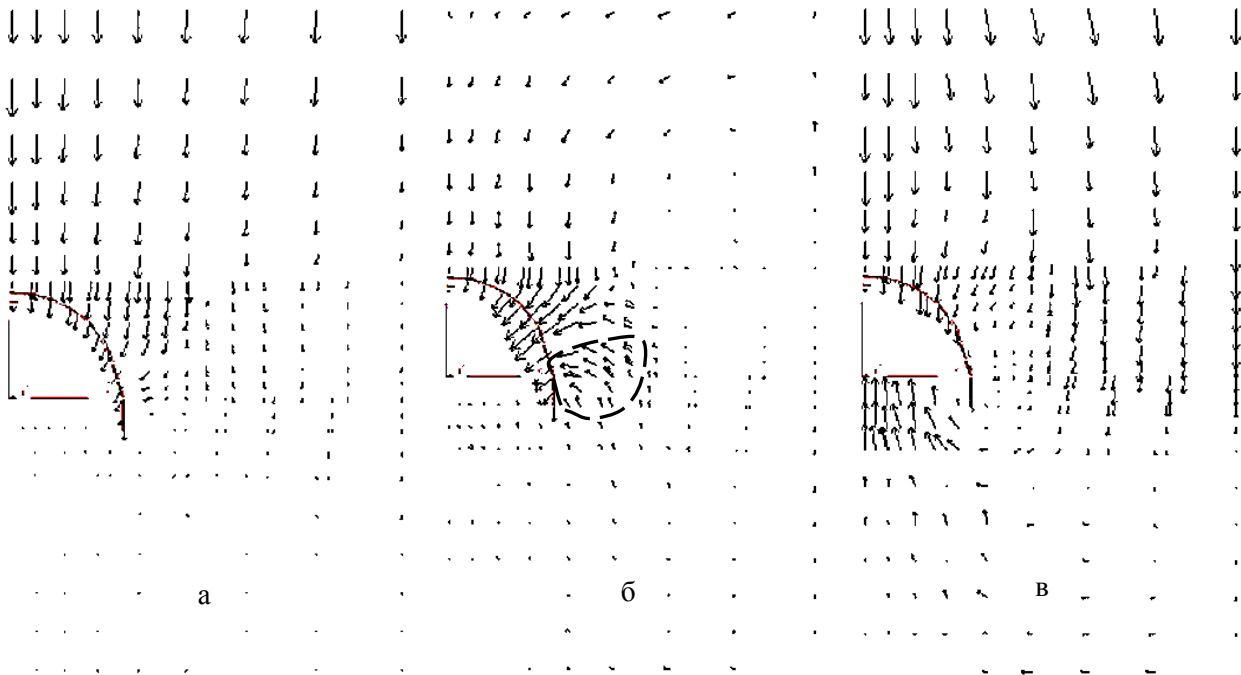


Рис. 1. Характерні паттерни дисипативних структур навколо підземної виробки

Одночасно з вказаним здиманням підшви спостерігалось осідання покрівлі виробки й конвергенція її бокових стінок. Це спричинило пластичні деформації рамного кріплення, стояки якого до того ж загнали у шар безпосередньої підшви пласта.

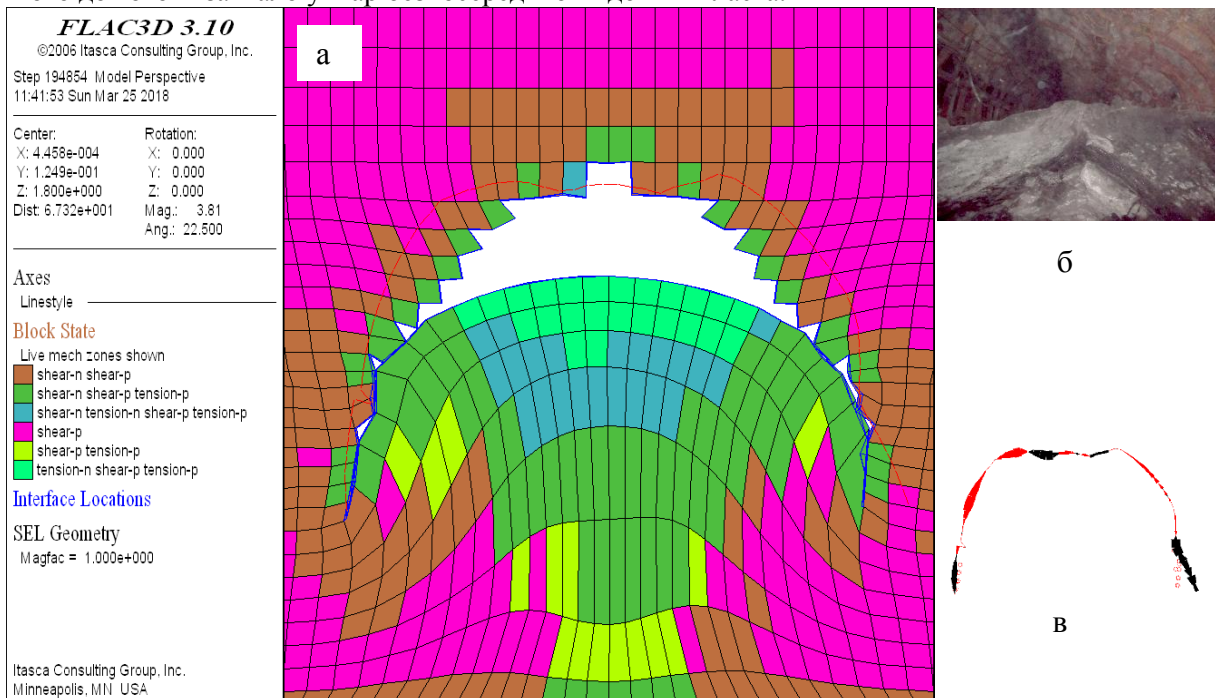


Рис. 2. Деформації перерізу підготовчої виробки: а – розподіл зон позамежного стану; в – розподіл крутних моментів уздовж профілю рамного кріплення; б – зовнішній вигляд виробки

Співставлення результатів моделювання й фактичних розмірів виробки засвідчив задовільну збіжність величин зрушень підосви, бокових стінок і покрівлі виробки. Відхилення розрахункових зрушень уміщуючих порід від фактичних, виміряних у натурних умовах не перевищило 21,2 % (табл. 1). Навантаження виробки у моделі здійснювалось протягом 10 діб. Причому величина концентрації опорного тиску зростала від 1 до 2,5 по мірі наближення очисного вибію до розрахункового перерізу виробки. Такі параметри граничних умов підбирались з розрахунку фактичної швидкості посування лави яке становило 150 м/міс, а довжина зони опорного тиску згідно натурним спостереженням становила 50 м.

Таблиця 1.

## Зміщення на контурі виробки, мм

швидкість посування лави, м/міс	покрівлі			Зближення боків			здимання підосви		
	модель	натура	Відхилення, %	модель	натура	Відхилення, %	модель	натура	Відхилення, %
150	279	354	21,2	753	810	7,0	2052	1780	-15,3
300	253			695			1910		
	<b>9,3</b>			<b>7,7</b>			<b>6,9</b>		

Характерно, що рамне кріплення, яке моделювалось, також пластично деформувалось, що видно на фрагменті (в) рис. 2. Стан рам, які моделювались, узгоджувався з фактичним станом рамних комплектів у реальній виробці. Це помітно по такими ознакам, як пластичний прогин склепової частини верхняку рами, пластичні деформації нижніх частини стояків, які заганялись у породи підосви виробки, вигин стояків у бік порожнини виробки й розподіл та крок зміни крутних моментів уздовж осі рамного профілю. Довжина кроку, з яким змінювався знак крутного моменту навколо поздовжньої осі профілю коливається у межах 2-4 м, що повністю співпадає з фактичним кроком у натурних умовах.

Для дослідження впливу швидкості посування очисного вибію на величину деформації перерізу підготовчої виробки був виконаний чисельний експеримент з більшою швидкістю посування лави. Згідно практики ведення гірничих робіт в ш/у «Покровське» кілька лав досягали темпів посування, які перевищували 250 м/міс. Розрахунки показали, що за темпів посування у 300 м/міс коефіцієнт концентрації опорного тиску збільшується у даних умовах у 1,7 рази. Тому навантаження виробки на границі розрахункової області здійснювали протягом 5 діб, але коефіцієнт концентрації опорного тиску збільшували від 1 до  $2,5 \cdot 1,7 = 4,25$ .

Результати розрахунків наведені у таблиці 1. Як видно, відхилення розрахункових даних від виміряних у натурних умовах мають різні знаки, що свідчить про деяку невизначеність механічних властивостей порід, які використані у якості вхідних даних для моделювання.

Зменшення ж зміщень на контурі модельної виробки після підвищення швидкості посування лави складає у середньому 8% й мають виключно позитивний знак. Оскільки решта умов моделювання були однакові як за швидкості посування 150 м/міс, так і 300 м/міс, така різниця є закономірною й суттєвою. До того ж висновок добре узгоджується з результатами досліджень, опублікованими у [3], що свідчить про його достовірність.

Фундаментальна причина зменшення зміщень на контурі підготовчої виробки у разі зростання швидкості посування очисного вибію полягає у закономірності еволюції дисипативних структур, які спонтанно виникають навколо підготовчої виробки. У роботах [3,4] у якості причини ефекту зменшення зміщень на контурі підготовчої виробки висунуто таку. При зростанні темпів посування очисного вибію збільшуються розміри фрагментів масиву гірських порід, на які він дезінтегрується. Маючи більший розмір, ці фрагменти більш схильні до само-заклинювання й таким чином заважають один одному зрушуватися у порожнину виробки. Незважаючи на правильність висновку, відповідь на питання, чому величина зміщень порід стала меншою, залишається неповною.

Додатковий аналіз результатів моделювання, виконаний у даній статі, засвідчив, що зростає й середній розмір кластерів дисипативних структур, які періодично змінювали одна одну під час необоротних зрушень зруйнованого масиву, Так еквівалентний діаметр паттернів дисипативних структур збільшився у 1,1 рази. Один з таких кластерів окреслений пунктирною лінією на

фрагменті (б) рис. 1. Отже чим більше розміри кластерів, тим важче їм узгоджувати свій необоротний рух й еволюціонувати у бік накопичення степенів вільності, які сприяють розпушенню зруйнованих порід. Об'єм для розпушення ж оточуючі виробку породи можуть взяти лише з порожнини виробки. Таким чином повна відповідь щодо суттєвих факторів, що впливають на зменшення необоротних зрушень у порожнину виробки, повинна враховувати як збільшення розмірів породних фрагментів, так і кластерів, що формуються з цих фрагментів.

Додаткове й незалежне підтвердження зробленого висновку можна знайти наприклад у статті [11], автори якої виконали лабораторні експерименти з руйнування отвору (шпуру), який був виконаний у гранітному блоці. Експеримент виконувався наступним чином. У гранітному блоці вибурювали шпур діаметром 45 мм, який заповнювали сумішшю кварцового піску й води. Потім блок встановлювали під прес з сервомеханізмом й навантажували його з усіх трьох сторін напруженням 20 МПа. Витримавши певний час таке навантаження, звільняли шпур від піску, який підпирав його стінки, й починали навантажувати блок у напрямі, перпендикулярному осі шпуру. Навантаження виконували у режимі заданої деформації, застосовувавши три темпи деформування: 0,3 мм/хв, 04 мм/хв і 0,5 мм/хв. Навантаження припиняли після динамічного руйнування стінок шпуру у вигляді викиду. Викинуті ж фрагменти породи збирали й здійснювали його гранулометричний аналіз. У табл. 2 наведені параметри фракцій зруйнованої породи та їх відносна кількість. У трьох правих стовпчиках показаний вміст фракцій у відсотках.

Таблиця 2.

### Результати гранулометричного аналізу зруйнованих фрагментів[11]

Розмір фрагментів, мм		0,3 мм/хв	0,4 мм/хв	0,5 мм/хв
<0,1	Мікро	6,33	6,69	6,9
0,1-1,25	Мілки	48,25	44,44	42,29
1,25-2,0	Середні	22,44	22,08	19,27
>2,0	Великі	22,98	26,79	31,63
		100,0	100,0	100,0

На рис. 3 наведено діаграму вмісту фракцій для кожної швидкості навантаження породного блоку. Вміст мікро- й середнього розміру фракцій практично залишається незмінним. Проте вміст мілких зерен неухильно зменшується з 48,25% до 42,29%, за рахунок чого збільшується вміст великих або грубих зерен, розмір яких перевищує 2 мм. Так вміст грубих фрагментів великого розміру збільшувався з 23% до 31,63%, або в 1,4 рази під час збільшення швидкості навантаження породних блоків у 1,7 рази. Таким чином результати моделювання отримали додаткове підтвердження своєї достовірності.

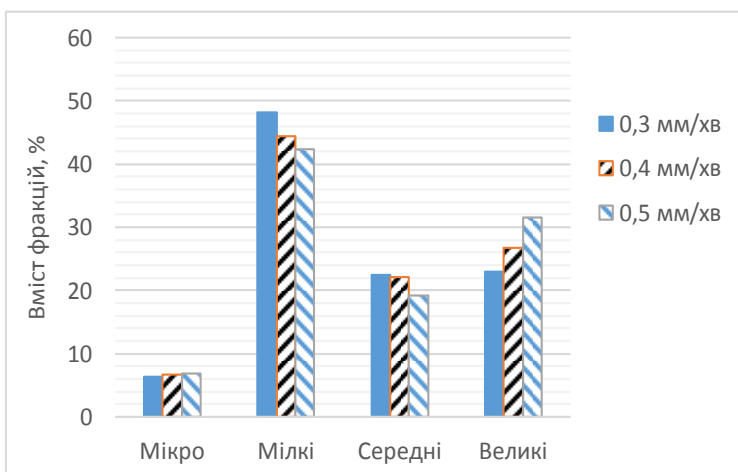


Рис. 3. Вміст різних фракцій зруйнованої породи в залежності від швидкості навантаження породного

регулюють розміри фрагментів, на які руйнується масив гірських порід, та розміри паттернів дисипативних структур.

Теоретичне тлумачення такого висновку криється у теоретичних основах термодинаміки незворотних процесів [12]. Згідно вказаної теорії дисипативні структури виникають під дією термодинамічних сил й термодинамічних потоків. У даному випадку роль термодинамічних сил виконує активний тиск, який прикладається від лабораторного пресу. Термодинамічні сили викликають термодинамічні потоки, які матеріалізуються у масиві гірських порід у вигляді певних паттернів дисипативних структур, наприклад у вигляді структурних потоків [5,9]. Саме ці потоки



У підсумку збільшення швидкості посування очисного вибію підвищує термодинамічну силу (інтенсивність гірського тиску) й сприяє приблизно такому ж неповоротному розсіянню його енергії, як і за менших темпів посування.

Як бачимо, підвищення темпів відпрацювання запасів має не тільки економічний ефект, але й геомеханічний з точки зору покращення стійкості підготовчих виробок, які обслуговують очисні вибії. Проте залишається проблема безпечного відпрацювання запасів швидкими очисними вибіями. Адже добре відомо, що запас потужності сучасних очисних комбайнів та конвеєрів дає змогу підвищити темпи посування лав утричі і навіть більше. Проте основним обмеженням для такого підвищення темпів є газовий фактор. Порушення допустимого вмісту вибухонебезпечного метану призводить до регулярних масштабних катастроф в Україні, Китаї, РФ й інших вугледобувних державах. Вирішення вказаної гострої проблеми залишається нагальною необхідністю.

**Висновки.** Причина зменшення необоротних зрушень порід на контурі підготовчої виробки під час зростання швидкості посування очисного вибію, що примикає до вказаної виробки полягає у наступному. Збільшення швидкості посування очисного вибію підвищує термодинамічну силу (інтенсивність гірського тиску), що сприяє приблизно такому ж неповоротному розсіянню його енергії, як і за менших темпів посування. У результаті збільшуються як розмір породних фрагментів, так і кластерів, що формуються з цих фрагментів. Отже чим більше розміри кластерів, тим важче їм узгоджувати свій необоротний рух й еволюціонувати у бік накопичення степенів вільності, які сприяють розпушенню зруйнованих порід. Об'єм для розпушення ж оточуючі виробку породи можуть взяти лише з порожнини виробки.

Подальшими дослідженнями планується вдосконалення технології відводу метану з очисних вибіїв для підтримання необхідної безпеки інтенсивного вугледобутку.

#### Список використаних джерел:

1. Шашенко, О.М., Солодянкін, О.В., Мартовицький, А.В. Управління стійкістю протяжних виробок глибоких шахт. Монографія. Дніпропетровськ: ТОВ "ЛізуновПрес", 2012.-314с.
2. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография. - Д.: Национальный горный университет, 2008. - 224 с.
3. Назимко, И.В. Исследование влияние скорости подвигания очисного забоя на характер деформирования покрывающих пород. Вісник КТУ. Збірник наукових праць. Кривий Ріг, 2006, 5(15), 41-45.
4. Назимко И.В. Исследование механизма необратимых сдвижений пород вокруг выемочной выработки при разной интенсивности возмущения // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. - Донецьк, №9, 2011, ч.1. - С. 343 - 357.
5. Захарова, Л.М. Фізичні основи еволюції дисипативних структур в геомеханіці. Lambert Academic Publishing: Saarbrcken. - 2017, 328 pp.
6. Захарова, Л.М. Фізичні основи еволюції дисипативних структур під час незворотного деформування масиву гірських порід після переходу у поза межний стан. Праці II міжнародної науково-технічної інтернет-конференції "Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі". КрНУ, м. Кривий Ріг, 2017.
7. Zakharova L. Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No.6, pp. 40 - 43.
8. Nazimko V.V., Zakharova, L.M. Cluster behavior of the ground during its irreversible movement. Acta geodynamica et geomaterialia, 2017,14(188), 45-49
9. Грін'юв, В.Г., Захарова, Л.М. Основи забезпечення стійкості підготовчих виробок в умовах необоротного деформування масиву гірських порід. Уголь України, 2017,10, 3-11.
10. Захарова, Л.М. Дослідження дисипативних структур під час необоротних деформацій масиву гірських порід. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2014, 59, 112-118.
11. Tian B., Liu S., Zhang Y., Wang Z. Analysis of fractal characteristic of fragments from rock burst tests under different loading rates. Tehni?ki vjesnik 23, 5(2016), 1269-1276.
12. Glensdorf, P., & Prigogine, I. Thermodynamic theory of Structure, Stability and fluctuations. Brussels: Wiley, 1971.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2018

УДК 621.647.23

**С.Б. Ковальчук, О.В. Горик***Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна***РІВНЯННЯ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ ДЛЯ КОМПОЗИТНИХ БРУСІВ ІЗ ПЛОСКОЮ ВІССЮ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ У ПРИРОДНІЙ КРИВОЛІНІЙНІЙ СИСТЕМІ КООРДИНАТ**

*У роботі отримані загальні залежності між компонентами напружено-деформованого стану для композитного дискретно-неоднорідного бруса із криволінійною плоскою віссю та постійною по довжині структурною будовою, що перебуває під дією статичних, динамічних та температурних навантажень, за пружної роботи ортотропних матеріалів фаз. Для отримання залежностей застосована природна, для будови бруса, криволінійна циліндрична система координат, що дозволило вивести інваріантні до форми осі бруса рівняння, які можуть бути використані для розв'язання широкого кола прикладних задач.*

*Ключові слова:* криволінійний брус; композит; природна система координат; напруження; деформації; переміщення.

*Форм. 32. Рис. 4. Літ. 8***С.Б. Ковальчук, О.В. Горик****УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ КОМПОЗИТНЫХ БРУСЬЕВ С ПЛОСКОЙ ОСЬЮ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В ЕСТЕСТВЕННОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ**

*В работе получены общие зависимости между компонентами напряженно-деформированного состояния для композитного дискретно-неоднородного бруса с криволинейной плоской осью и неизменным по длине структурным строением, который находится под действием статических, динамических и температурных нагрузок, при упругой работе ортотропных материалов фаз. Для получения зависимостей применена естественная, для строения бруса, криволинейная цилиндрическая система координат, что позволило вывести инвариантные к форме оси бруса уравнения, которые могут быть использованы для решения широкого круга прикладных задач.*

*Ключевые слова:* криволинейный брус; композит; естественная система координат; напряжения; деформации; перемещения.

**S. Kovalchuk, O. Goryk****EQUATIONS OF THE ELASTICITY THEORY FOR COMPOSITE BARS WITH A PLANE AXLE OF AN ARBITRARY FORM IN NATURAL CURVILINEAR COORDINATE SYSTEM**

*The work deals with the general dependences between the components of the stress-strain state for the composite discrete-inhomogeneous bar with a curvilinear plane axle of an arbitrary shape and the length-unchanged structural construction, that is subject to static, dynamic and temperature loads during the elastic behavior of orthotropic phase materials. To describe the geometry and the structural construction of the inhomogeneous bar it is proposed the use of natural curvilinear cylindrical coordinate system, which is tied to the shape of its axle, that allowed to reduce the number of variables in the functions of elastic characteristics and external load. The dependences between the components of the stress-strain state are constructed on the basis of the equations of the linear theory of elasticity in a rectangular spatial coordinate system by their coordinate transformation to the natural coordinate system. This made it possible to obtain relations invariant with respect to the shape of the bar, which can be used to solve a wide range of problems in mechanics of elastic deformation of structural elements of arbitrary curvature.*

*Keywords:* curvilinear bar; composite; natural coordinate system; stresses; strains; displacement.

**Постановка проблеми.** Із розвитком технологій створення конструкційних матеріалів, у сучасному машинобудуванні та будівництві все більш актуальним стає застосування композитних матеріалів у конструкціях різного призначення. Однак суттєвою перешкодою на шляху широкого впровадження композитних матеріалів у практику проектування є недостатній рівень розвитку аналітичних теорій деформування композитних елементів та систем. Меншою мірою це стосується композитних оболонок та пластин, більшою – композитних брусів. І якщо для прямолінійних композитних брусів окремі види деформування достатньо добре досліджені, як на фундаментальному [1], так і прикладному рівні [2], то для криволінійних брусів і кілець, які широко представлені в інженерних конструкціях, зустрічаються лише розв'язки окремих задач для елементів із круговою віссю, наприклад [4, 5, 6, 7]. Тому дослідження, направлені на розвиток теорії деформування композитних криволінійних брусів, є актуальними і важливими, як з наукової так і з практичної точки зору.

Напружено-деформований стан (НДС) композитного криволінійного бруса у випадку пружного деформування теоретично може бути визначений шляхом розв'язання класичної системи рівнянь лінійної теорії пружності, отриманої у прямокутній декартовій, циліндричній

круговій або сферичній системах координат. Однак, застосування таких рівнянь створює додаткові математичні проблеми при врахуванні граничних умов та описанні структурної будови композитного бруса з криволінійною віссю. Більш зручним для розв'язання задач деформування таких елементів є застосування рівнянь отриманих для криволінійної системи координат, яка відповідає геометричній формі об'єкту розрахунку. У науковій літературі висвітлені рівняння для окремих випадків криволінійних систем, однак для побудови загальної теорії деформування криволінійних композитних брусів корисним буде більш узагальнений підхід, який передбачає застосування природної для будови бруса криволінійної циліндричної системи координат [8]. Така система координат дозволяє аналітично описати геометрію поверхонь криволінійного бруса, його структурну будову, фізико-механічні характеристики матеріалу та зовнішні навантаження із використанням функцій з найменшою кількістю незалежних змінних.

**Мета статті:** побудувати систему рівнянь лінійної теорії пружності у природній криволінійній циліндричній системі координат, як вихідну систему для розв'язання задач деформування композитних брусів із криволінійною плоскою віссю довільної форми та постійною по довжині структурною будовою.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо криволінійний композитний брус, утворений дискретними однозв'язними або багатозв'язними фазами  $P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_m$  різнорідного матеріалу, із чіткою границею розділу (рис. 1). Для бруса вважатимемо справедливою гіпотезу про абсолютно жорсткий контакт фаз, за якої виключені їх відносне зміщення та відрив.

Вісь бруса є плоскою шматково-гладкою кривою  $g_C$ , що проходить через центри жорсткості  $C$  усіх поперечних перерізів і лежить у площині симетрії бруса  $A$ . Поперечний переріз бруса має незмінну форму та структурну будову вздовж осі  $g_C$ .

Брус віднесений до прямокутної просторової декартової системи координат  $XYZ$  із правою системою осей та початком у точці  $O$ . Головна площина симетрії бруса  $A$  співпадає із координатною площиною  $XOZ$ .

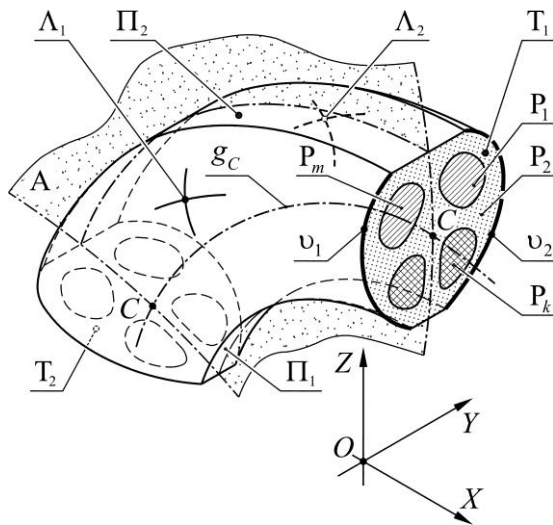


Рис. 1. Схема дискретно-неоднорідного бруса з криволінійною плоскою віссю

Зовнішню поверхню бруса складають бічні криволінійні поверхні  $\Lambda_\zeta$  ( $\zeta=1,2$ ) (рис. 1), із твірними  $v_\zeta$ , поздовжні циліндричні поверхні  $\Pi_\zeta$  та торцеві поверхні  $T_\zeta$ . Поверхні  $\Pi_\zeta$  та  $T_\zeta$  перпендикулярні до площини симетрії бруса  $A$ .

Вважатимемо, що у загальному випадку криволінійний брус перебуває під дією системи поверхневих та об'ємних навантажень різної природи.

Розглянемо теоретичні передумови та побудуємо загальний підхід до визначення НДС такого елемента у випадку пружної роботи матеріалів усіх фаз  $P_k$ .

У прямокутній просторовій системі координат  $XYZ$ , функції, які описують структурну будову та форму розглядуваного бруса, а також його навантаження, у загальному випадку будуть функціями трьох незалежних

змінних, що суттєво ускладнює задачу визначення компонентів НДС, навіть у випадку дискретно-неоднорідних брусів, що мають просту форму та типові навантаження. Спростити аналітичне описання задачі можна обравши, природну для будови розглядуваного криволінійного бруса систему координат [8]. Тому, як основну для отримання теоретичних залежностей між компонентами НДС та описання структурної будови бруса приймемо природну криволінійну циліндричну систему координат  $HEU$ .

У природній системі  $HEU$  усі поздовжні волокна бруса разом із центральною віссю належать однопараметричному сімейству координатних циліндричних поверхонь  $\Pi_\zeta^g$  ( $\Pi_\zeta \in \Pi_\zeta^g$ ), а поперечні перерізи – однопараметричному сімейству координатних циліндричних поверхонь  $T_\eta^f$

( $T_\xi \in T_\eta^f$ ). Лінії перетину координатних поверхонь  $T_\eta^f$  та  $\Pi_\xi^g$  із площиною  $XOZ$  належать, відповідно, однопараметричним ортогональним сімействам кривих  $f_\eta$  та  $g_\xi$  (рис. 2):

$$f_\eta(x, z, \eta) = 0, \quad g_\xi(x, z, \xi) = 0, \quad (1)$$

де  $\eta, \xi$  – довільні дійсні сталі (криволінійні координати).

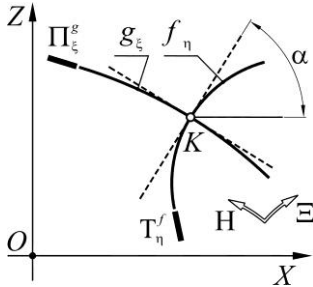


Рис. 2. Сліди координатних поверхонь природної системи на площині  $XOZ$

Розв'язок системи (1) дає зв'язок між координатами довільної точки у системах  $XYZ$  та  $НΞУ$

$$x = \omega_x(\eta, \xi), \quad z = \omega_z(\eta, \xi). \quad (2)$$

У [8] запропоновано ряд параметрів, які характеризують природну систему координат і дозволяють спростити запис отримуваних аналітичних співвідношень:

$$\kappa = \frac{\partial \omega_z / \partial \xi}{\partial \omega_x / \partial \xi} = - \frac{\partial \omega_x / \partial \eta}{\partial \omega_z / \partial \eta} = \text{tg } \alpha, \quad (3)$$

$$\lambda = - \frac{\partial \omega_z / \partial \xi}{\partial \omega_x / \partial \eta} = \frac{\partial \omega_x / \partial \xi}{\partial \omega_z / \partial \eta},$$

$$L_\eta^* = \text{sgn}(\partial \omega_z / \partial \eta) L_\eta, \quad L_\xi^* = \text{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) L_\xi, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – кут між дотичною до кривої  $f_\eta$  (нормаллю до  $g_\xi$ ) у довільній точці та віссю  $OX$  (рис. 2);  $L_\eta, L_\xi$  – коефіцієнти Ламе:

$$L_\eta = \sqrt{1 + \kappa^2} |\partial \omega_z / \partial \eta|, \quad L_\xi = \sqrt{1 + \kappa^2} |\partial \omega_x / \partial \xi|. \quad (5)$$

Рівняння теорії пружності та граничні умови, для розглядуваного криволінійного бруса у природній системі координат  $НΞУ$  можуть бути побудовані шляхом перетворення відомих рівнянь у прямокутній просторовій  $XYZ$  або циліндричній круговій системах координат, які є частинними випадками криволінійної ортогональної системи координат. Далі опишемо основні етапи та ключові моменти такого перетворення.

**Рівняння рівноваги.** При деформуванні розглядуваного бруса, у загальному випадку навантаження на гранях елемента, виділеного нескінченно близькими координатними поверхнями  $T_\eta^f, \Pi_\xi^g$  та  $Y_y$  системи  $НΞУ$ , будуть діяти нормальні ( $\sigma_\eta, \sigma_\xi, \sigma_y$ ) та дотичні ( $\tau_{\eta\xi}, \tau_{\xi\eta}, \tau_{\eta y}, \tau_{y\eta}, \tau_{\xi y}, \tau_{y\xi}$ ) компоненти напруженого стану (рис. 3).

Прийнята тут система позначень компонент НДС передбачає, що перша літера у індексі вказує на напрям нормалі до розглядуваної площадки (ділянки координатної поверхні  $T_\eta^f, \Pi_\xi^g$  або  $Y_y$ ), а друга – напрям дії відповідної компоненти. Однак у випадку коли обидві літери індексу однакові будемо зазначати лише одну літеру.

Оскільки система координат  $НΞУ$  є ортогональною, то для дотичних складових внутрішніх зусиль буде справедливим закон парності:  $\tau_{\eta y} = \tau_{y\eta}, \tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi}, \tau_{\xi y} = \tau_{y\xi}$ .

Згідно із співвідношеннями між компонентами тензора другого рангу у прямокутній просторовій та природній криволінійній системах координат, отриманими у [8], між компонентами напруженого стану у системах  $XYZ$  та  $НΞУ$  мають місце наступні залежності:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1}{1 + \kappa^2} (\sigma_\xi + \kappa^2 \sigma_\eta - 2\kappa \tau_{\eta\xi}), & \tau_{xz} &= \frac{1}{1 + \kappa^2} (\kappa (\sigma_\xi - \sigma_\eta) + (1 - \kappa^2) \tau_{\eta\xi}), \\ \sigma_z &= \frac{1}{1 + \kappa^2} (\kappa^2 \sigma_\xi + \sigma_\eta + 2\kappa \tau_{\eta\xi}), & \tau_{xy} &= \text{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} (\tau_{\xi y} - \kappa \tau_{y\eta}), \\ \sigma_y &= \sigma_y, & \tau_{yz} &= \text{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} (\kappa \tau_{\xi y} + \tau_{y\eta}). \end{aligned} \quad (6)$$

Зв'язок між похідними довільної функції трьох змінних  $\varphi(x, y, z)$  у системах  $XYZ$  та  $НΞУ$

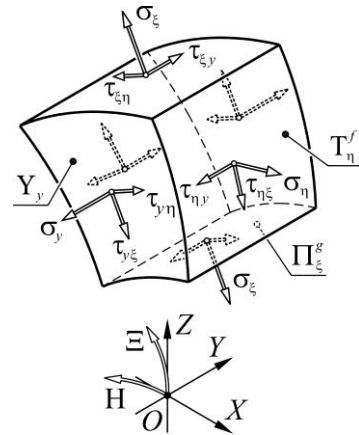


Рис. 3. Елементарний об'єм бруса із компонентами напружень

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{|\mathbf{J}|} \left( \frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} - \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right), \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{1}{|\mathbf{J}|} \left( -\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right), \quad (7)$$

де  $|\mathbf{J}|$  – визначник Якобі:

$$|\mathbf{J}| = \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} \frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} - \frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} = -L_\xi^* L_\eta^*. \quad (8)$$

Зв'язок між компонентами об'ємного навантаження, а також сил інерції, у випадку нерівномірного руху бруса, у прямокутній просторовій  $XYZ$  та природній криволінійній  $\Xi Y$  системах координат можна виразити, як зв'язок між компонентами вектора. Якщо  $\Sigma_x^V, \Sigma_y^V, \Sigma_z^V$  –

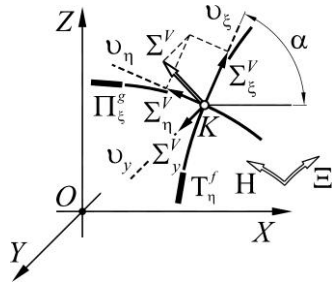


Рис. 4. Компоненти вектора  $\Sigma^V$  у природній криволінійній системі координат

компоненти сумарного навантаження  $\Sigma^V$  від об'ємних сил та сил інерції у прямокутній просторовій системі  $XYZ$ , а  $\Sigma_\eta^V, \Sigma_\xi^V, \Sigma_y^V$  – компоненти цих сил у природній криволінійній системі  $\Xi Y$  (рис. 4), то зв'язок між ними виражатимуть наступні співвідношення [8]:

$$\Sigma_x^V = \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right) \frac{\Sigma_\xi^V - \kappa \Sigma_\eta^V}{\sqrt{1 + \kappa^2}}, \quad \Sigma_z^V = \operatorname{sgn} \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right) \frac{\Sigma_\eta^V + \kappa \Sigma_\xi^V}{\sqrt{1 + \kappa^2}}. \quad (9)$$

Проекції об'ємних сил, віднесених до одиниці маси, на нормалі  $u_\eta, u_\xi, u_y$  до координатних поверхонь  $T_\eta^f, \Pi_\xi^g, Y_y$ , позначимо, відповідно –  $F_\eta^V, F_\xi^V, F_y^V$ , а проекції повного переміщення –  $\tilde{w}, \tilde{u}, \tilde{v}$ . Тоді компоненти сумарного об'ємного навантаження у природній системі координат

можна записати наступним чином

$$\Sigma_\eta^V = \mu^\rho \left( F_\eta^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right), \quad \Sigma_\xi^V = \mu^\rho \left( F_\xi^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right), \quad \Sigma_y^V = \mu^\rho \left( F_y^V - \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial t^2} \right), \quad (10)$$

де  $\mu^\rho$  – функція розподілу густини матеріалів бруса.

Після застосування до статичних рівнянь лінійної теорії пружності у прямокутній просторовій системі координат  $XYZ$  послідовно залежностей (2), (7), (8) та (6), і виконання ряду перетворень та перегрупувань з урахуванням (4), отримана наступна система рівнянь

$$\left. \begin{aligned} -\kappa \Psi_1 + \Psi_2 + L_\xi^* \sqrt{1 + \kappa^2} \Sigma_x^V &= 0; \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial \eta} + L_\xi \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial \xi} + \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{\lambda \tau_{\xi y}}{1 + \kappa^2} - \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{\tau_{\eta y}}{1 + \kappa^2} + \Sigma_y^V &= 0; \\ \Psi_1 + \kappa \Psi_2 + L_\xi^* \sqrt{1 + \kappa^2} \Sigma_z^V &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де для спрощення введене позначення

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \lambda \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi \eta}}{\partial \xi} + L_\xi \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial y} + \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{\sigma_\xi - \sigma_\eta}{1 + \kappa^2} + \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{2\lambda \tau_{\xi \eta}}{1 + \kappa^2}, \\ \Psi_2 &= \lambda \frac{\partial \tau_{\eta \xi}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_\xi}{\partial \xi} + L_\xi \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial y} + \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{\lambda (\sigma_\xi - \sigma_\eta)}{1 + \kappa^2} - \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{2\tau_{\eta \xi}}{1 + \kappa^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Після розв'язку першого та третього рівнянь системи (11) відносно  $\Psi_1$  та  $\Psi_2$  і підстановки (9), (10) та (12), отримаємо наступну систему рівнянь рівноваги

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi \eta}}{\partial \xi} + L_\xi \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial y} + \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{\sigma_\xi - \sigma_\eta}{1 + \kappa^2} + \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{2\lambda \tau_{\xi \eta}}{1 + \kappa^2} + L_\xi \mu^\rho \left( F_\eta^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right) &= 0; \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\eta \xi}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_\xi}{\partial \xi} + L_\xi \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial y} + \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{\lambda (\sigma_\xi - \sigma_\eta)}{1 + \kappa^2} - \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{2\tau_{\eta \xi}}{1 + \kappa^2} + L_\xi \mu^\rho \left( F_\xi^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right) &= 0; \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial \xi} + L_\xi \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{\lambda \tau_{\xi y}}{1 + \kappa^2} - \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{\tau_{\eta y}}{1 + \kappa^2} + \mu^\rho \left( F_y^V - \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial t^2} \right) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Системі (13) можна надати простішого вигляду використавши перше співвідношення (3)

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{\partial \sigma_{\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi \eta}}{\partial \xi} + L_{\xi} \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial y} + \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} (\sigma_{\xi} - \sigma_{\eta}) + 2\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tau_{\xi \eta} + L_{\xi} \mu^p \left( F_{\eta}^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right) &= 0; \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\xi \eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_{\xi}}{\partial \xi} + L_{\xi} \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} (\sigma_{\xi} - \sigma_{\eta}) - 2 \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tau_{\xi \eta} + L_{\xi} \mu^p \left( F_{\xi}^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right) &= 0; \\ \lambda \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial \xi} + L_{\xi} \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tau_{\xi y} - \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tau_{\eta y} + \mu^p \left( F_y^V - \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial t^2} \right) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

*Геометричні співвідношення.* Отримання системи геометричних співвідношень Коші загалом може бути виконане аналогічно статичним рівнянням, однак у даному випадку необхідно виконати перетворення як компонент деформацій, так і компонент вектора переміщень.

Компоненти повного переміщення довільної точки у системі  $XYZ$  позначимо відповідно  $u, v, w$ . Тоді співвідношення між переміщеннями у системах координат  $XYZ$  та  $HEY$ , подібно до (9) матимуть такий вигляд

$$u = \operatorname{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} (\tilde{u} - \kappa \tilde{w}), \quad v = \tilde{v}, \quad w = \operatorname{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} (\tilde{w} + \kappa \tilde{u}). \quad (15)$$

Компоненти деформованого стану у системі координат  $HEY$  позначимо відповідно до компонентів напруженого стану (рис. 3). Лінійні деформації у напрямку нормалей до відповідних граней елемента бруса, позначимо відповідно:  $\varepsilon_{\eta}, \varepsilon_{\xi}, \varepsilon_y$ . Кутові деформації елемента позначимо відповідно:  $\gamma_{\eta \xi}, \gamma_{\xi \eta}, \gamma_{\xi y}, \gamma_{y \xi}, \gamma_{\eta y}, \gamma_{y \eta}$ . Оскільки природна система координат є ортогональною, то для кутових деформації справедливими будуть рівності:  $\gamma_{\eta y} = \gamma_{y \eta}, \gamma_{\xi y} = \gamma_{y \xi}, \gamma_{\xi \eta} = \gamma_{\eta \xi}$ .

Залежності між компонентами деформованого стану у прямокутній просторовій системі  $XYZ$  та криволінійній циліндричній  $HEY$ , подібно до (6), запишемо у такому вигляді

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\eta} &= \frac{1}{1 + \kappa^2} (\kappa^2 \varepsilon_x + \varepsilon_z - \kappa \gamma_{zx}), & \gamma_{\eta \xi} &= \frac{1}{1 + \kappa^2} (2\kappa (\varepsilon_z - \varepsilon_x) + (1 - \kappa^2) \gamma_{zx}), \\ \varepsilon_{\xi} &= \frac{1}{1 + \kappa^2} (\varepsilon_x + \kappa^2 \varepsilon_z + \kappa \gamma_{zx}), & \gamma_{\xi y} &= \operatorname{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} (\gamma_{xy} + \kappa \gamma_{yz}), \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_y, & \gamma_{y \eta} &= -\operatorname{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} (\kappa \gamma_{xy} - \gamma_{yz}). \end{aligned} \quad (16)$$

Підставивши до співвідношень (16) послідовно геометричні залежності у прямокутній просторовій системі координат  $XYZ$  та співвідношення (15), після виконання перетворень отримаємо геометричні співвідношення для природної системи координат  $HEY$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\eta} &= \frac{\lambda}{L_{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \eta} + \frac{\tilde{u}}{1 + \kappa^2} \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \right), & \gamma_{\eta \xi} &= \frac{1}{L_{\xi}} \left( \lambda \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} - \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \frac{\tilde{w}}{1 + \kappa^2} \right) + \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \xi} + \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \frac{\tilde{u}}{1 + \kappa^2} \right) \right), \\ \varepsilon_{\xi} &= \frac{1}{L_{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} - \frac{\tilde{w}}{1 + \kappa^2} \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} \right), & \gamma_{\xi y} &= \frac{1}{L_{\xi}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}, & \gamma_{y \eta} &= \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (17)$$

Із використанням (3), співвідношення (17) перетворені до такого вигляду

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\eta} &= \frac{\lambda}{L_{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \eta} + \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{u} \right), & \gamma_{\eta \xi} &= \frac{1}{L_{\xi}} \left( \lambda \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{w} \right) + \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \xi} + \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tilde{u} \right) \right), \\ \varepsilon_{\xi} &= \frac{1}{L_{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} - \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tilde{w} \right), & \gamma_{\xi y} &= \frac{1}{L_{\xi}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}, & \gamma_{y \eta} &= \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (18)$$

*Фізичні залежності.* Розглянемо випадок, коли фази  $P_k$  бруса володіють властивостями криволінійної циліндричної ортотропії [4] і у довільній точці  $K(\eta_K, \xi_K, y_K)$  дві з площин пружної симетрії є дотичними до відповідних координатних поверхонь  $T_\eta^f|_{\eta=\eta_K}$  та  $\Pi_\xi^g|_{\xi=\xi_K}$ , а третя співпадає із площиною  $\Upsilon_y|_{y=y_K}$ . Тоді пружні властивості кожної із фаз  $P_k$  можуть бути описані сукупністю 12-ти пружних сталей:  $E_\eta^{[k]}, E_\xi^{[k]}, E_y^{[k]}$  – модулі пружності у напрямках нормалей до координатних поверхонь  $T_\eta^f$ ,  $\Pi_\xi^g$  та  $\Upsilon_y$ ;  $G_{\eta\xi}^{[k]}, G_{\xi y}^{[k]}, G_{y\eta}^{[k]}$  – модулі зсуву у дотичних до координатних поверхонь площинах;  $\nu_{\eta\xi}^{[k]}, \nu_{\xi\eta}^{[k]}, \nu_{\xi y}^{[k]}, \nu_{y\xi}^{[k]}, \nu_{\eta y}^{[k]}, \nu_{y\eta}^{[k]}$  – коефіцієнти Пуассона.

Для врахування об'ємних та термічних навантажень до пружних характеристик необхідно додати густину матеріалів фаз –  $\rho^{[k]}$  та коефіцієнти лінійного температурного розширення –  $\vartheta_\eta^{[k]}, \vartheta_\xi^{[k]}, \vartheta_y^{[k]}$ . Таким чином, у випадку дії статичних, динамічних та температурних навантажень, фізико-механічні властивості матеріалу фази  $P_k$ , можуть бути описані сукупністю сталей

$$\left\| E_\eta^{[k]}, E_\xi^{[k]}, E_y^{[k]}, G_{\eta\xi}^{[k]}, G_{\xi y}^{[k]}, G_{y\eta}^{[k]}, \nu_{\eta\xi}^{[k]}, \nu_{\xi\eta}^{[k]}, \nu_{\xi y}^{[k]}, \nu_{y\xi}^{[k]}, \nu_{\eta y}^{[k]}, \nu_{y\eta}^{[k]}, \rho^{[k]}, \vartheta_\eta^{[k]}, \vartheta_\xi^{[k]}, \vartheta_y^{[k]} \right\| = \left\| S_a^{[k]} \right\|, \quad (19)$$

де  $k=1\dots m$ .

Для ідеально-пружного суцільного тіла із 12-ти пружних сталей тільки 9 є незалежними, решта пов'язані співвідношеннями [4]:

$$E_\eta^{[k]} \nu_{\xi\eta}^{[k]} = E_\xi^{[k]} \nu_{\eta\xi}^{[k]}, \quad E_\xi^{[k]} \nu_{y\xi}^{[k]} = E_y^{[k]} \nu_{\xi y}^{[k]}, \quad E_y^{[k]} \nu_{\eta y}^{[k]} = E_\eta^{[k]} \nu_{y\eta}^{[k]}. \quad (20)$$

Нехай у прямокутній системі  $XYZ$  задані функціональні залежності, які описують форму поперечних перерізів бруса, його фаз та кожного волокна. Тоді координати деякої точки  $K$  дозволяють однозначно встановити її приналежність до відповідної фази  $P_k$  композитного бруса, а отже і фізико-механічні властивості матеріалу у даній точці, що задані сукупністю сталей (19). Тому для множини внутрішніх точок композитного бруса можна говорити про однозначну залежність фізико-механічних властивостей матеріалу у точці від її координат  $x_K, y_K, z_K$ , тобто має місце функціональна залежність  $\mu_a^S = \mu_a^S(x_K, y_K, z_K)$ , або з урахуванням (2)

$$\mu_a^S = \mu_a^S(x_K, y_K, z_K) = \mu_a^S(\omega_x(\eta_K, \xi_K), y_K, \omega_x(\eta_K, \xi_K)) = \mu_a^S(\eta_K, \xi_K, y_K). \quad (21)$$

Зважаючи на прийняту незмінність структури поперечного перерізу по довжині бруса, довільне поздовжнє волокно бруса  $g_{\xi_K}$  матиме незмінні характеристики по довжині ( $\eta_K = \text{const}$ ) у природній системі  $H\Xi Y$ , що зменшує кількість незалежних змінних у функціях фізико-механічних характеристик до двох

$$\mu_a^S = \mu_a^S(\xi_K, y_K). \quad (22)$$

Розкриємо загальні підходи до аналітичного описання функції (22). Областю визначення функції (22) є множина  $P$  усіх точок бруса, за виключенням границь фаз, де вона є невизначеною. Однорідні фази  $P_k$  бруса можна розглядати, як підмножини множини  $P$  усіх точок бруса

$$P_k \subset P, \quad \bigcup_{k=1}^m P_k = P,$$

причому  $P_k \cap P_j = \emptyset, k \neq j$ .

Уведемо характеристичні функції кожної з множин  $P_k$

$$p_k = p_k(g_{\xi_K}) = \begin{cases} 1, & g_{\xi_K} \in P_k, \\ 0, & g_{\xi_K} \notin P_k. \end{cases} \quad (23)$$

Функція (23) визначає приналежність довільної точки  $K$  до фази композита. На основі (23) можна записати функції фізико-механічних характеристик окремих фаз бруса

$$\tilde{\mu}_a^{S[k]} = S_a^{[k]} p_k(\xi_K, y_K). \quad (24)$$

Функції (24) набувають значень відповідної характеристики  $S_a^{[k]}$  (19) матеріалу  $k$ -ї фази, якщо розглядувана точка знаходиться у межах фази, і дорівнює нулю, якщо точка знаходиться поза її межами. Таким чином, вираз (24) визначає фінитну функцію із обмеженим носієм:

$\text{supp } \tilde{\mu}_a^{S[k]} = P_k$ , поза межами якого, функція  $\tilde{\mu}_a^{S[k]}$  дорівнює нулю, а на границях має розриви 1-го роду і змінюється стрибкоподібно.

Суперпозиція функцій (24) для всіх фаз бруса визначає функцію відповідної фізико-механічної характеристики для всього бруса

$$\mu_a^S = \tilde{\mu}_a^{S[1]} + \tilde{\mu}_a^{S[2]} + \dots + \tilde{\mu}_a^{S[k]} + \dots + \tilde{\mu}_a^{S[m]} = \sum_{k=1}^m \left( S_a^{[k]} p_k(\xi_K, y_K) \right), \text{supp } \mu_a^S = P, \quad (25)$$

яка, в залежності від розташування розглядуваної точки  $K$  по відношенню до фаз композита, набуває значень відповідних фізико-механічних характеристик і дорівнює нулю, якщо  $K \notin P$ .

Таким чином, формування функцій фізико-механічних властивостей (25) композитного бруса потребує аналітичного представлення характеристичних функцій (23) для усіх його фаз. У даній роботі не будемо детально зупинятись на способах представлення даних функцій, однак зазначимо, що функції (23) можуть бути побудовані на основі функції Хевісайда, як, наприклад, це зроблено у [3] для прямих композитних брусів із фазами прямокутної форми.

Компоненти деформованого стану незалежно від обраної системи координат за пружної роботи матеріалів фаз пов'язані лінійною залежністю із відповідними компонентами напруженого стану. Згідно з прийнятою структурною будовою бруса, у природній системі координат НΞУ площини пружної симетрії матеріалів фаз довільного нескінченно малого елемента бруса співпадають із площинами дотичними до відповідних координатних поверхонь  $T_\eta^f, \Pi_\xi^g, \Upsilon_y$ . Тоді, у системі НΞУ залежності між компонентами напруженого та деформованого станів у довільній точці бруса не будуть, принципово, відрізнятись від відомих співвідношень для ортотропного тіла [4], і з урахуванням наявності температурного поля запишуться так:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\eta &= \frac{\sigma_\eta}{\mu_\eta^E} - \frac{\mu_{\xi\eta}^v \sigma_\xi}{\mu_\xi^E} - \frac{\mu_{y\eta}^v \sigma_y}{\mu_y^E} + \mu_\eta^g T, & \gamma_{\eta\xi} &= \frac{1}{\mu_{\eta\xi}^G} \tau_{\eta\xi}, \\ \varepsilon_\xi &= \frac{\sigma_\xi}{\mu_\xi^E} - \frac{\mu_{y\xi}^v \sigma_y}{\mu_y^E} - \frac{\mu_{\eta\xi}^v \sigma_\eta}{\mu_\eta^E} + \mu_\xi^g T, & \gamma_{\xi y} &= \frac{1}{\mu_{\xi y}^G} \tau_{\xi y}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{\mu_y^E} - \frac{\mu_{\eta y}^v \sigma_\eta}{\mu_\eta^E} - \frac{\mu_{\xi y}^v \sigma_\xi}{\mu_\xi^E} + \mu_y^g T, & \gamma_{y\eta} &= \frac{1}{\mu_{y\eta}^G} \tau_{y\eta}, \end{aligned} \quad (26)$$

де  $T$  – інтенсивність температурного поля у розглядуваній точці.

Необхідно зауважити, що співвідношення (26) передбачають, що величина температури  $T$  недостатня для суттєвої зміни пружних сталих матеріалів фаз бруса.

**Граничні умови.** На поверхні бруса функції напружень, отримані шляхом розв'язання рівнянь (13) або (14), мають відповідати його зовнішньому навантаженню, а функції переміщень – накладеним обмеженням, тобто мають задовольняти відповідно статичні та кінематичні граничні умови. Також, згідно основних принципів механіки при розв'язанні задач деформування кінематичні умови завжди можуть бути замінені еквівалентними, за впливом на деформації бруса, статичними умовами. Тому для розглядуваного бруса далі обмежимося розглядом тільки статичних граничних умов.

У природній системі координат НΞУ, яка відповідає описаним вище умовам, для будь-якого нескінченно малого поверхневого елемента розглядуваного бруса, умови статичної рівноваги запишуться аналогічно відомих співвідношенням:

$$p_\eta = \sigma_\eta l_\eta + \tau_{\eta y} m_y + \tau_{\eta\xi} n_\xi, \quad p_\xi = \tau_{\xi\eta} l_\eta + \tau_{\xi y} m_y + \sigma_\xi n_\xi, \quad p_y = \tau_{y\eta} l_\eta + \sigma_y m_y + \tau_{y\xi} n_\xi, \quad (27)$$

де  $p_\eta, p_y, p_\xi$  – інтенсивності компонентів навантаження, розподіленого по поверхні бруса, що діють в околі розглядуваної точки;  $l_\eta, n_\xi, m_y$  – косинуси кутів між зовнішньою нормаллю поверхні бруса у розглядуваній точці та додатнім напрямом (обраним напрямом зростання параметрів  $\eta$  та  $\xi$ ) нормалей  $v_\eta, v_\xi, v_y$  координатних поверхонь (рис. 4).

Конкретизуємо граничні умови (27) для поверхонь розглядуваного композитного бруса. Торцеві циліндричні поверхні  $T_\zeta$  розглядуваного бруса (рис. 1) у природній системі координат НΞУ належать сімейству координатних поверхонь  $T_\eta^f$ , тому напрямні косинуси нормалей у



довільній їх точці дорівнюватимуть:  $l_{\eta}^{\Pi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$ ,  $n_{\xi}^{\Pi_{\zeta}} = 0$ ,  $m_y^{\Pi_{\zeta}} = 0$ . Тоді граничні умови (27) для вказаних поверхонь набудуть наступного вигляду:

$$\sigma_{\eta} |_{\eta=\eta_{\zeta}} = (-1)^{\zeta} p_{\eta}^{\Pi_{\zeta}}, \quad \tau_{\xi\eta} |_{\eta=\eta_{\zeta}} = (-1)^{\zeta} p_{\xi}^{\Pi_{\zeta}}, \quad \tau_{y\eta} |_{\eta=\eta_{\zeta}} = (-1)^{\zeta} p_y^{\Pi_{\zeta}}, \quad \zeta = 1, 2. \quad (28)$$

Поздовжні циліндричні поверхні  $\Pi_{\zeta}$  у природній системі координат належать сімейству координатних поверхонь  $\Pi_{\xi}^g$ , відповідно напрямні косинуси у будь-якій їх точці дорівнюватимуть:  $l_{\eta}^{\Pi_{\zeta}} = 0$ ,  $n_{\xi}^{\Pi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$ ,  $m_y^{\Pi_{\zeta}} = 0$ . Тоді граничні умови на даних поверхнях:

$$\tau_{\eta\xi} |_{\xi=\xi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta} p_{\eta}^{\Pi_{\zeta}}, \quad \sigma_{\xi} |_{\xi=\xi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta} p_{\xi}^{\Pi_{\zeta}}, \quad \tau_{y\xi} |_{\xi=\xi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta} p_y^{\Pi_{\zeta}}. \quad (29)$$

Для поздовжніх бічних граней  $\Lambda_1$  та  $\Lambda_2$  (рис. 1) серед напрямних косинусів нулю дорівнюватиме лише  $l_{\eta}$ . Тоді, з урахуванням того, що дані поверхні вільні від навантажень, умови (27) набудуть наступного вигляду:

$$\left( \tau_{\eta y} m_y + \tau_{\eta\xi} n_{\xi} \right) |_{y=v_{\zeta}} = p_{\eta}^{\Lambda_{\zeta}}, \quad \left( \tau_{\xi y} m_y + \sigma_{\xi} n_{\xi} \right) |_{y=v_{\zeta}} = p_{\xi}^{\Lambda_{\zeta}}, \quad \left( \sigma_y m_y + \tau_{y\xi} n_{\xi} \right) |_{y=v_{\zeta}} = p_y^{\Lambda_{\zeta}}. \quad (30)$$

Рівняння (14), (18) та (26) разом із граничними умовами (28)-(30) складають замкнуту систему рівнянь теорії пружності просторової задачі деформування дискретно-неоднорідного композитного бруса із криволінійною плоскою віссю.

Для прямокутних брусів у яких висота поперечного перерізу значно перевищує ширину, а бічні поверхні вільні від навантажень, зміною компонент НДС за координатою у можна знехтувати, що приводить вихідну тривимірну задачу до двовимірної плоскої, якій відповідатимуть наступні рівняння та граничні умови

$$\left. \begin{aligned} & \lambda \frac{\partial \sigma_{\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} (\sigma_{\xi} - \sigma_{\eta}) + 2\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tau_{\eta\xi} + L_{\xi} \mu^p \left( F_{\eta}^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right) = 0; \\ & \lambda \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_{\xi}}{\partial \xi} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} (\sigma_{\xi} - \sigma_{\eta}) - 2 \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tau_{\eta\xi} + L_{\xi} \mu^p \left( F_{\xi}^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right) = 0; \\ & \varepsilon_{\eta} = \frac{\lambda}{L_{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \eta} + \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{u} \right); \\ & \varepsilon_{\xi} = \frac{1}{L_{\xi}} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} - \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tilde{w} \right); \\ & \gamma_{\eta\xi} = \frac{1}{L_{\xi}} \left( \lambda \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \tilde{w} \right) + \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \xi} + \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \tilde{u} \right) \right), \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \varepsilon_{\eta} = \frac{\sigma_{\eta}}{\mu_{\eta}^E} - \frac{\mu_{\xi\eta}^V \sigma_{\xi}}{\mu_{\xi}^E} + \mu_{\eta}^g T; \\ & \varepsilon_{\xi} = \frac{\sigma_{\xi}}{\mu_{\xi}^E} - \frac{\mu_{\eta\xi}^V \sigma_{\eta}}{\mu_{\eta}^E} + \mu_{\xi}^g T; \\ & \gamma_{\eta\xi} = \frac{1}{\mu_{\eta\xi}^G} \tau_{\eta\xi}. \end{aligned} \quad (31)$$

*Приклади застосування.* За необхідності отримані рівняння просторової та плоскої задач можуть бути конкретизовані під задану форму композитного бруса шляхом визначення параметрів  $\lambda$ ,  $\kappa$  і  $\alpha$  та коефіцієнтів Ламе  $L_{\eta}$  і  $L_{\xi}$  відповідної природної системи координат НЭУ. Наприклад, розглядаючи випадок бруса із прямолінійною віссю для відповідної прямокутної просторової системи координат, згідно з (2)-(5) матимемо:  $\omega_x = \xi$ ,  $\omega_z = \eta$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\kappa = 0$ ,  $\lambda = 1$ ,  $L_{\xi} = 1$ ,  $L_{\eta} = 1$ . Аналогічно, для бруса із круговою віссю, якому відповідає циліндрична кругова система координат, матимемо наступні параметри:  $\omega_x = \xi \cos \eta$ ,  $\omega_z = \xi \sin \eta$ ,  $\alpha = \eta$ ,  $\kappa = \operatorname{tg} \eta$ ,  $\lambda = 1/\xi$ ,  $L_{\xi} = 1$ ,  $L_{\eta} = |\xi|$ . Такі значення параметрів та коефіцієнтів приводять системи рівнянь (13) та (17) до загальновідомого вигляду, що опосередковано підтверджує правильність отриманих співвідношень.

У випадку бруса із параболічною формою, що утворений сукупністю поздовжніх волокон, які складають сімейство конфокальних парабол із фокусами у початку прямокутної системи координат  $XYZ$ , параметри природної системи НЭУ будуть дорівнювати:  $\omega_x = \xi \eta$ ,  $\omega_z = \xi^2/2 - \eta^2/2$ ,  $\alpha = \operatorname{arctg}(\xi/\eta)$ ,  $\kappa = \xi/\eta$ ,  $\lambda = -1$ ,  $L_{\eta} = L_{\xi} = \sqrt{\eta^2 + \xi^2}$ . Тоді статичні (13) та геометричні (17) рівняння просторової задачі набудуть наступного вигляду

$$\left. \begin{aligned}
 & -\frac{\partial \sigma_{\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \sqrt{\eta^2 + \xi^2} \frac{\partial \tau_{\eta y}}{\partial y} + \frac{\eta(\sigma_{\xi} - \sigma_{\eta}) + 2\xi\tau_{\eta\xi}}{\eta^2 + \xi^2} + \sqrt{\eta^2 + \xi^2} \mu^p \left( F_{\eta}^V - \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} \right) = 0; \\
 & -\frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma_{\xi}}{\partial \xi} + \sqrt{\eta^2 + \xi^2} \frac{\partial \tau_{\xi y}}{\partial y} + \frac{\xi(\sigma_{\xi} - \sigma_{\eta}) - 2\eta\tau_{\xi\eta}}{\eta^2 + \xi^2} + \sqrt{\eta^2 + \xi^2} \mu^p \left( F_{\xi}^V - \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} \right) = 0; \\
 & -\frac{\partial \tau_{y\eta}}{\partial \eta} + \frac{\partial \tau_{y\xi}}{\partial \xi} + \sqrt{\eta^2 + \xi^2} \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\xi\tau_{y\xi} - \eta\tau_{y\eta}}{\eta^2 + \xi^2} + \mu^p \left( F_y^V - \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial t^2} \right) = 0,
 \end{aligned} \right\} (32)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_{\xi} &= \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \xi^2}} \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \xi} - \frac{\eta \tilde{w}}{\eta^2 + \xi^2} \right); & \gamma_{\xi y} &= \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \xi^2}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}; \\
 \varepsilon_{\eta} &= \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \xi^2}} \left( \frac{\xi \tilde{u}}{\eta^2 + \xi^2} - \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \eta} \right); & \gamma_{y\eta} &= \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} - \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \xi^2}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \eta}; \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}, & \gamma_{\eta\xi} &= \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \xi^2}} \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \xi} - \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \eta} + \frac{\eta \tilde{u} - \xi \tilde{w}}{\eta^2 + \xi^2} \right).
 \end{aligned} \right\}$$

Аналогічно можуть бути отримані рівняння теорії пружності для брусів з іншою формою осі. Однак більш цікавими є узагальнені розв'язки на основі вихідних систем рівнянь.

**Висновок.** Таким чином, отримано систему рівнянь просторової ((13), (17), (26)) та плоскої (31) задач теорії пружності для дискретно-неоднорідного композитного бруса із плоскою віссю довільної форми у випадку дії об'ємних, динамічних та температурних навантажень. Дані співвідношення за структурою не залежать від форми криволінійної осі бруса і носять загальний характер та описують залежності між компонентами НДС криволінійного бруса у найбільш простій для аналізу і застосування формі.

Отримані рівняння дозволяють будувати розв'язки задач деформування таких елементів у загальному вигляді, формально охоплюючи усі з можливих форм їх поздовжньої осі, що дозволяє будувати загальні підходи до аналізу та визначення НДС дискретно-неоднорідних криволінійних брусів із довільною будовою поперечних перерізів та формою осі.

#### Література:

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 708с.
2. Пискунов В.Г. Итерационная аналитическая теория в механике слоистых композитных систем / В.Г. Пискунов // Механика композитных материалов. – 2003. – Т.39, №1. – С.2-24.
3. Горик О.В. Механіка деформування композитних брусів / О.В. Горик, В.Г. Пискунов, В.М. Череди́ков. – Полтава-Київ: АСМІ, 2008. – 402с.
4. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416с.
5. Tolf G. Stresses in a Cerved Laminated Beam / G. Tolf // Fiber Sci. Technol. – 1983. – Vol.19, No.4. – P.243-267.
6. Шваб'юк В.І. Лінійне деформування, міцність і стійкість композитних оболонок середньої товщини / В.І. Шваб'юк, С.В. Ротко. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – 264с.
7. Верещака С.М. Напряженно деформированное состояние анизотропного криволинейного бруса при изгибе с учетом идеального и неидеального контактов между слоями / С.М. Верещака, А.В. Дейнека, О.Н. Орел, А.Г. Хализева // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – 2012. – №4. – С.74-87.
8. Ковальчук С.Б. Природна криволінійна циліндрична система координат для стержнів із плоскою віссю довільної форми / С.Б. Ковальчук, О.В. Горик // Вісник ОДАБА. – Одеса: ОДАБА, 2017. – Вип. №68. – С.31-38.

#### Рецензенти:

**Шваб'юк Василь Іванович**, професор кафедри технічної механіки Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, професор.

**Костенко Олена Михайлівна**, професор кафедри «Технології та обладнання переробних і харчових виробництв» Полтавської державної аграрної академії, доктор технічних наук, професор.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2018

УДК 624.047

**О.О. Ларін<sup>1</sup>, О.І. Трубаєв<sup>1</sup>, В.В. Юдаєв<sup>2</sup>**  
НТУ «Харківський політехнічний інститут»<sup>1</sup>  
ООО «АРТІЛЬ ПРОМАЛЬП АГРО»<sup>2</sup>

### **КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КОЛОН ЕЛЕВАТОРА ПРИ РІЗНИХ ВАРІАНТАХ НАВАНТАЖЕННЯ (частина №1)**

*На основі методу скінченних елементів в тривимірній постановці проведено аналіз міцності колон силосів. Розрахунки показали, що колона спроектована як перевантажена в області капітели і працює на межі кубикової міцності бетону, хоча за вимогами нормативних документів, які використовувалися при її проектуванні, вона повинна працювати в межах призмочної міцності бетону.*

*Ключові слова:* силоси, колона, напружено-деформований стан, міцність бетону

**А.А. Ларин, А.И. Трубаев, В.В. Юдаев**  
**КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОЛОНН ЭЛЕВАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ НАГРУЖЕНИЯ (часть №1)**

*На основе метода конечных элементов в трехмерной постановке проведен анализ прочности колонн силосов. Расчеты показали, что колонна спроектирована как перегруженная в области капители и работает на пределе кубиковой прочности бетона, хотя по требованиям нормативных документов, которые использовались при ее проектировании, она должна работать в пределах призмочной прочности бетона.*

*Ключевые слова:* силосы, колонна, напряженно-деформированное состояние, прочность бетона

**O.O. Larin, O.I. Trubayev, V.V. Udayev**  
**COMPUTER ANALYSIS OF STRENGTH OF GRAIN ELEVATOR COLUMNS UNDER VARIOUS LOADING OPTIONS (part №1)**

*Based on the finite element method in a three-dimensional setting, the strength analysis of silo columns was carried out. Calculations showed that the column was designed as overloaded in the base and upper part and works at the limit of cubic strength of concrete, although according to the requirements of the normative documents that were used in its design, it should work within the prismatic compressive strength of concrete. In the upper part of the column, under the action of wind loads, there are significant tensile stresses and there are conditions for the occurrence of a crack. Locations of these sites coincide with the areas where cracks are found during repairs.*

*Keywords:* grain elevator, column, stress-strain state, strength of concrete

**Постановка проблеми.** В колоннах підсилосного этажа зернохранилищ с длительным сроком эксплуатации (больше 30 лет) образуются трещины в капители, которые растут со временем, достигают ширины более 3мм. Такая ситуация согласно ДБН и СНиП является аварийной для всего сооружения. Данные зернохранилища типовые, проектировались централизованно и распространены по всей территории стран СНГ. Поэтому представляет большое практическое значение решение следующих задач:

изучение причин возникновения трещин в капители колонн;

поиск конструкционных решений для прекращения дальнейшего развития трещин в капители колонн;

поиск экономически эффективных способов усиления колонн.

В данной работе в качестве первого этапа решения указанной проблемы поставлены задачи о расчете прочности и трещиностойкости колонн типа К-1.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Предварительное изучение материалов проектирования колонн К-1 [1-8] показало, что расчет колонн проводился на основе стержневой модели и капитель не учитывалась. Данные варианты создают ситуацию большого эксцентриситета сжимающей нагрузки. Практика эксплуатации зернохранилищ показала, что именно в тех зернохранилищах, где регулярно имеет место использование силосов с высоким уровнем неравномерности загрузки силосов зерном и возникают трещины в колоннах типа К-1.

**Постановка задачи.** В работе поставлена цель – на основе конечно-элементного моделирования как объемного тела (далее 3D-моделирования) оценить напряженно-деформированное состояние колонны, при условии полной загрузки всех силосов.

**Общий вид колонны К-1.** На основании изучения типовой документации на конструкции силосных сооружений предприятий по хранению и переработке зерна [1,2] и материалов обследования поврежденных колонн в подсилосном этаже [3] разработана расчетная схема

срединной колонны типа К-1, которая приведена на рис.1. Все размеры на рисунке даны в миллиметрах.

Срединная колонна К-1 конструктивно состоит из 3-х частей:

- основной части - призмы с квадратом в основании, размер которого показан на рис.1.1,а;
- нижней части капители – усеченной пирамиды с квадратом в основании и с восьмигранником в верхнем сечении, размеры которой показаны на рис.1 а,б;
- верхней части капители – призмы с восьмигранником в основании.

Все размеры взяты из чертежей конструкции [1] и даны в миллиметрах.

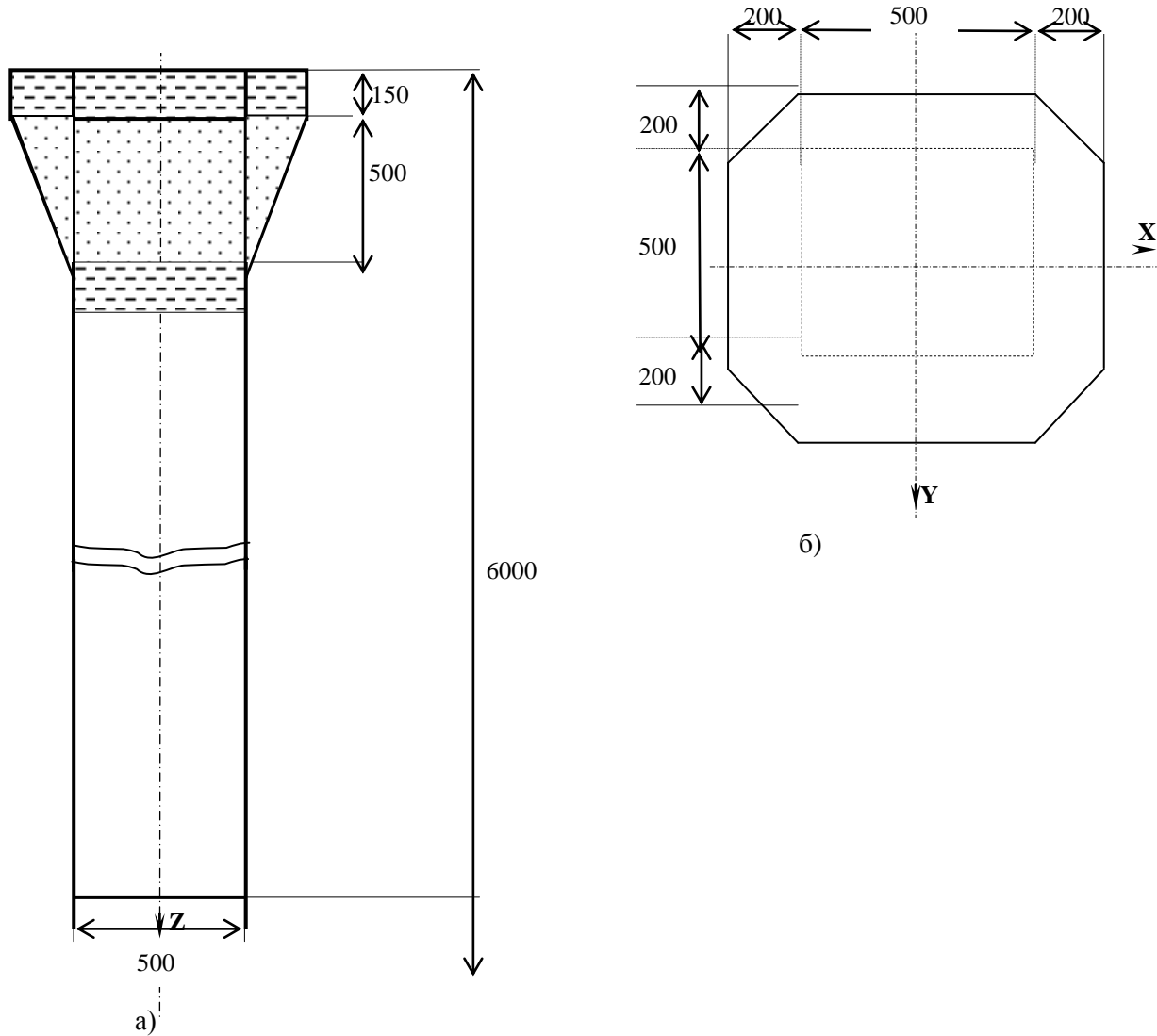


Рис. 1. Расчетная схема колонны К-1 (а - вид сбоку; б - вид сверху)

**Характеристики материала колонны К-1.** Колонна К-1 сделана из заводского железобетона подвергнутого тепловой обработке. Марка бетона согласно [1] – М300, марка арматуры – А-III. Физико-механические характеристики бетона и арматуры взяты согласно СНиП II-21-75 [3], действующих на момент изготовления колонны, и приведены в табл.1.

Общий вес колонны с заглубленной в фундамент частью – 4500кг; вес арматуры - 185,8кг. В результате в железобетоне находится 4,13% арматурной стали А-III.

При расчете предполагается определить железобетон как изотропный композиционный материал и определить его материальные характеристики согласно правилам смеси на основе данных табл.1.

Физико-механические характеристики бетона и арматуры колонны К-1

Название, обозначение, размерность	Бетон М300	Арматура А-III
Модуль упругости, $E$ , кгс/см <sup>2</sup>	260 103	2000 103
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0,2	0,3
Модуль сдвига, $G$ , кгс/см <sup>2</sup>	104 103	770 103
Нормативное предельное сопротивление сжатию бетона (призменное), $R_{пр}$ , кгс/см <sup>2</sup>	135	
Нормативное предельное сопротивление растяжению бетона, $R_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	10	
Нормативное предельное сопротивление арматуры, $R_a$ , кгс/см <sup>2</sup>		3400

**Проектные нагрузки на колонну К-1 по схеме стоек.** Согласно требованиям ДБН В.2.2-8-98 [4, пп.5.32] колонны подсилового этажа необходимо рассчитывать по схеме стоек. Поэтому при проектном расчете определяются максимальные продольные силы и моменты, действующие на стержень, которым моделировалась колонна.

Максимальные нагрузки, действующие на колонну К-1 сверху следующие:

- от веса надсиловой галереи –  $F_{нг} = 3,8т$ ;
- от веса стен силосов –  $F_{сс} = 51,0т$ ;
- от веса воронок –  $F_v = 4,4т$ ;
- от веса швов –  $F_{ш} = 1,9т$ ;
- от веса колонны –  $F_k = 5,0т$ ;
- от веса снега –  $F_{сн} = 1,9т$ ;
- полезная на надсиловый этаж –  $F_{нсп} = 2,5т$ ;
- от зерна –  $F_z = 232,0т$ .

Итого максимальная нагрузка сверху –  $F_{max} = 302,5т$ .

Реакция снизу от фундаментной плиты –  $N_{фп} = 298,0т$ .

При расчете прочности сборных железобетонных колонн подсилового этажа случайный эксцентриситет, учитываемый согласно требованиям [5]  $l_m = 0,025$  м. Момент от неточности монтажа:

$M_{доп} = l_m \cdot F_{max} = 0,025м \cdot 302,5т = 7,55т \cdot м$ . Максимальный момент от ветра  $M_v = 7,05т \cdot м$ .

Суммарный максимальный момент  $M_{max} = M_{доп} + M_v = 14,6т \cdot м$ .

**Схема приложения нагрузки на колонну К-1 при объемном моделировании.** В колоннах К-1 часто возникают трещины в капители, которые при расчете по схеме стоек (стержневая модель) не могут быть учтены.

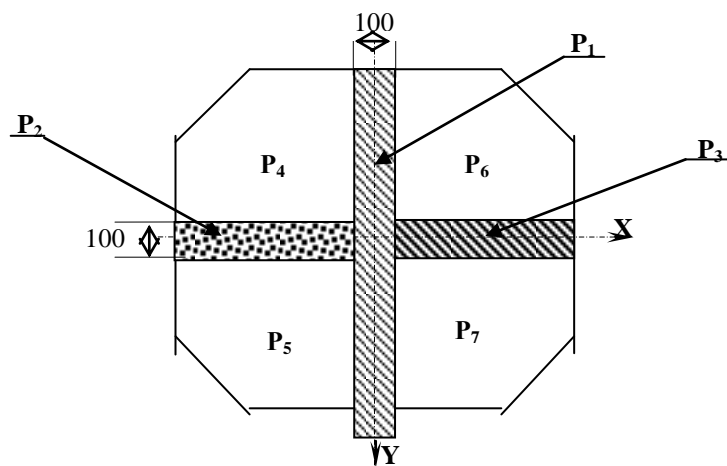


Рис. 2 Схема приложения нагрузки на капитель колонны К-1

Поэтому разработанная расчетная схема предполагает моделирование колонны К-1 с капителью как объемного тела, чтобы в дальнейших исследованиях учесть наличие трещин. Это требует пересчета сосредоточенных сил и моментов в давление, распределенное по верхней поверхности капители. Согласно монтажной схеме капители колонны [5] разработана схема

приложения нагрузки на капитель (рис. 2). На схеме верхняя поверхность капители разбита на 7 участков, соответствующих нагрузкам от стен силосов и 4-х воронок. На все участки возможно приложение разного давления для обеспечения реализации суммарного максимального момента от ветра и монтажного эксцентриситета.

**Значения давлений, действующих на колонну К-1.** Распределение давлений приведено в табл. 2.

1-й вариант - полная загрузка всех силосов:

случай 1а – идеальная равномерная;

случай 1б – с учетом максимального монтажного эксцентриситета;

случай 1в – максимальная кратковременная при учете добавочного момента от ветра.

Таблица 2

№	Варианты схем нагружения						
	Величина давления, кгс/см <sup>2</sup>						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
1а	36,63	36,63	36,63	42,9	42,9	42,9	42,9
1б	36,63	44,29	28,99	47,39	47,39	38,42	38,42
1в	36,63	114,79	28,99	47,39	47,39	38,42	38,42

#### Граничные условия для расчетной модели колонны К-1:

– нижнее сечение колонны жестко закреплено;

– верхнее сечение капители ограничено по горизонтальным перемещениям.

#### Критерии оценки прочности усиления колонны К-1 подсилосного этажа

**Оценка прочности железобетона колонны К-1.** Согласно [3, п.3.1], расчет прочности железобетона проводится по деформационной теории композитов отдельно для бетона и стальной арматуры. В результате расчета должны быть определены максимальные главные деформации на сжатие  $\varepsilon_c$  и растяжение  $\varepsilon_p$  железобетонной колонны. После этого должна быть проведена проверка по следующим формулам:

$$|\varepsilon_c| \leq \frac{R_{np}}{E_b}; \quad |\varepsilon_c| \leq \frac{R_a}{E_a}; \quad |\varepsilon_p| \leq \frac{R_p}{E_b}, \quad (1)$$

где  $E_b$  - модуль упругости бетона (см. табл.1.1),  $E_a$  - модуль упругости арматуры (см. табл.1.1), остальные компоненты должны быть взяты согласно табл.1.

Либо, учитывая, следующие соотношения:

$$|\varepsilon_c| E_b = |\sigma_{Г.С.}| \quad \text{и} \quad |\varepsilon_p| E_b = |\sigma_{Г.Р.}|,$$

должна быть проведена проверка по величинам главных сжимающих  $|\sigma_{Г.С.}|$  и растягивающих напряжений  $|\sigma_{Г.Р.}|$  в бетоне:

$$|\sigma_{Г.С.}| \leq R_{np}; \quad |\sigma_{Г.Р.}| \leq R_p. \quad (2)$$

Для арматуры, можно оценивать прочность на основе критерия фон Мизеса:

$$\sigma_i \leq R_a, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  - эквивалентные напряжения по Мизесу.

**Оценка трещиностойкости железобетона колонны К-1.** Трещины в бетоне могут образоваться не только, когда нарушены условия (2), но и когда в бетоне во взаимно перпендикулярных направлениях возникают одновременно растягивающие и сжимающие напряжения, удовлетворяющие условию (2), но имеющие определенное соотношение между собой.

Согласно [3, п.4.11], расчет на возможность образования трещин проводится по следующим условиям:

$$\begin{cases} \text{если } |\sigma_{Г.С.}| \leq 0,5R_{np}^{\prime\prime}, \text{ то } |\sigma_{Г.Р.}| \leq R_p^{\prime\prime} \\ \text{если } |\sigma_{Г.С.}| > 0,5R_{np}^{\prime\prime}, \text{ то } |\sigma_{Г.Р.}| \leq 2R_p^{\prime\prime} \left(1 - \frac{|\sigma_{Г.С.}|}{R_{np}^{\prime\prime}}\right), \end{cases} \quad (4)$$

где  $|\sigma_{Г.С.}|$  - модуль главного сжимающего напряжения в бетоне,  $|\sigma_{Г.Р.}|$  - модуль главного растягивающего напряжения в бетоне, остальные компоненты должны быть взяты из табл. 3.

Таблица 3

Предельные сопротивления бетона для анализа трещиностойкости	
Название, обозначение, размерность	Бетон М300
Нормативное предельное сопротивление сжатию бетона II группы (призменное), $R_{np}^{\prime\prime}$ , кгс/см <sup>2</sup>	170
Нормативное предельное сопротивление растяжению бетона II группы, $R_p^{\prime\prime}$ , кгс/см <sup>2</sup>	15

На основе условий (4) можно получить коэффициент трещиностойкости:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{|\sigma_{Г.Р.}|}{R_p^{\prime\prime}} & \text{если } |\sigma_{Г.С.}| \leq 0,5R_{np}^{\prime\prime} \\ \frac{|\sigma_{Г.Р.}|}{2R_p^{\prime\prime} \left(1 - \frac{|\sigma_{Г.С.}|}{R_{np}^{\prime\prime}}\right)} & \text{если } |\sigma_{Г.С.}| > 0,5R_{np}^{\prime\prime}, \end{cases} \quad (5)$$

и тогда условие трещиностойкости имеет следующий вид:

$$\gamma \leq 1. \quad (6)$$

Согласно [3, п.4.21], трещина считается надежно закрытой, если оба главных напряжения являются сжимающими и удовлетворяют условию:

$$\min(|\sigma_1|, |\sigma_3|) \geq 10 \text{ кгс/см}^2 \quad (7)$$

**Расчет физико-механических характеристик железобетона.** Объем бетона М-300 в колонне К-1 [1]  $V_6 = 1,8 \text{ м}^3$ , масса арматуры -  $m_a = 185,8 \text{ кг}$ . Тогда объем арматуры, с учетом величины плотности арматуры согласно табл. 4:

$$V_a = m_a / \rho_a = 185,8 / 7850 = 0,024 \text{ м}^3.$$

Определим объемную долю арматуры в колонне К-1:

$$\mu_c = V_a / (V_a + V_6) = 0,024 \text{ м}^3 / 1,824 \text{ м}^3 = 0,0132.$$

Для определения усредненных параметров железобетона предлагается воспользоваться правилом смеси Halpin-Tsai [9], согласно которому модуль упругости и коэффициент Пуассона определяются следующими выражениями:

$$E_{жсб} = E_a \mu_c + E_6 (1 - \mu_c), \quad (8)$$

$$\nu_{жсб} = \nu_a \mu_c + \nu_6 (1 - \mu_c), \quad (9)$$

$$E_{жсб} = 2,85 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2, \nu_{жсб} = 0,2.$$

Таблица 4

#### Физико-механические характеристики бетона и арматуры колонны К-1

Название, обозначение, размерность	Бетон М300	Арматура А-III
Модуль упругости, $E$ , кгс/см <sup>2</sup>	$260 \cdot 10^3$	$2000 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона, $\nu$	0,2	0,3
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	-	7850

**Построение расчетной компьютерной 3D – модели.** Основная часть колонны разбивалась высокоточными конечными элементами типа параллелепипед, а капитель – конечными элементами типа пирамида. Были заданы следующие граничные условия:

- в верхней плоскости капители – перемещения в плоскости ее равны нулю;
- в плоскости основания колонны – перемещения перпендикулярные плоскости равны нулю.

В модели предусмотрена возможность освобождения от граничных условий тех участков в верхней плоскости капители, на которых не приложена нагрузка от веса зерна. Это необходимо для реализации соответствующих вариантов нагружения.

**Результаты расчета для 1-го варианта нагружения - полная загрузка зерном всех силосов.** При 1-ом варианте нагружения было рассмотрено два случая, нагрузки для которых приведены в табл. 2 :

- *случай 1а* – только равномерное нагружение (нет монтажного эксцентриситета и ветровой нагрузки);
- *случай 1в* – есть максимальные добавочные моменты от монтажного эксцентриситета и ветровой нагрузки на зернохранилище, и при этом направления их действия совпадают.

Рассмотрение данных двух случаев вызвано следующими причинами:

- 1) Случай 1а – идеализированное нагружение колонны при полной загрузке силосов (чистое сжатие).
- 2) Случай 1в, наихудший вариант нагружения, который необходимо рассматривать согласно [4].

На рис. 3 приведены суммарные перемещения (единица измерения – м) в колонне К-1 для двух случаев 1-го варианта нагружения. Сравнивая их, видно, что с увеличением добавочного момента общая величина перемещений увеличивается, и они становятся неравномерными по высоте колонны. Максимум наблюдается на капители в той ее части, где и приложен момент от монтажного эксцентриситета и ветра. На этой же части капители и колонны, как будет показано ниже, наблюдаются и максимальные напряжения. В дальнейшем эту часть колонны и капители будем называть левой, так как именно слева от плоскости симметрии колонны **XOZ** было выбрано место расположения монтажного эксцентриситета и момента от ветровой нагрузки.

**Рассмотрим напряжения в колонне при случае 1а.** На рис. 4 приведено распределение главных сжимающих напряжений (единица измерения – Па) в бетоне при шкале с максимумом по призмическому пределу прочности. Серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призмический предел прочности. Минимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для случая 1а наблюдаются на месте стыка капители и ребра колонны и превышают призмический предел прочности (2):

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 248,7 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре удовлетворяет критерию прочности (3):

$$\sigma_{i.}^a = 2147 \text{ кгс/см}^2 < R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

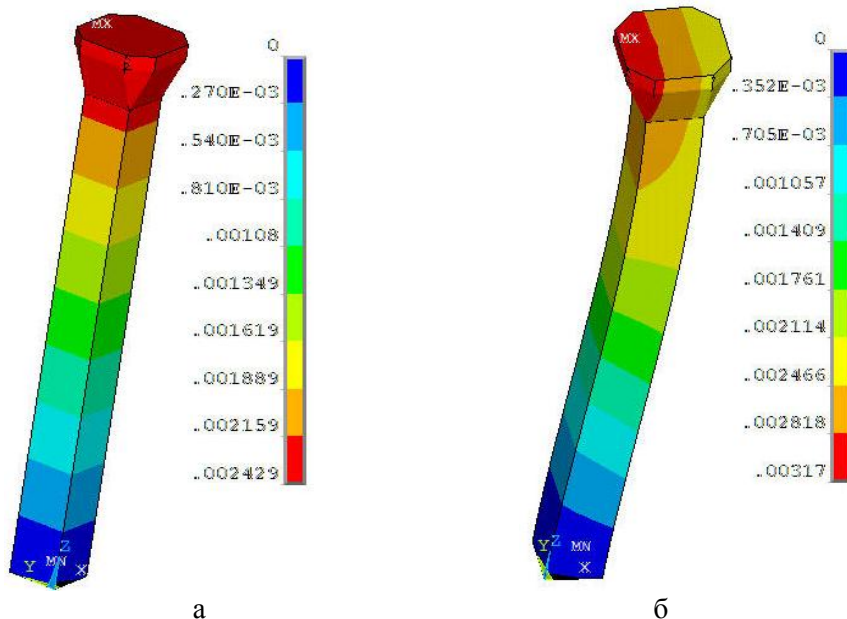


Рис. 3. Перемещения в колонне при 1-ом варианте нагружения (а – случай нагружения 1а; б –случай 1в )



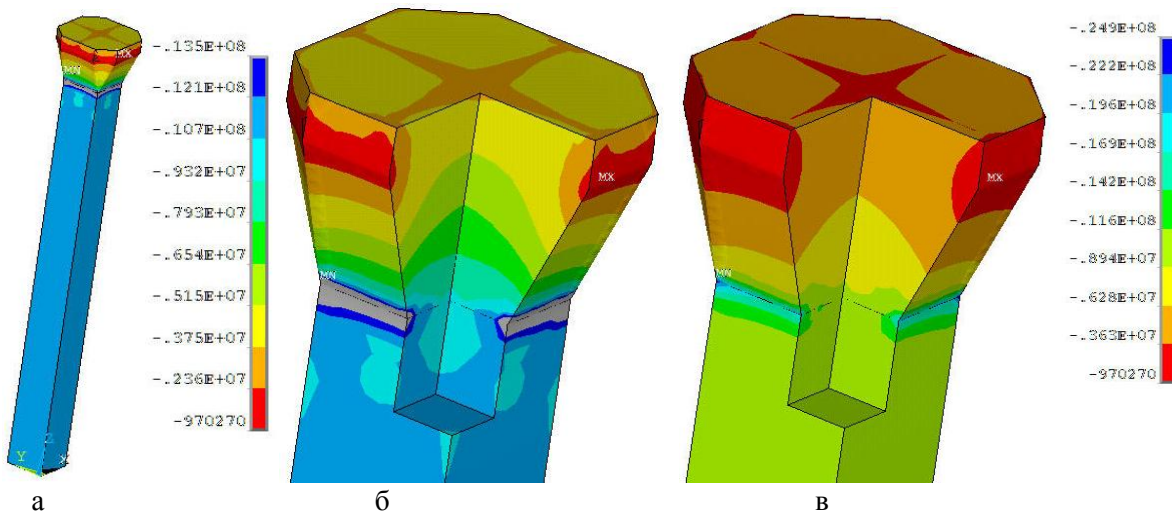


Рис. 4. Главные сжимающие напряжения в бетоне при случае 1а  
(а – вид на колонну; б – вид на капитель; в – вид на капитель с выводом максимального значения)

Надо отметить, что значения максимальных напряжений завышены, т.к. они наблюдаются в точках на ребре (где угол  $90^\circ$ , что при 3-D моделировании дает искаженный результат). В этом случае для оценки реальных напряжений необходимо взять значения в некоторой окрестности ребра. Как видно из рис. 4б зона напряжений превосходящих призмный предел прочности бетона распространяется на весь стык капители и колонны, и при этом значения напряжений в этой зоне тоже превышают призмный предел прочности:

$$\sigma_{Г.С.}^{\sigma} = 160 \div 190 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

но значительно меньше кубикового предела прочности бетона на сжатие –  $300 \text{ кгс/см}^2$ . В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и колонны возможно лишь растрескивание бетона, т.к. запас по прочности для арматуры остается значительным.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для случая 1а показано на рис. 5, причем серым цветом показана зона сжимающих напряжений. Как видно их максимальное значение еще удовлетворяет критерию прочности (2):

$$\sigma_{Г.Р.}^{\sigma} = 9,25 \text{ кгс/см}^2 < R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

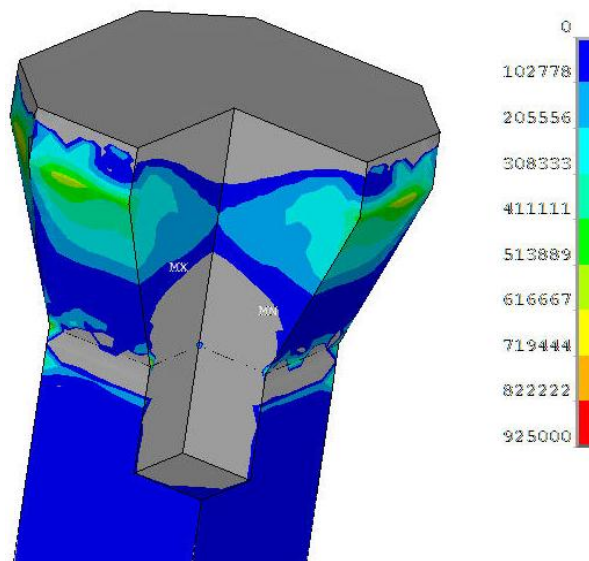


Рис. 5. Главные растягивающие напряжения при случае 1а

Из рис. 4 видно, что концентрация главных сжимающих напряжений наблюдается в районе стыка верхней и нижней части капители и несколько смещена относительно плоскости симметрии колонны. Это соответствует месту возникновения трещин в капители. Т.к. в этой же части капители действуют и главные сжимающие напряжения в другом направлении (см. рис. 4в), то была проведена проверка трещиностойкости. Результаты показали, что условие (6) выполняется:  $\gamma = 0,36 < 1$ .

**Рассмотрим напряжения в колонне при случае 1в.** Так как картина распределения напряжений подобна той, которая рассмотрена в случае 1а, то дальнейший анализ будет проведен без графической иллюстрации. Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для случая 1в наблюдаются на месте стыка капители и ребер на левой части колонны, по величине превосходят как призмный предел прочности (2)

$$\sigma_{г.с.}^{\delta} = 371 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2,$$

так и кубиковый предел прочности бетона –  $300 \text{ кгс/см}^2$ . При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре велико, но удовлетворяет критерию прочности (3):

$$\sigma_i^a = 3202 \text{ кгс/см}^2 < R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2$$

Зона напряжений превышающих призмный предел прочности для случая 1в наблюдается на левой части колонны, на месте стыка капители и плоскости призмной части колонны. При этом эта зона захватывает половину боковой поверхности колонны около капители (слева) и проникает на глубину более  $\frac{1}{4}$  ширины основной части колонны. Кроме этого, у основания на боковой поверхности колонны с противоположной стороны, тоже возникла большая зона напряжений превышающих призмный предел прочности.

Как и в случае 1а, максимальные значения напряжений наблюдаются в точках на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в зоне превышения призмного предела прочности. Значения напряжений в этой зоне тоже значительно превышают призмный предел прочности и близки к кубиковому пределу прочности бетона:

$$\sigma_{г.с.}^{\delta} = 240 \div 290 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и колонны в случае 1в возможно значительное разрушение бетона, хотя запас по прочности для арматуры есть.

Максимальная величина главных растягивающих напряжений в бетоне более, чем в два раза больше предела прочности на растяжение и нарушает критерий прочности (2):

$$\sigma_{г.р.}^{\delta} = 25,8 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Однако эти значения достигаются только в одном узле на стыке капители и ребра колонны, и ими можно пренебречь. Устойчивые зоны растягивающих напряжений возникли на стыке верхней и нижней части капители. Но зона с растягивающими напряжениями, превышающими предел прочности на растяжение, возникла в левой части капители и максимальные значения главных растягивающих напряжений здесь не удовлетворяет критерию прочности на растяжение (2):

$$\sigma_{г.р.}^{\delta} = 17,9 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Т.к. в этой же части капители действуют и главные сжимающие напряжения в другом направлении, то была проведена проверка трещиностойкости. Результаты показали, что условие (6) не выполняется:  $\gamma = 1,25 > 1$  и возможно возникновение трещины на капители.

#### Выводы

- 1) В случае, когда на колонну действует ветровая нагрузка, в районе стыка с капителью и у основания колонны есть участки, где превышает призмный предел прочности.
- 2) При полной загрузке силосов в капители на месте стыка с основной частью колонны наблюдается превышение призмного предела прочности, а при варианте нагружения, когда действует ветровой момент, превышен кубиковый предел прочности бетона.
- 3) На капители при действии ветрового момента действуют значительные растягивающие напряжения и есть условия для возникновения трещины. Места расположения этих участков совпадают с зонами, где обнаруживаются трещины при проведении ремонтов.
- 4) Результаты анализа показали, что колонна при проектировании уже была перегружена в районе капители и работала на пределе кубиковой прочности бетона, хотя по

требованиям СНиП II-21-75, которые использовались при ее проектировании, она должна работать в пределах призмической прочности бетона.

5) Предел текучести по арматуре не превышен ни при одном варианте нагружения, и арматура имеет достаточный запас прочности

#### Список использованных источников

1. Типовая документация на строительные системы изделий зданий и сооружений. Серия 3.702-1/79. Унифицированные сборные железобетонные конструкции силосных сооружений предприятий по хранению и переработке зерна. Выпуск 2. Сборные железобетонные колонны. Рабочие чертежи. / Разработчик ЦНИИПРОМЗЕРНОПРОЕКТ. Утверждено постановлением Госстроя СССР от 18.03.1981г. №37. – М.- ЦИТП Госстроя СССР.- 1981.
2. Отчет 44.08С31-12 по результатам технического обследования строительных конструкций колонн подсилосного этажа силосного корпуса №6 ООО «Старобельский элеватор» / Разработчик «Луганский экспертно-технический центр ГОПРОМНАДЗОРА Украины». – Луганск. – 2012.
3. СНиП II-21-75. Бетонные и железобетонные конструкции. Введены 1.01.1977.
4. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі і споруди по зберіганню і переробці зерна. Введені 01.07.1998.
5. Указания по повышению эксплуатационной надежности элеваторных сооружений / Разработчик ЦНИИПРОМЗЕРНОПРОЕКТ. Арх № 7961/645, 1978г.
6. ДБН В.1.2-14-2009 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.
7. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення.- К., 2011.
8. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений.-М: Изд-во АСВ, 2004.-424 стр.
9. Алфутов Н.А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев и др. – М. Машиностроение, 1984г. – 264 с.

#### Рецензенты

**Гринев Владимир Борисович** - заведующий кафедрой строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, д.т.н., профессор

**Хавин Валерий Львович** - заведующий кафедрой механики сплошных сред и сопротивления материалов НТУ «Харьковский политехнический университет», к.т.н., профессор

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 624.047

**О.О. Ларін<sup>1</sup>, О.І. Трубаєв<sup>1</sup>, В.В. Юдаєв<sup>2</sup>**  
 НТУ «Харківський політехнічний інститут»<sup>1</sup>  
 ООО «АРТІЛЬ ПРОМАЛЬП АГРО»<sup>2</sup>

**КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КОЛОН ЕЛЕВАТОРА ПРИ РІЗНИХ ВАРІАНТАХ НАВАНТАЖЕННЯ (частина №2)**

*Проведено аналіз міцності колон елеватора.*

*Ключові слова:* елеватор, колона, напружено-деформований стан

**А.А. Ларин, А.И. Трубаев, В.В. Юдаев**  
**КОМПЬТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ КОЛОНН ЭЛЕВАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ НАГРУЖЕНИЯ (часть №2)**

*Проведен анализ прочности колонн элеватора.*

*Ключевые слова:* элеватор, колонна, напряженно-деформированное состояние

**O.O. Larin, O.I. Trubayev, V.V. Udayev**  
**COMPUTER ANALYSIS OF STRENGTH OF ELEVATOR COLUMNS UNDER VARIOUS LOADING OPTIONS (part №2)**

*The strength analysis of the columns of the elevator is analyzed.*

*Keywords:* elevator, column, stress-strain state

**Постановка задачі.** В роботі поставлена ціль – на основі конечно-елементного моделювання як об'ємного тіла (далі 3D-моделювання) оцінити напружено-деформоване стан колонни, при небагатриятних умовах експлуатації зернохранилища.

**Схема приложення нагрукки на колонну К-1 при об'ємном моделюванні.** Согласно действующим в настоящее время нормам при расчете прочности колонн сооружений по хранению зерна ДБН В.2.2-8-98 [4 пп. 5.3.3] колонны подсилосного этажа необходимо рассчитывать на максимальные усилия, передающиеся на них при разных схемах нагружения силосов (полная или частичная загрузка силосных корпусов). Поэтому нужно предусмотреть схемы нагружения, которые вызваны частичной загрузкой силосов зерном. Согласно монтажной схеме капители колонны [5] разработана схема приложення нагрукки на капитель (рис. 2, часть 1).

**Значения давлений, действующих на колонну К-1 при разных схемах нагружения.** Распределение давлений приведено в табл. 1.

1-й вариант - полная загрузка всех силосов (рассмотрен в части 1):

случай 1а – идеальная равномерная;

случай 1б – с учетом максимального монтажного эксцентриситета;

случай 1в – максимальная кратковременная при учете добавочного момента от ветра;

2-й вариант – случай 1б и 1 силос пустой ( над участком 7);

3-й вариант – случай 1б и 2 силоса пустые ( над участком 6 и 7);

4-й вариант – случай 1б и 3 силоса пустые ( над участком 4,6 и 7).

Таблица 1

**Варианты схем нагружения**

№	Величина давления, кгс/см <sup>2</sup>						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
2	36,63	44,29	28,99	47,39	51,86	38,42	1,47
3	36,63	44,29	28,99	51,86	51,86	1,47	1,47
4	36,63	44,29	28,99	1,47	51,86	1,47	1,47

**Граничные условия для расчетной модели колонны К-1:**

Для случаев, если некоторые силосы не загружены зерном, при учете длительного срока эксплуатации зернохранилища и наличия трещины, можно предположить, что раствор в швах

между колонной и опорными площадками воронок разрушен. Поэтому, с учетом малости давления веса воронок на колонну, граничные условия должны быть следующие:

- нижнее сечение колонны жесткозакреплено;
- верхнее сечение капители ограничено по горизонтальным перемещениям, только на участках со стеновой и зерновой нагрузкой;
- на участках верхнего сечения капители, где силосы пусты (давление равно  $1,47 \text{ кгс/см}^2$ , по табл.2) ограничений по перемещениям нет.

**Анализ результатов расчета напряжений при частичной загрузке зерном силосов.** Рассматривались 3 варианта нагружения:

- вариант 2 – один силос пустой + максимальный монтажный эксцентриситет;
- вариант 3 – два силоса пусты + максимальный монтажный эксцентриситет;
- вариант 4 – три силоса пусты + максимальный монтажный эксцентриситет.

Надо отметить, что реализацию данных вариантов не рекомендуется допускать на длительное время при эксплуатации зернохранилища. Величины давлений для всех трех случаев приведены в табл. 2 (часть 1).

На рис. 1 приведены суммарные перемещения в колонне К-1 для всех вариантов частичной загрузки силосов зерном. Сравнивая их, видно, что величина перемещений максимальна при 2-х пустых силосах с одной стороны (вариант 3), а с увеличением количества пустых силосов общая величина перемещений уменьшается. Распределение их неравномерно по высоте колонны. При увеличении неравномерности загрузки зерном максимум перемещений смещается с капители на середину колонны ближе к той ее части, где силоса загружены. Характер деформации колонны напоминает изгиб балки, что говорит о возможности возникновения на поверхности колонны растягивающих напряжений.

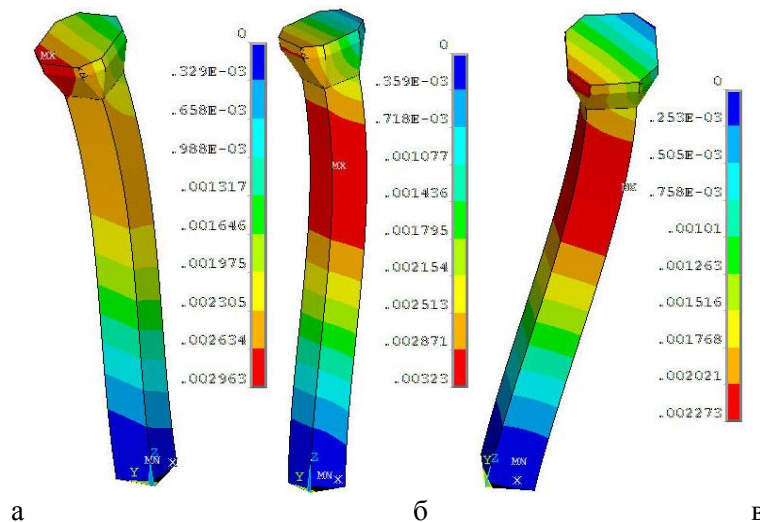


Рис. 1. Перемещения в колонне при частичной загрузке силосов зерном (а – вариант 2; б – вариант 3; в – вариант 4)

**Рассмотрим напряжения в колонне при варианте нагружения 2.** На рис. 2 а,б приведено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне при шкале с максимумом по призмическому пределу прочности, при этом серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призмический предел прочности. Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 2 наблюдаются на месте стыка капители и ребра колонны на левом ребре противоположном пустому силосу (рис.2в), и по величине нарушают не только критерий прочности (2, часть 1):

$$\sigma_{Г.С.}^b = 424 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2,$$

но и превышают кубиковый предел прочности бетона на сжатие –  $300 \text{ кгс/см}^2$ . При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре тоже превышает критерий прочности (3, часть 1):

$$\sigma_i^a = 3658 \text{ кгс/см}^2 > R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

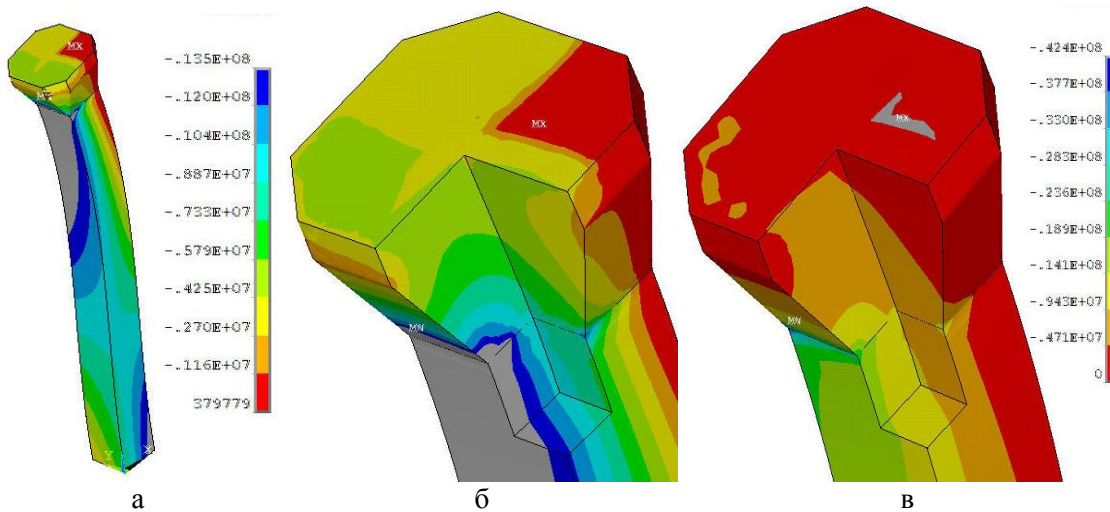


Рис. 2. Главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 2 (а – вид на колонну; б – вид на капитель; в – вид на капитель с максимальным значением)

Зона напряжений превышающих призмный предел прочности для варианта 2 (рис.2а,б) наблюдается на левой части колонны вдоль ребра противоположного пустому силосу, а также на месте стыка капители и этого ребра колонны. При этом эта зона захватывают значительную часть поверхности колонны около ребра и проникает в глубину стыка ребра и капители. Также, как и при случае 1в, есть зона напряжений превышающих призмный предел прочности и у основания колонны, на противоположном ребре. Как и при варианте 1, максимальные значения напряжений наблюдаются в точке на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в некоторой окрестности, в зоне превышения призмного предела прочности. Из рисунка 2в видно, что значения напряжений в этой зоне тоже значительно превышают призмный и кубиковый пределы прочности бетона:

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 290 \div 330 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2.$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и ребра колонны при одном пустом силосе возможно разрушение и образование трещины в бетоне; арматура находится на пределе своей прочности.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для варианта 2 показано на рис.3 (серым цветом - зона сжимающих напряжений). Как видно их максимальная величина превосходит предел прочности на растяжение и нарушает критерий прочности :

$$\sigma_{Г.Р.}^{\delta} = 17 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Зона максимальных напряжений значительна, находится на верхней поверхности капители, вдоль границы стенового блока и опорной площадки свободной от зерна воронки. Надо отметить, что в этой зоне растягивающими являются все главные напряжения (см. рис 2в, серая зона). Это показывает, что в случае отсутствия зерна в одном силосе, есть реальная возможность возникновения трещины на капители сверху, смещенной относительно плоскости симметрии колоны на 50-150мм.



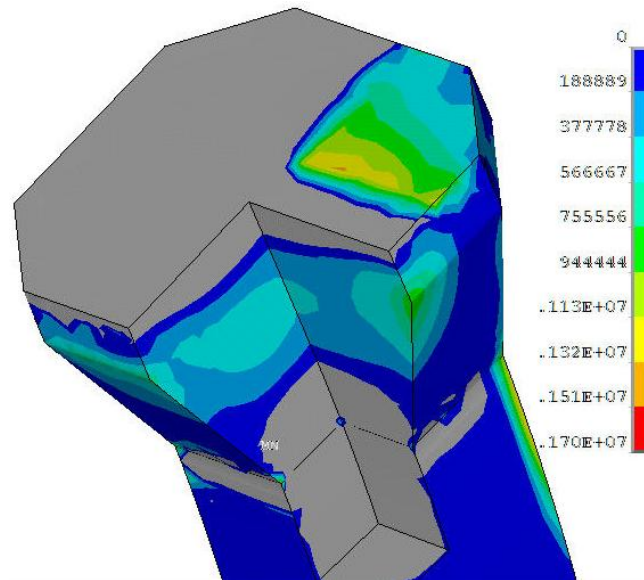


Рис. 3. Главные растягивающие напряжения для варианта нагружения 2

*Рассмотрим напряжения в колонне при варианте нагружения 3.* На рис. 4а,б приведено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне при шкале с максимумом по призмочному пределу прочности, при этом серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призмочный предел прочности.

Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 3 наблюдаются на месте стыка капители и ребер колонны на левой стороне противоположной 2-м пустым силосам (рис.4). Величина их превышает как призмочный предел прочности :

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 410 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2,$$

так и кубический предел прочности бетона на сжатие –  $300 \text{ кгс/см}^2$ . При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре высокое, но не превышает предел текучести:

$$\sigma_i^a = 3000 \text{ кгс/см}^2 < R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

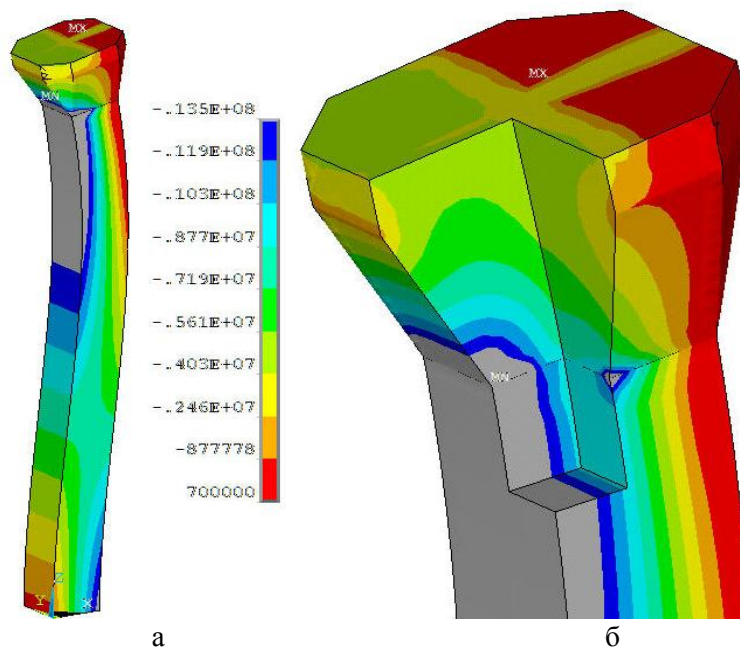
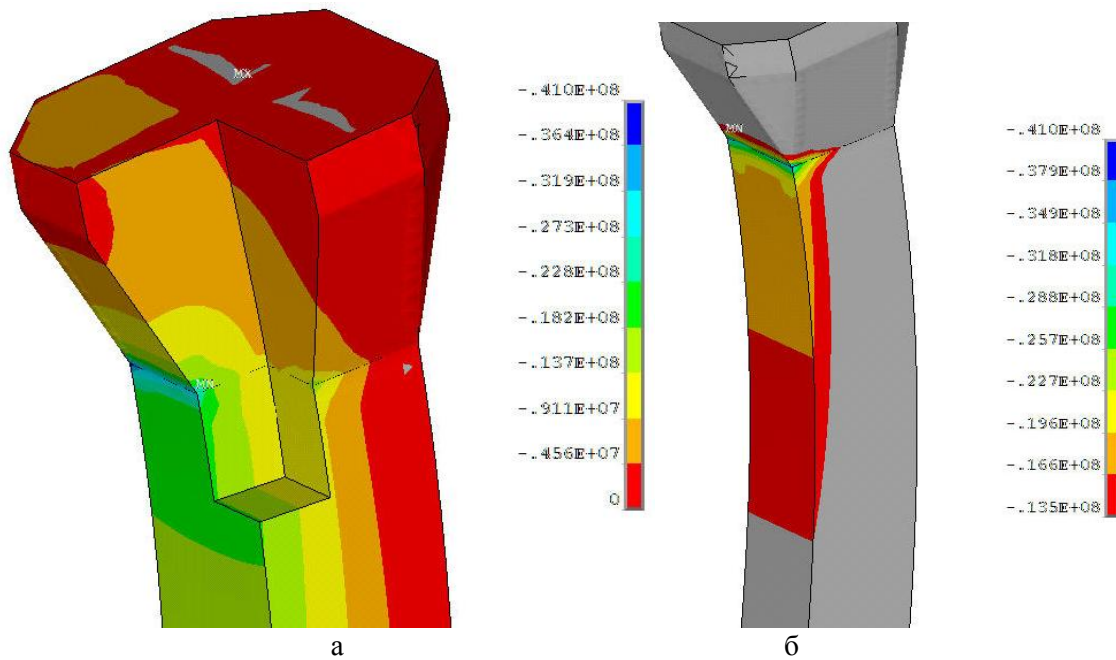


Рис. 4. Главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 3 (а – вид на колонну; б – вид на капитель; в – вид на капитель)



**Рис. 5. Распределение главных сжимающих напряжений в бетоне для варианта 3, полученное с разной шкалой (а – от максимальных сжимающих напряжений до 0; б – от максимальных сжимающих напряжений до призмического предела прочности)**

Зона сжимающих напряжений, превышающих призмический предел прочности для варианта 3 (рис. 5б) наблюдается на левой части колонны около поверхности капители противоположной пустым силосам и на месте стыка капители и этой части колонны. При этом эта зона проникает в глубину стыка колонны и капители, слева. Также есть зона напряжений превышающих призмический предел прочности у основания колонны (рис. 4а). Как и при варианте 2, максимальные значения напряжений наблюдаются в точке на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в зоне превышения призмического предела прочности. Из рис.5б видно, что значения напряжений в этой зоне тоже значительно превышают призмический и кубиковый пределы прочности бетона:

$$\sigma_{Г.С.}^{\sigma} = 290 \div 320 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и колонны (противоположном пустым силосам) возможно разрушение бетона, хотя запас по прочности у арматуры есть.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для варианта 3 показано на рис.6а (серым цветом показана зона сжимающих напряжений). Как видно их максимальная величина значительно превосходит предел прочности на растяжение :

$$\sigma_{Г.Р.}^{\sigma} = 63,5 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2 .$$

Зона напряжений превышающих предел прочности на растяжение очень велика (рис. 6б), расположена на боковой поверхности капители и колонны под пустыми силосами, а также вдоль границы стенового блока и опорных площадок свободных от зерна воронок. Надо отметить, что в этой зоне растягивающими являются все главные напряжения (см. рис 5а, серая зона), либо главные сжимающие напряжения близки к нулю. Фактически в колонне при двух пустых силосах наблюдается изгиб. Это говорит о возможности возникновения трещины, как на наклонной поверхности, так и на верхней поверхности капители. Данный вариант нагружения крайне опасен.



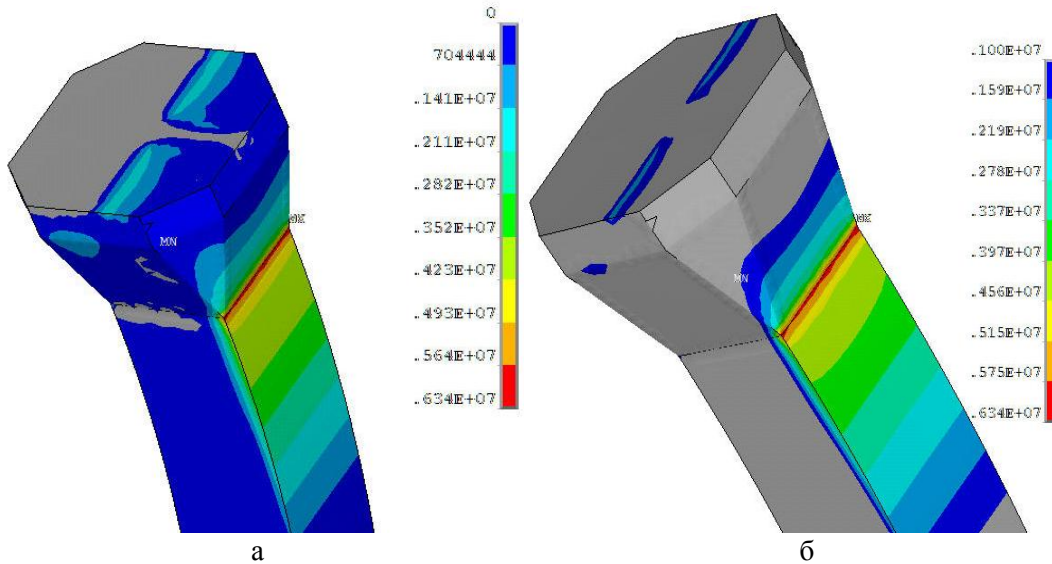


Рис. 6. Главные растягивающие напряжения для варианта нагружения 3 (а – весь диапазон; б – в диапазоне, превышающем предел прочности)

Рассмотрим напряжения в колонне при варианте нагружения 4. На рис. 7а приведено распределение главных сжимающих напряжений в бетоне при шкале с максимумом по призменному пределу прочности, при этом серым цветом показаны зоны, где главные напряжения превышают призменный предел прочности.

Максимальные главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта 4 наблюдаются на месте стыка капители и ребра колонны на левой стороне под полным силосом (рис.2.16б). Величина их такова, что превышены призменный и кубиковый пределы прочности (1.3):

$$\sigma_{г.с.}^{\beta} = 339 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2.$$

При этом максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу в арматуре удовлетворяет критерию прочности (1.4):

$$\sigma_i^{\alpha} = 2715 \text{ кгс/см}^2 < R_a = 3400 \text{ кгс/см}^2.$$

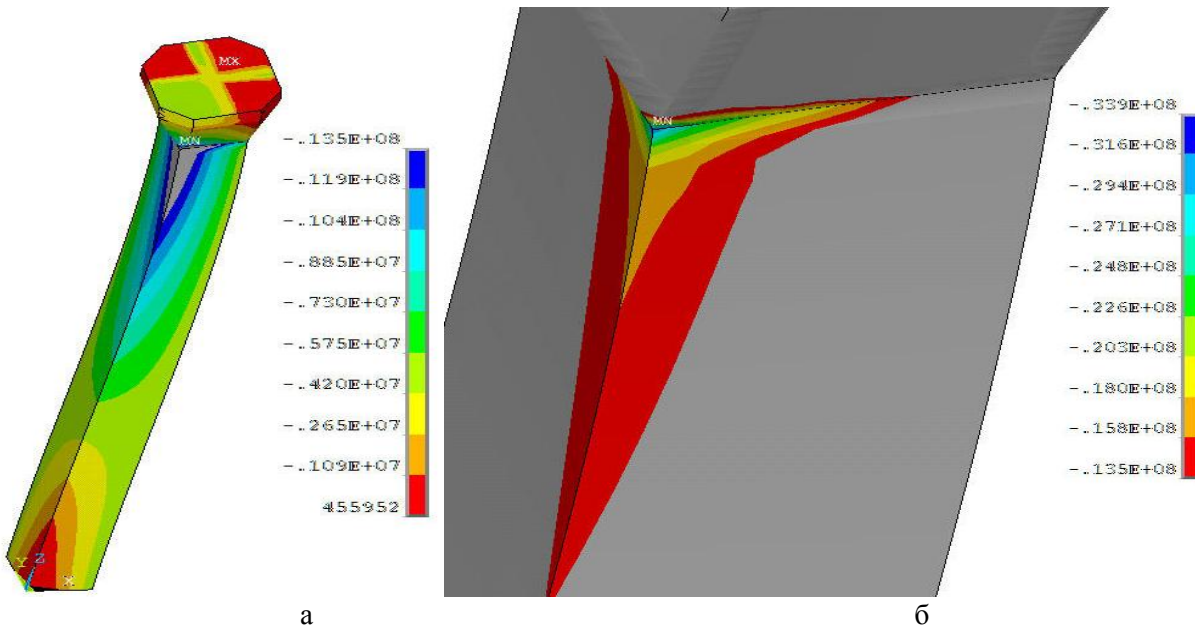


Рис.7 Главные сжимающие напряжения в бетоне для варианта нагружения 4 (а – вид на колонну; б – зона максимальных напряжений)

Зона сжимающих напряжений превышающих призменный предел прочности для варианта 4 (рис. 7б) наблюдается в узкой области стыка одного ребра колонны и капители, под полным

силосом слева. Максимальные значения напряжений наблюдаются в точке на ребре, поэтому для оценки реальных напряжений были взяты максимальные значения в зоне превышения призматического предела прочности. Из рисунка 7б видно, что значения напряжений в этой зоне превышают призматический предел прочности, но меньше кубикового предела прочности бетона на сжатие:

$$\sigma_{Г.С.}^{\delta} = 270 \div 290 \text{ кгс/см}^2 > R_{np} = 135 \text{ кгс/см}^2;$$

В результате можно сделать вывод, что на стыке капители и ребра колонны (под полным силосом) возможно разрушение бетона, при этом запас по прочности арматуры значительный.

Распределение главных растягивающих напряжений в бетоне для варианта 4 показано на рис. 8а (серым цветом показана зона сжимающих напряжений). Как видно их максимальная величина значительно превосходит предел прочности на растяжение и нарушает критерий прочности:

$$\sigma_{Г.Р.}^{\delta} = 97,9 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Зона напряжений превышающих предел прочности на растяжение велика (рис. 8б), расположена вдоль ребра колонны на правой части, противоположной полному силосу. Учитывая, что в таком месте значения напряжений искажены, возьмем их максимальные значения в некоторой окрестности от стыка ребра и капители:

$$\sigma_{Г.Р.}^{\delta} = 60 \text{ кгс/см}^2 > R_p = 10 \text{ кгс/см}^2.$$

Как видно превышение предела прочности очень существенно (в 6 раз). Фактически в колонне при трех пустых силосах есть возможность возникновения трещины вдоль ребра колонны около капители.

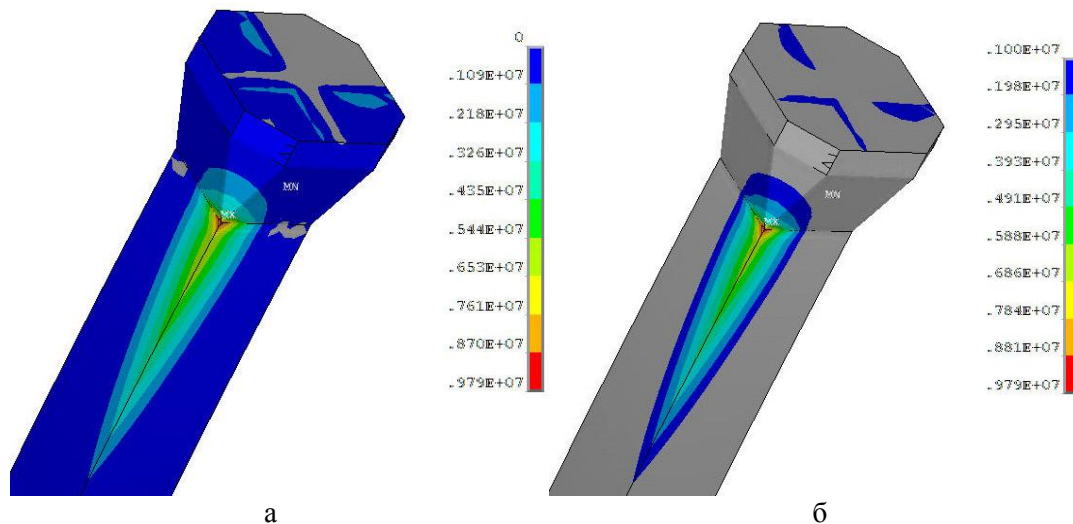


Рис. 8. Главные растягивающие напряжения для варианта нагружения 4 (а – весь диапазон; б – в диапазоне, превышающем предел прочности)

#### Выводы

- 1) В случаях, когда силоса частично загружены зерном, в районе стыка колонны с капителью и у основания колонны есть участки, где превышает призматический предел прочности.
- 2) При всех вариантах загрузки силосов в месте стыка капители с основной частью колонны наблюдается превышение призматического предела прочности, а при вариантах нагружения, когда пустыми являются 1 или 2 силоса, превышен кубиковый предел прочности бетона.
- 3) На капители при частичной загрузке силосов действуют значительные растягивающие напряжения и есть условия для возникновения трещины. Места расположения этих участков совпадают с зонами, где обнаруживаются трещины при проведении ремонтов

#### Рецензенты

**Гринев Владимир Борисович** -заведующий кафедрой строительной механики Харьковского национального университета строительства и архитектуры, д.т.н., профессор

**Хавин Валерий Львович** -заведующий кафедрой механики сплошных сред сопротивления материалов НТУ «Харьковский политехнический университет», к.т.н., профессор

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 667.64:678.026

**О.В. Лещенко***Херсонська державна морська академія***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРНО-АКТИВНОЇ ДОБАВКИ НА ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ**

*Методом ІЧ-спектрального аналізу досліджено наявність активних груп в структурі наповнювача. Проведено дослідження впливу вмісту дисперсних часток стеарату кальцію на адгезійні, фізико-механічні і теплофізичні властивості композитних матеріалів. Вміст добавки змінювали у межах  $q = 10...50$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Введення стеарату кальцію у епоксидний зв'язувач за оптимального вмісту дозволяє підвищити адгезійну міцність у 1,8 рази, фізико-механічні властивості у 1,6 рази, теплофізичні властивості у 3,2 рази. Результати фізико-механічних властивостей підтверджено оптичною мікроскопією. Показано, що при введенні структурно-активної добавки за вмісту  $q = 10...20$  мас.ч. формуються впорядкована структура без наявних включень, що дає можливість стверджувати про максимальний ступінь зшивання композитних матеріалів. Досліджено поведінку розроблених матеріалів в діапазоні температур  $\Delta T = 303...473$  К. Встановлено абсолютні значення термічного коефіцієнта лінійного розширення матеріалів, які можливо використовувати у різних температурних діапазонах.*

*Ключові слова:* дисперсний наповнювач, ІЧ-спектральний аналіз, адгезія, фізико-механічні властивості, теплофізичні властивості, структура зламу, оптична мікроскопія

**А.В. Лещенко***Херсонская государственная морская академия***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНО-АКТИВНОЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ**

*Методом ИК-спектрального анализа исследовано наличие активных групп в структуре наполнителя. Проведено исследование влияния содержания дисперсных частиц стеарата кальция на адгезионные, физико-механические и теплофизические свойства композитных материалов. Содержание добавки меняли в пределах  $q = 10...50$  масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20 и 10 масс.ч. отвердителя ПЭПА. Введение стеарата кальция в эпоксидное связующее при оптимальном содержания позволяет повысить адгезионную прочность в 1,8 раза, физико-механические свойства в 1,6 раза, теплофизические свойства в 3,2 раза. Результаты физико-механических свойств подтверждено оптической микроскопией. Показано, что при введении структурно-активной добавки при содержании  $q = 10...20$  масс.ч. формируются упорядоченная структура без видимых включений, что позволяет сделать вывод о максимальном степени сшивания композитных материалов. Исследовано поведение разработанных материалов в диапазоне температур  $\Delta T = 303 ... 473$  К. Установлено абсолютные значения термического коэффициента линейного расширения материалов, которые можно использовать в различных температурных диапазонах.*

*Ключевые слова:* дисперсный наполнитель, ИК-спектральный анализ, адгезия, физико-механические свойства, теплофизические свойства, структура излома, оптическая микроскопия

**O.V. Leshchenko***Kherson State Maritime Academy***INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF A STRUCTURAL-ACTIVE ADDITION ON THE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES**

*The presence of active groups in the structure of the filler was investigated by the method of IR-spectral analysis. The investigation of the influence of the content of disperse particles of calcium stearate on the adhesion, physical and mechanical and thermophysical properties of composite materials has been carried out. The content of the additive was changed within  $q = 10...50$  parts by weight 100 parts epoxy oligomer ED-20 and 10 parts by PEPA fortress. The introduction of calcium stearate into the epoxy binder for optimum content allows to increase adhesion strength 1,8 times, physical and mechanical properties in 1,6 times, thermophysical properties in 3,2 times. The results of physical and mechanical properties are confirmed by optical microscopy. It was shown that when a structurally active additive is introduced in a content of  $q = 10...20$  parts by weight. an ordered structure is formed without any inclusions, which makes it possible to assert the maximum degree of crosslinking of composite materials. The behavior of the developed materials in the temperature range  $\Delta T = 303...473$  K is investigated. The absolute values of the thermal coefficient of linear expansion of materials, which can be used in different temperature ranges, are established.*

*Key words:* disperse filler, IR-spectral analysis, adhesion, physical and mechanical properties, thermophysical properties, fracture structure, optical microscopy

**Постановка проблеми.** Модифікування полімерів не втрачає своєї актуальності, позаяк забезпечує зміну структури, що у свою чергу приводить до підвищення експлуатаційних характеристик. Створення нових модифікованих полімерних систем, які є термостабільними, забезпечують механічну міцність, низьку водопроникність, стійкість до агресивних середовищ є пріоритетним напрямком сучасного матеріалознавства. Проте застосування хімічних компонентів

(модифікаторів, пластифікаторів, ініціаторів) для модифікування полімерів призводить до зростання вартості матеріалів [1-6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із напрямків забезпечення високих експлуатаційних характеристик є використання дисперсних добавок, які водночас можуть виступати модифікаторами чи поверхнево-активними речовинами [2-7]. Одним із таких добавок є Calcium Stearate (Стеарат кальцію), що використовують як пластифікатор, стабілізатор, і поверхнево-активну речовину. Стеарат кальцію (СК) використовують при виробництві будівельних матеріалів на основі цементних сумішей в якості ефективної гідрофобної добавки. СК є антиагломеруючою добавкою для синтетичних каучуків. Також використовують в якості пластифікатора в пластмасовій промисловості.

Отже, науково-обґрунтоване введення структурно-активної добавки СК у епоксидний зв'язувач забезпечить використання нових полімерних матеріалів, які експлуатують в умовах дії агресивних середовищ, статичних і динамічних навантажень.

**Мета роботи** – дослідження впливу вмісту структурно-активного наповнювача на властивості епоксидних композитів.

**Методика дослідження.** Основним компонентом для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується комплексом покращених властивостей порівняно з іншими відомими реактопластами, а саме: високою адгезійною міцністю до металевої основи, можливістю затвердження при низьких температурах, малою усадкою та ін.

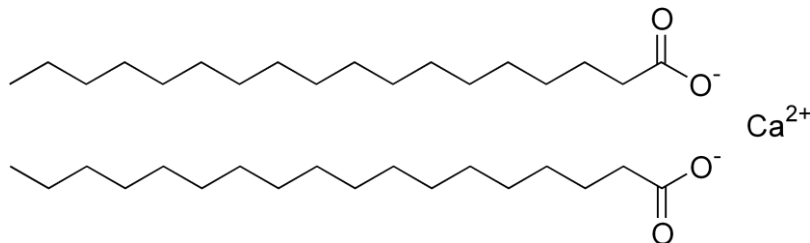
Для зшивання епоксидних композицій використовували твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), який дозволяє зшивати матеріали при кімнатних температурах.

Як мікродисперсний наповнювач використано частки порошку Стеарат кальцію (Calcium Stearate). Це порошок білого кольору Італійського виробництва. Добавку переважно використовували у вигляді наповнювачів для композитних матеріалів будівельного призначення.. Розмір часток становить 8...12 мкм. Структурна формула і характеристики наповнювача наведено на рис. 1 і табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика Стеарат кальцію

Характеристики	Calcium Stearate
Формула	$\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$
Колір	Білий
Запах	Немає
Молярна маса, г/моль	607,02
Температура плавлення, °С	130...150
Густина, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1035
Розчинність у воді	Не розчинний
Вартість, грн/кг	3,9

Рис. 1. Структура формула наповнювача  $\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$ 

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійну міцність при відриві і зсуві, залишкові напруження; руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, ударну в'язкість; теплостійкість, усадку, термічний коефіцієнт лінійного розширення; активність добавки, яку використовували як наповнювач досліджували за допомогою ІЧ-спектрального аналізу; структуру композитних матеріалів досліджували методом оптичної мікроскопії.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно

ГОСТ 14760-69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759-69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань сталених зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  Н/с. Діаметр робочої частини сталених зразків при відриві становив  $d = 25$  мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [8]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,5$  мм формували на сталеній основі. Параметри основи: загальна довжина  $l = 100$  мм; робоча довжина  $l_0 = 80$  мм, товщина  $\delta = 0,3$  мм.

Руйнівне напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно ГОСТу 4648-71 і ГОСТу 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина  $l = 120 \pm 2$  мм, ширина  $b = 15 \pm 0,5$  мм, висота  $h = 10 \pm 0,5$  мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі  $T = 298 \pm 2$  К і відносній вологості  $d = 50 \pm 5$  %. Використовували зразки розміром  $l \times b \times h = (63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$  мм. Відстань між опорами  $l = 40 \pm 0,5$  мм.

Теплостійкість (за Мартенсом) матриці визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю  $v = 3$  К/хв під дією постійного згинаючого навантаження  $F = 5 \pm 0,5$  МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ( $h = 6$  мм).

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження:  $65 \times 7 \times 7$  мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразка з точністю  $\pm 0,01$  мм. Швидкість підйому температури становила  $v = 2$  К/хв.

Відхилення значень при дослідженні показників фізико-механічних і теплофізичних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження хімічних зв'язків у наповнювачі використовували ІЧ-спектральний аналіз. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 2400$   $\text{см}^{-1}$  однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектру за хвильовими числами  $\lambda^{-1} = \nu$  здійснювали на діаграмі в межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа, інтенсивність пропускання, напівширину і площу смуги поглинання визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа  $\nu = \pm 0,01$   $\text{см}^{-1}$ , а при визначенні точності розташування піку  $\nu = \pm 0,125$   $\text{см}^{-1}$ . Фотометрична точність становила  $\pm 0,2$  % при програмному управлінні щільною і тривалістю інтегрування  $t = 10$  с. Крок інтегрування  $\Delta\lambda = 4$   $\text{см}^{-1}$ .

Дослідження структури (топології) КМ проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від  $\times 100$  до  $\times 1600$  разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

**Експериментальні результати.** Попередньо, методом ІЧ-спектрального аналізу визначали хімічну активність часток Стеарату кальція, тобто наявність активних груп в його структурі вивченням ІЧ-спектру СК в діапазоні хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 4000$   $\text{см}^{-1}$ , (рис. 2) виявлено смуги поглинання характерні для функціональних груп, аналіз яких наведено у табл. 2 [9-10].

Отже, методом ІЧ-спектрального аналізу визначали хімічну активність  $\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$ . Враховуючи представлений спектр смуг поглинання (рис. 2, табл. 2) можна констатувати про активність дисперсної добавки.

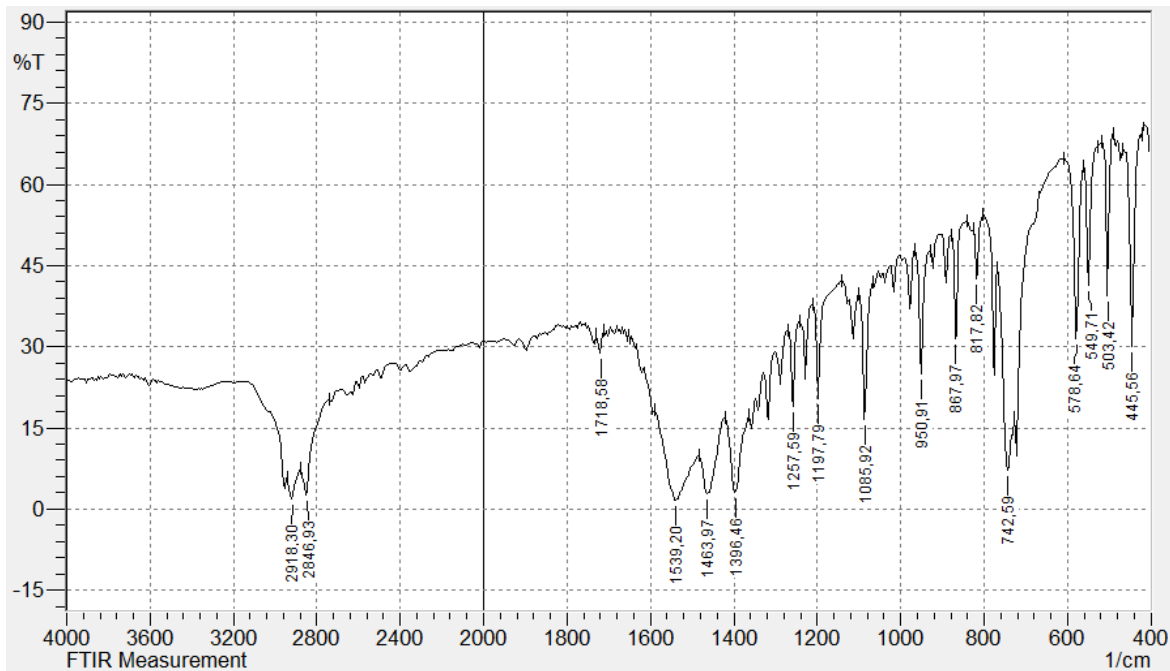


Рис. 2. Спектр наповнювача  $\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$  у ділянці хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 4000 \text{ cm}^{-1}$

Таблиця 2

Характеристичні смуги поглинання згідно ІЧ-спектру часток  $\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$

№ п/п	Хвильове число, $\nu$ , $\text{cm}^{-1}$	Інтенсивність, $T$ , %	Відносна площа піка, $S$ , %	Групи, що відповідають характеристичним смугам поглинання
1	445	30,0	11,1	-C-H- деформаційні коливання аліфатичного ланцюга
2	503	39,5	5,9	
3	549	41,4	7,8	
4	578	31,3	13,0	
5	742	7,2	31,8	( $\text{CH}_2$ ) $_x$ деформаційні площинні маятникові коливання
6	817	42,5	7,0	-C-H- деформаційні коливання аліфатичного ланцюга
7	867	31,3	12,4	
8	950	25,0	14,2	
9	1085	16,6	16,3	
10	1197	20,3	13,0	Валентні коливання транс розміщених метиленових груп
11	1257	19,0	12,4	Валентні коливання-CO-
12	1396	3,1	59,4	Карбоксилат-аніон $\nu$ симетричні C-O-фрагменту
13	1463	2,8	70,0	- $\text{CH}_2$ - деформаційні площинні ножничні коливання фрагменту -- $\text{CH}_2$ -C-O
14	1539	1,6	127,5	Карбоксилат-аніон $\nu$ асиметричні C-O-
15	1718	28,7	4,8	-C=O валентні коливання
16	2846	2,5	129,7	-C-H <sub>2</sub> сильні $\nu$ асиметричні коливання
17	2918	1,8	88,1	-C-H <sub>2</sub> сильні $\nu$ симетричні коливання

Надалі досліджували вплив вмісту  $\text{Ca}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2$  на адгезійну міцність при відриві ( $\sigma_d$ ), зсуві ( $\tau$ ) і залишкові напруження ( $\sigma_3$ ) у КМ.

Встановлено, що введення у епоксидний олігомер ЕД-20 часток СК за вмісту  $q = 10$  мас.ч. приводить до монотонного зростання адгезійної міцності при відриві КМ з 24,4 МПа (для епоксидної матриці) до 34,0 МПа (рис. 3, крива 1), що підтверджує попередні результати дослідження отримані на основі ІЧ-спектрального аналізу, тобто активність добавки. Максимум на кривій залежності адгезійної міцності від вмісту СК встановлено за вмісту  $q = 20$  мас.ч. За такого



вмісту реалізується максимальна взаємодія С-О- і -С=О груп добавки із компонентами зв'язувача, що прискорює перебіг фізико-хімічних процесів зшивання полімеру із металевою основою. Це забезпечує зростання адгезійної міцності при відриві з 24,4 МПа до 39,0 МПа. Подальше введення ( $q = 30 \dots 50$  мас.ч.) часток СК у епоксидний зв'язувач призводить до зниження адгезійної міцності ( $\sigma_a = 36,0 \dots 29,0$  МПа), що свідчить про перенасичення реакційно здатних груп. Це у свою чергу, призводить до неповного зшивання адгезиву і відповідно не забезпечує міцний зв'язок «полімер-основа».

Аналіз залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту СК дозволив виявити подібну залежність (рис. 3, крива 2). Тобто, при введенні часток СК за вмісту  $q = 10 \dots 30$  мас.ч. спостерігали зростання адгезійної міцності при відриві –  $\tau = 9,2 \dots 9,5$  МПа. Водночас, максимальне значення адгезійної міцності при зсуві, яке становить  $\tau = 9,5$  МПа спостерігали при введенні добавки за вмісту  $q = 40$  мас.ч.

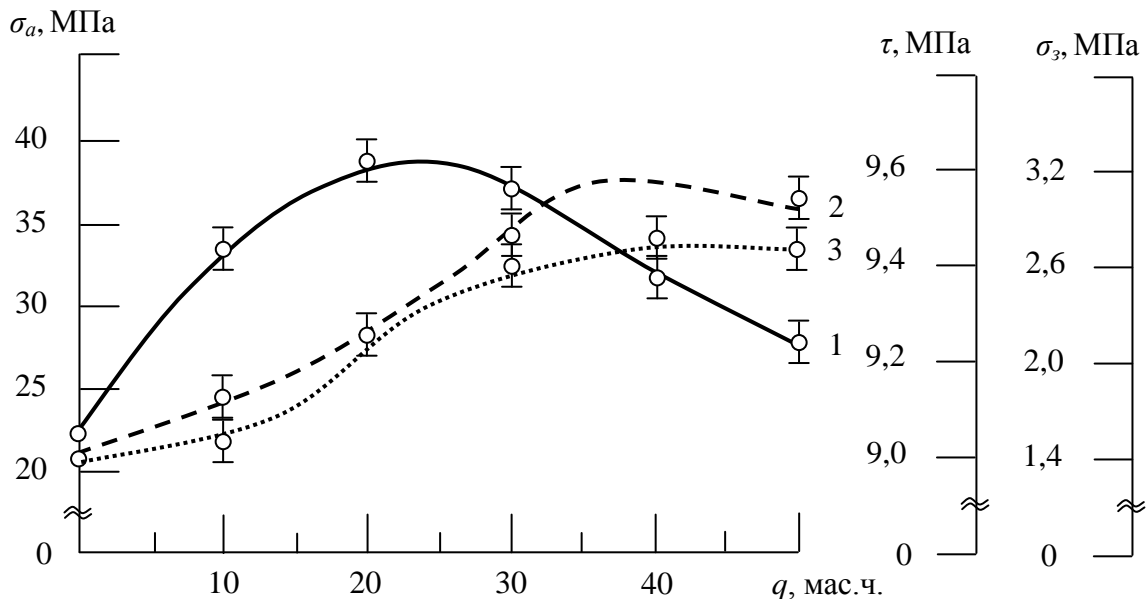


Рис. 3. Залежність адгезійної міцності ( $\sigma_a, \tau$ ) і залишкових напружень ( $\sigma_3$ ) КМ від вмісту наповнювача СК: 1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ ); 3 – залишкові напруження

Аналіз праць [2-5] свідчить, що збільшення ступеня зшивання епоксидного олігомера призводить до зростання залишкових напружень внаслідок формування невірноваженого стану системи. При цьому високі показники залишкових напружень негативно впливають на довговічність захисних покриттів, які експлуатують в умовах динамічних навантажень та впливу зовнішніх факторів. Тому, актуальним є дослідження впливу часток СК на залишкові напруження композитного матеріалу. Встановлено переважно лінійну залежність зростання залишкових напружень від вмісту добавки (рис. 3, крива 3). Показано, що величина залишкових напружень не сягає максимального значення ( $\sigma_3 = 2,0$  МПа) при максимальному значенні адгезійної міцності при відриві ( $q = 20$  мас.ч.). Це свідчить про те, що введення у композит часток СК приводить до формування врівноваженої термодинамічної полімерної системи, що забезпечує довговічність розробленого матеріалу у процесі експлуатації. Введення часток СК у епоксидний зв'язувач за вмісту  $q = 30 \dots 50$  мас.ч. призводить до формування КМ із максимальними значеннями залишкових напружень, які становлять  $\sigma_3 = 2,4 \dots 2,6$  МПа, що опосередковано свідчить про формування матеріалів з напруженим станом. Такі захисні покриття швидко старіють у критичних умовах експлуатації, що суттєво зменшує ресурс роботи технологічного устаткування. Комплексний аналіз кривої адгезійної міцності при зсуві і залишкових напружень (рис. 3, крива 2 і 3) дозволяє констатувати, що використання КМ із максимальними значеннями адгезійної міцності при зсуві не є доцільним. У даному аспекті необхідно враховувати вище наведені фактори. Таким чином для забезпечення тривалої експлуатації поверхонь технологічного устаткування від зовнішніх факторів доцільно використовувати композицію із наступним вмістом: епоксидний олігомер ЕД-20 – 100 мас.ч., дисперсний стеарат кальцію – 20 мас.ч., твердник ПЕПА – 10 мас.ч.

За такого вмісту формуються адгезиви, які забезпечують комплекс вимог, які висувають до захисного покриття.

Для забезпечення тривалої експлуатації розроблених матеріалів проводили дослідження впливу вмісту стеарату кальцію на фізико-механічні властивості. Зокрема досліджували вплив добавки на показники руйнівних напружень при згинанні, модуль пружності при згинанні і ударну в'язкість.

Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач наповнювача СК за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. приводить до підвищення показників руйнівних напружень при згинанні КМ відносно матриці в 1,6 рази. Вважали, що підвищення стійкості розробленого матеріалу до критичного навантаження ( $\sigma_{32} = 72,0$  МПа) пов'язано із впливом стеаринової кислоти аліфатичного ряду ( $\nu = 445 \dots 578 \text{ см}^{-1}$ ,  $\nu = 817 \dots 1085 \text{ см}^{-1}$ ), яка входить у склад дисперсної добавки та забезпечує поряд із зменшенням водопроникності високу пружність. Дані положення добре узгоджуються із результатами оптичної мікроскопії (рис. 5, б, в). Структура зламу полімеру характеризується однорідністю без присутніх дефектів. Лінії блоків руйнування зосереджено у напрямку прикладення навантаження, що і забезпечує високі показники руйнівних напружень при згинанні.

Подальше введення часток СК за вмісту  $q = 30 \dots 50$  мас.ч. призводить до зниження руйнівних напружень при згинанні  $\sigma_{32} = 60,0 \dots 57,0$  МПа. Враховуючи ступінь наповнення полімеру зростає і густина просторової сітки, що зумовлює формування дефектів у структурі через неповне змочування часток зв'язувачем (рис. 5, г-е).

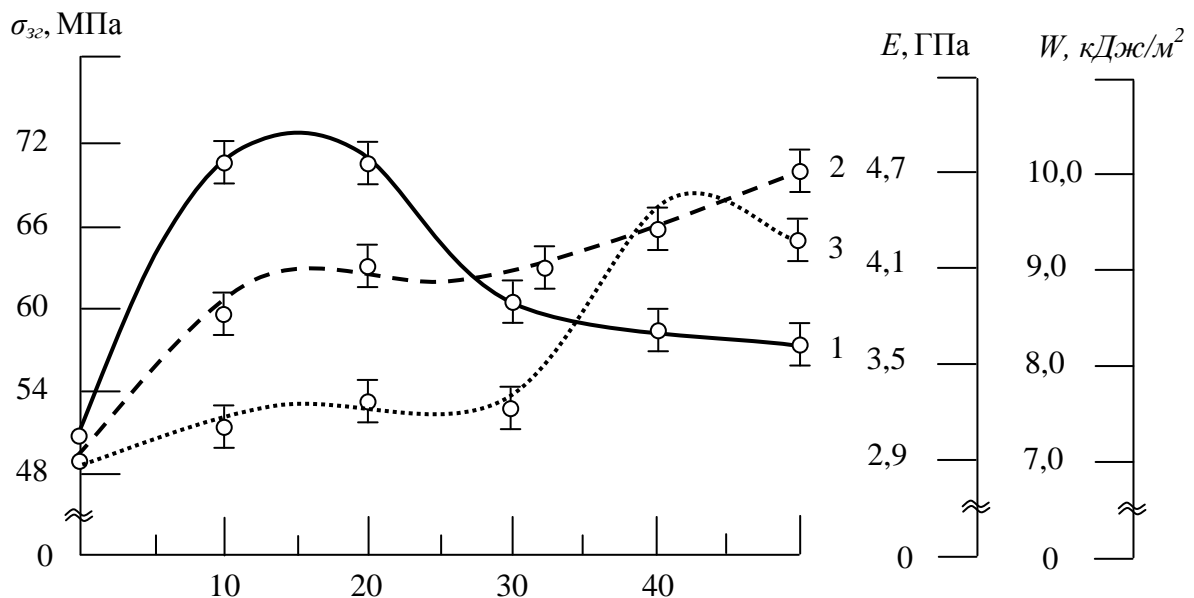


Рис. 4. Залежність руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ), модуля пружності при згинанні ( $E$ ) і ударної в'язкості ( $W$ ) КМ від вмісту наповнювача СК: 1 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ); 2 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 3 – ударна в'язкість ( $W$ )

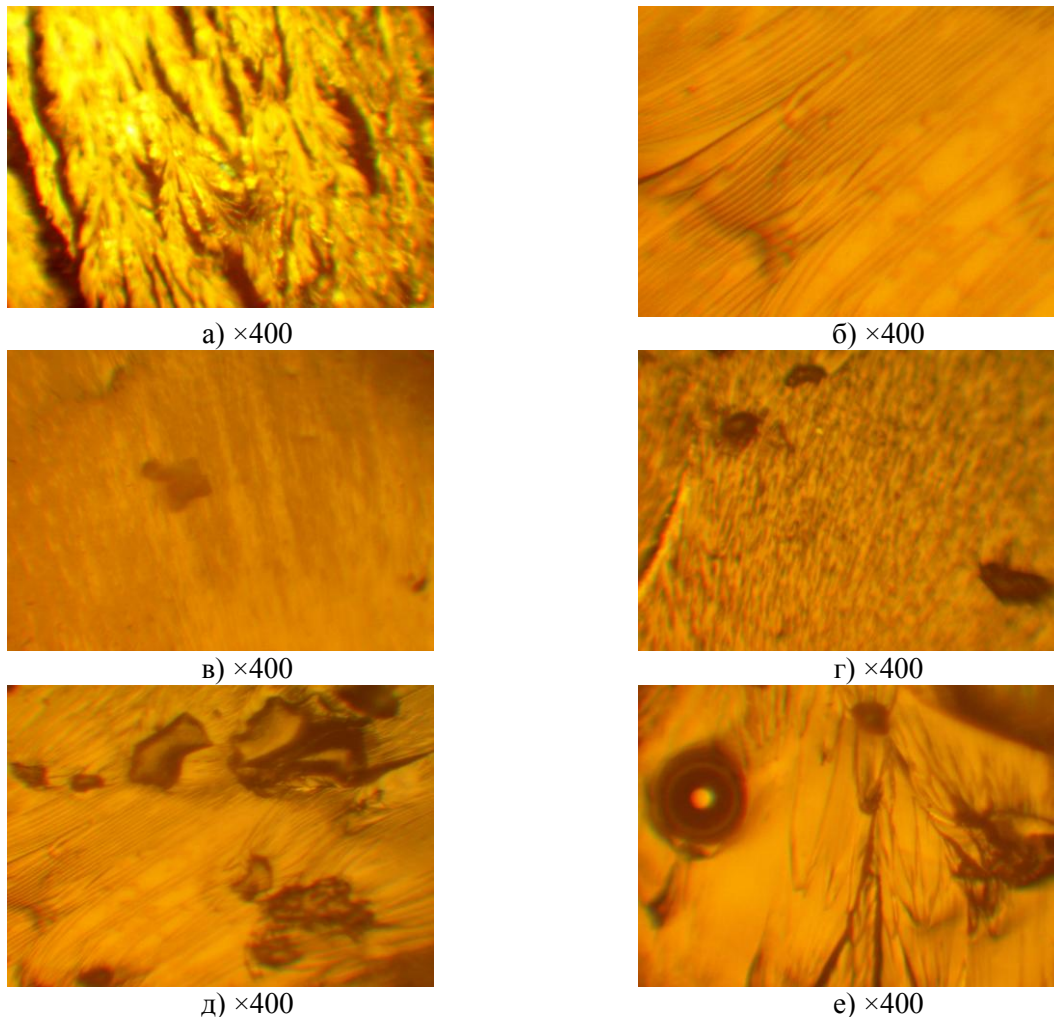
Надалі аналізували залежність модуля пружності при згинанні від вмісту СК (рис. 4, крива 2). Встановлено, зростання модуля пружності (з  $E = 2,9$  ГПа до  $E = 4,7$  ГПа) при введенні часток стеарату кальцію з  $q = 10$  мас.ч. до  $q = 50$  мас.ч. Максимальне значення модуля пружності  $E = 4,7$  ГПа спостерігали при введенні СК за вмісту  $q = 50$  мас.ч., що пов'язано із зростанням жорсткості внаслідок механічного ущільнення полімеру. Водночас, структура таких полімерів характеризується наявністю значної кількості дефектів (рис. 5, е), що підвищує водопроникність та призводить до зменшення терміну експлуатації таких матеріалів.

Паралельно аналізували ударну в'язкість епоксикомпозитів, наповнених частками СК. Значення ударної в'язкості корелюють із значеннями модуля пружності при згинанні (рис. 4, крива 2 і 3), що підтверджує достовірність отриманих результатів дослідження. Максимум на кривій залежності ударної в'язкості встановлено при введенні часток СК  $q = 40$  мас.ч. Ударна в'язкість таких матеріалів становить  $W = 9,9$  кДж/м<sup>2</sup>.

Комплексні дослідження фізико-механічних властивостей КМ від вмісту СК дозволяють констатувати, що для забезпечення тривалої експлуатації розроблених матеріалів необхідно



враховувати як високу пружність, так і достатню жорсткість. Враховуючи дані аспекти рекомендовано використовувати композицію із наступним вмістом: епоксидний олігомер ЕД-20 – 100 мас.ч., дисперсний стеарат кальцію – 10...20 мас.ч., твердник ПЕПА – 10 мас.ч. За такого вмісту формуються композити, які забезпечують комплекс вимог, які висувають до високоміцних полімерних композитів.



**Рис. 5. Фрактограми зламу КМ, наповнених частками стеарату кальція: а) матриця; б) 10 мас.ч.; в) 20 мас.ч.; г) 30 мас.ч.; д) 40 мас.ч.; е) 50 мас.ч.**

Так, як захисні покриття використовують у різних сферах промисловості, зокрема і у суднобудуванні в різних температурних діапазонах, вагомим є дослідження теплофізичних властивостей КМ наповнених частками СК.

Попередніми дослідженнями встановлено [2-4], що теплостійкість за Мартенсом модифікованої УЗО епоксидної матриці становить –  $T = 341$  К (табл. 3). Введення СК за вмісту  $q = 10...30$  мас.ч. приводить до незначного підвищення показників теплостійкості  $\Delta T = 4$  К. Надалі введення часток СК за вмісту  $q = 40...50$  мас.ч. забезпечує зменшення теплофізичних властивостей до  $T = 344...343$  К. Значення теплостійкості при введенні часток СК за вмісту  $q = 40...50$  мас.ч. зменшується не нижче рівня епоксидної матриці, що свідчить рівномірний перебіг процесів при нагріванні у КМ. Додатковий аналіз температури склування полімерів показує кореляцію отриманих значень, а отже достовірність отриманих результатів (табл. 3). Показники температури склування зростають від  $T_c = 327$  К (для вихідної епоксидної матриці) до  $T_c = 347...368$  К.

Додатково можна зазначити, що КМ наповнений частками СК є синдиментаційно стійким, позаяк значення усадки матеріалів не перевищує 1% (табл. 3).

## Теплофізичні властивості КМ

№	Характеристики	Вміст стеарату кальцію, <i>q</i> , мас.ч.					
		матриця	10	20	30	40	50
1	Теплостійкість (за Мартенсом), <i>T</i> , К	341	345	345	346	344	343
2	Температура склування, <i>T<sub>c</sub></i> , К	327	347	368	368	365	366
3	Усадка, <i>δ</i> , %	0,32	0,33	0,37	0,42	0,41	0,42

Для дослідження здатності чинити опір розроблених полімерів тепловому впливу у діапазоні більш високих температур ( $T = 303 \dots 473$  К) проводили дослідження коефіцієнту лінійного розширення (ТКЛР).

Показано (табл. 4), що із зростанням температури ТКЛР епоксикомпозитних матеріалів збільшується, тоді як відносно епоксидної матриці він зменшується. Це свідчить про високий ступінь зшивання при введенні оптимального вмісту дисперсних добавок, за рахунок максимального ущільнення просторової сітки полімеру. Аналіз поведінки розроблених матеріалів у області лінійного розширення за температур:  $\Delta T = 303 \dots 323$  К,  $\Delta T = 303 \dots 373$  К,  $\Delta T = 303 \dots 423$  К,  $\Delta T = 303 \dots 473$  К, дозволяє стверджувати, що найменшим значенням ТКЛР характеризуються КМ із вмістом СК  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. ТКЛР матеріалів коливається в межах  $\alpha = (3,99 \dots 4,02) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  у температурному діапазоні –  $\Delta T = 303 \dots 323$  К. Водночас, у більш високому температурному діапазоні  $\Delta T = 303 \dots 473$  К, найменше значення термічного коефіцієнту лінійного розширення ( $\alpha = (3,20) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) встановлено для КМ із вмістом  $q = 30$  мас.ч. Вважали, поясненням цього є вповільнення сегментальної рухливості міжвузлових молекулярних ланцюгів зумовленої зростанням густини полімеру.

Таблиця 4

## Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) КМ за різних температурних діапазонів випробувань

№	Вміст стеарату кальцію, <i>q</i> , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$			
		Температурні діапазони випробування, $\Delta T$ , К			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	-	6,3	6,8	9,9	10,9
2	10	$3,99 \times 10^{-6}$	1,60	2,15	3,25
є	20	$4,02 \times 10^{-6}$	1,61	2,25	3,29
4	30	$4,02 \times 10^{-6}$	1,58	2,27	3,20
5	40	$4,13 \times 10^{-6}$	1,61	2,26	3,46
6	50	$4,10 \times 10^{-6}$	1,61	2,25	3,48

**Висновки.** У роботі встановлено наступне.

1. Проведено ІЧ-спектральний аналіз часток стеарату кальція, який дозволив виявити у його структурі значну кількість активних груп в діапазоні хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 4000 \text{ cm}^{-1}$ . Виявлення у структурі добавки стеаринової кислоти аліфатичного ряду при  $\nu = 445 \dots 578 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu = 817 \dots 1085 \text{ cm}^{-1}$  забезпечує високу пружність розроблених матеріалів.

2. Для формування покриттів, які забезпечують тривалу експлуатацію поверхонь технологічного устаткування від зовнішніх факторів доцільно використовувати адгезиви, що містять стеарат кальцію за вмісту  $q = 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такі матеріали характеризуються наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 39,0$  МПа, при зсуві –  $\tau = 9,3$  МПа, залишкові напруження –  $\sigma_s = 2,0$  МПа.

3. Для формування покриттів, які забезпечують високі механічні властивості і відповідно тривалу експлуатацію поверхонь технологічного устаткування доцільно використовувати композити, що містять стеарат кальцію за вмісту  $q = 10 \dots 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такі матеріали характеризується наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 72,0$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 3,9 \dots 4,1$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 7,4 \dots 7,6$  кДж/м<sup>2</sup>.

4. Результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з випробуваннями фізико-механічних властивостей матеріалів. Фрактограми зламу епоксидного композиту за вмісту наповнювача  $q = 10 \dots 30$  мас.ч. характеризуються впорядкованою структурою, без наявних включень. Тоді, як матеріали із вмістом наповнювача  $q = 40 \dots 50$  мас.ч. характеризуються термодинамічно неврівноваженою структурою, що призводить до утворення повітряних включень та агломератів.

5. Для формування покриттів, з підвищеними теплофізичними властивостями, що забезпечують стійкість до лінійних та об'ємних деформацій у процесі експлуатації доцільно використовувати композити, що містять стеарат кальцію за вмісту  $q = 10 \dots 30$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такі матеріали характеризується наступними властивостями: теплостійкість за Мартенсом –  $T = 345 \dots 346$  К, температура склування –  $T_c = 347 \dots 368$  К, усадка –  $\delta = 1$  %; термічний коефіцієнт лінійного розширення у діапазоні підвищеної температури  $\Delta T = 303 \dots 473$  К становить –  $(\alpha = (3,20) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})$ , що у 3 рази є меншим за значення ТКЛР епоксидної матриці.

### Література

1. Мартинюк М.І. Епоксидні смоли і композиційні матеріали на їх основі / М.І. Мартинюк, Г.О. Сіренко, Л.Я. Бойко // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. – Випуск ХVІІІ. – 2014. – С. 115-132.
2. Букетов А.В. Полимеркомпозитные защитные огнеупорные покрытия: монография / А.В. Букетов, А.В. Акимов, А.А. Сапронов – Херсон: ХГМА, 2017. – 172 с.
3. А. В. Букетов. Відновлення засобів транспорту фулереновмісними епоксикомпозитами / А. В. Букетов, О.О. Сапронов, М.В. Браїло, Н.М. Букетова, L. Dulebová, В.Л. Алексенко, В.М. Яцюк. – Херсон: ХДМА, 2018. – 164 с.
4. Ходаковський О. В. Дослідження фізико-механічних властивостей модифікованих парааміноазобензолом епоксидних композитів для ремонту засобів транспорту / О.В. Ходаковський, М.Ю. Амелін, Н.М. Букетова, О.О.Сапронов, В.М. Яцюк // Науковий вісник ХДМА, 2017. – №1(16). – С. 113-120.
5. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Sapronov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport – 2016. – Vol. – 31(3). – P. 333-342.
6. Амелін М.Ю. Відновлення деталей транспорту полімерними композитами з мікродисперсними частками, що є відходами виробництва // М.Ю.Амелін, О.О.Сапронов, О.В.Ходаковський, Н.М.Букетова // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ. – Випуск 60. – 2017. – С. 22-30.
7. Сапронов О.О. Використання дисперсних добавок для підвищення теплофізичних властивостей полімерних захисних покриттів / О.О.Сапронов, О.В.Лещенко // Вісник ХНТУ – 2018. – №1(64). – Р. 57-61.
8. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
9. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 536 с.
10. Сафулин Р.С. Неорганические композиционные материалы. – М.: Химия, 1983. – 304с.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018

УДК 629.362.2

**С.П. Мазін, Г.М. Маренко, І.Л. Страшний, В.М. Франков, В.В. Скраль**  
*Національна академія Національної гвардії України*  
**ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО КОНСТРУКЦІЇ ВОДОМЕТНОЇ СПЕЦМАШИНИ  
ДЛЯ ПІДРОЗДІЛІВ ОХОРОНИ ГРОМАДСЬКОГО ПОРЯДКУ**

*Запропонована загальна конструкція водометної спецмашини з електромеханічною трансмісією й двигуном внутрішнього згорання, який забезпечує рух машини й одночасну роботу водяних насосів водомета. Розрахована необхідна потужність двигуна для забезпечення роботи спецмашини у різних режимах використання.*

*Ключові слова:* водометна спецмашина, електромеханічна трансмісія, потужність двигуна.

**С.П. Мазін, Г.М. Маренко, І.Л. Страшний, В.М. Франков, В.В. Скраль**  
*Национальная академия Национальной гвардии Украины*  
**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОНСТРУКЦИИ ВОДОМЕТНОЙ СПЕЦМАШИНЫ  
ДЛЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ОХРАНЫ ОБЩЕСТВЕННОГО ПОРЯДКА**

*Предложена общая конструкция водометной спецмашины с электромеханической трансмиссией и двигателем внутреннего сгорания, который обеспечивает движение машины и одновременную работу водяных насосов водомета. Определена необходимая мощность двигателя для обеспечения работы спецмашины в разных режимах использования.*

*Ключевые слова:* водометная спецмашина, электромеханическая трансмиссия, мощность двигателя.

**S.P. Mazin, G.M. Marenko, I.L. Strashnyi, V.M. Frankov, V.V. Skral**  
*National Academy of the National Guard of Ukraine*  
**PROPOSALS FOR THE DESIGN OF THE WATER CANNON SPECIAL MACHINE  
FOR UNITS FOR THE PROTECTION OF PUBLIC ORDER**

*A general design of the water cannon special machine with an electromechanical transmission and an internal combustion engine is proposed, which ensures the movement of the machine and the simultaneous operation of the water pumps. The required engine power to ensure the operation of the special machine in different modes of use is determined.*

*Key words:* water cannon special machine, electromechanical transmission, engine power.

**Постановка проблеми.** У розвинених країнах світу підрозділи сил охорони громадського порядку під час припинення масових заворушень або інших групових порушень громадського порядку застосовують різноманітні спеціальні технічні засоби. Незалежно від виду та призначення таких засобів, вони не повинні завдавати суттєвої шкоди здоров'ю, а тим більше призводити до загибелі як порушників громадського порядку, так і особового складу підрозділів, що його охороняють.

Одним з таких технічних засобів є водометні спеціальні машини або водомети. На сьогодні водомети є на озброєнні поліцейських сил багатьох демократичних країн, зокрема й України. Незважаючи на суттєві обмеження, встановлені правилами їх застосування, водомети є досить ефективним засобом припинення масових порушень громадського порядку у випадках, коли без застосування обґрунтованого й обмеженого законом насильства по відношенню до порушників неможливо обійтися, й, що важливо, вони є засобом нелетальної дії і їх застосування не суперечить так званому принципу економного застосування обґрунтованого насильства.

Питанням вдосконалення конструкції, підвищення ефективності застосування й травмобезпечності водометних спецмашин приділяється увага в багатьох країнах світу, що свідчить про актуальність теми даної статті.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** У 2003 році науково-дослідний інститут спеціальної техніки МВС України й головне управління внутрішніх військ МВС України разом із ЗАТ "Енергосоюз" почали розробку спеціальної водометної машини "Торнадо" на базі вітчизняного автомобіля КраЗ-63321. Проектування й виготовлення водометної спецмашини виконало в 2004-2005 р. конструкторське бюро пожежних і спеціальних машин (м. Прилуки), що входило до складу ЗАТ "Енергосоюз". Надалі, спецмашина під назвою АВС-30 (63221)-305 (див. рис. 1) була офіційно прийнята на озброєння МВС України. У статті [1] вказані основні особливості конструкції АВС-30 й надані основні характеристики іноземних та вітчизняних водометних спецмашин.

У роботі [2] зазначено, що привод спеціального обладнання існуючих водометних спецмашин, як правило, здійснюється з використанням агрегатів трансмісії базових автомобілів,

що є позитивним. В той же час необхідно зазначити, що суттєвим недоліком конструкції існуючих водометних спецмашин, на думку авторів, є наявність двох двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) – основного для руху машини, й додаткового – для приводу основного водяного насоса та іншого додаткового обладнання. Зазначене ускладнює компоновку спеціального обладнання, призводить до збільшення габаритів машини й зниження ефективності її застосування. Таким чином, можна визначити певну проблему – складність конструкції існуючих водометних машин через наявність двох ДВЗ на одній машині.



Рис. 1. Водометна спецмашина АВС-30 на шасі КраЗ-63221

Аналіз правил використання водометних спецмашин та досвід їх застосування свідчить, що машини у переважній більшості випадків використовуються у міських умовах або переміщуються у складі військових автомобільних колон, що передбачає обмеження швидкості до 60 км/год. Це, в свою чергу, дозволяє зробити припущення, що сучасна водометна спецмашина може мати ДВЗ меншої потужності ніж вантажний автомобіль з аналогічними показниками маси й габаритів.

Не слід залишати поза увагою і той чинник, що під час розосередження натовпу людей водометна спецмашина повинна рухатись з достатньо малою швидкістю тривалий час, що може призвести до роботи основного ДВЗ у перенапруженому тепловому режимі. Крім того, використання у конструкції водометної спецмашини ДВЗ відносно великої потужності, а також шасі вантажного автомобіля підвищеної прохідності з достатньо низькими ККД механічної трансмісії може призвести до значних витрат пального.

Враховуючи вищезазначене, а також результати досліджень, наведені у роботах [3, 4], вважаємо за доцільне застосувати у складі спецмашини електромеханічну трансмісію, яка у порівнянні з механічною трансмісією має наступні переваги: можливість використання одного ДВЗ для приводу всіх агрегатів водометної спецмашини; забезпечує плавну зміну швидкості руху й тяги машини в широкому діапазоні; забезпечує довготривалу й стійку роботу ДВЗ за малих значень кутової швидкості ведучих коліс; забезпечує плавне регулювання передаточного відношення, підвищує надійність теплового двигуна й зв'язаних з ним агрегатів; в трансмісії можуть бути відсутні такі агрегати, як коробка передач, розподільча коробка, коробки відбору потужності і ін.

**Мета статті** – обґрунтування загальної конструкції і визначення основних параметрів сучасної водометної спецмашини.

**Виклад основного матеріалу.** У якості прототипу пропонується прийняти водометну машину [4], яка має один ДВЗ, що забезпечує рух машини й одночасний привод насосів водомета.

Загальний вигляд машини, що пропонується приведено на рис. 2.

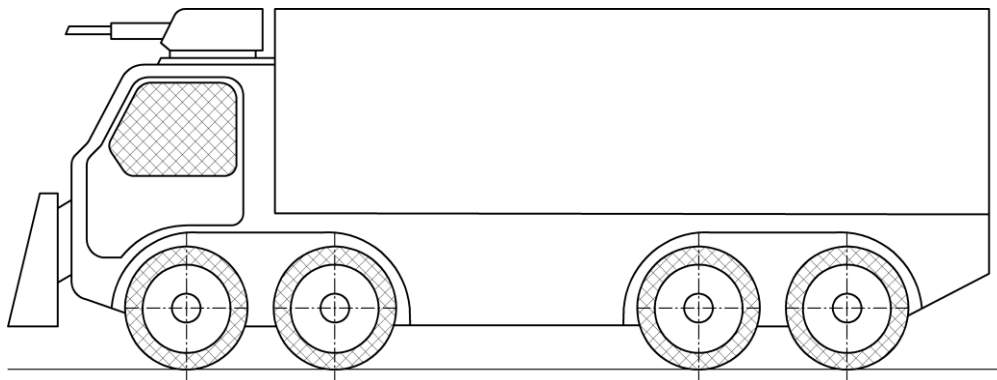
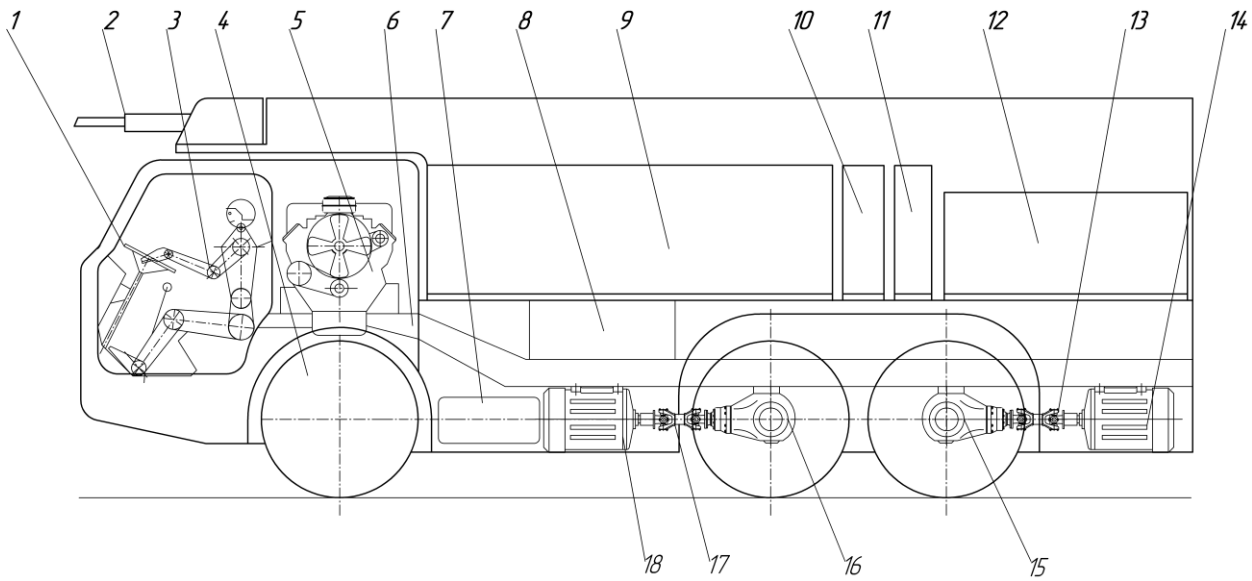


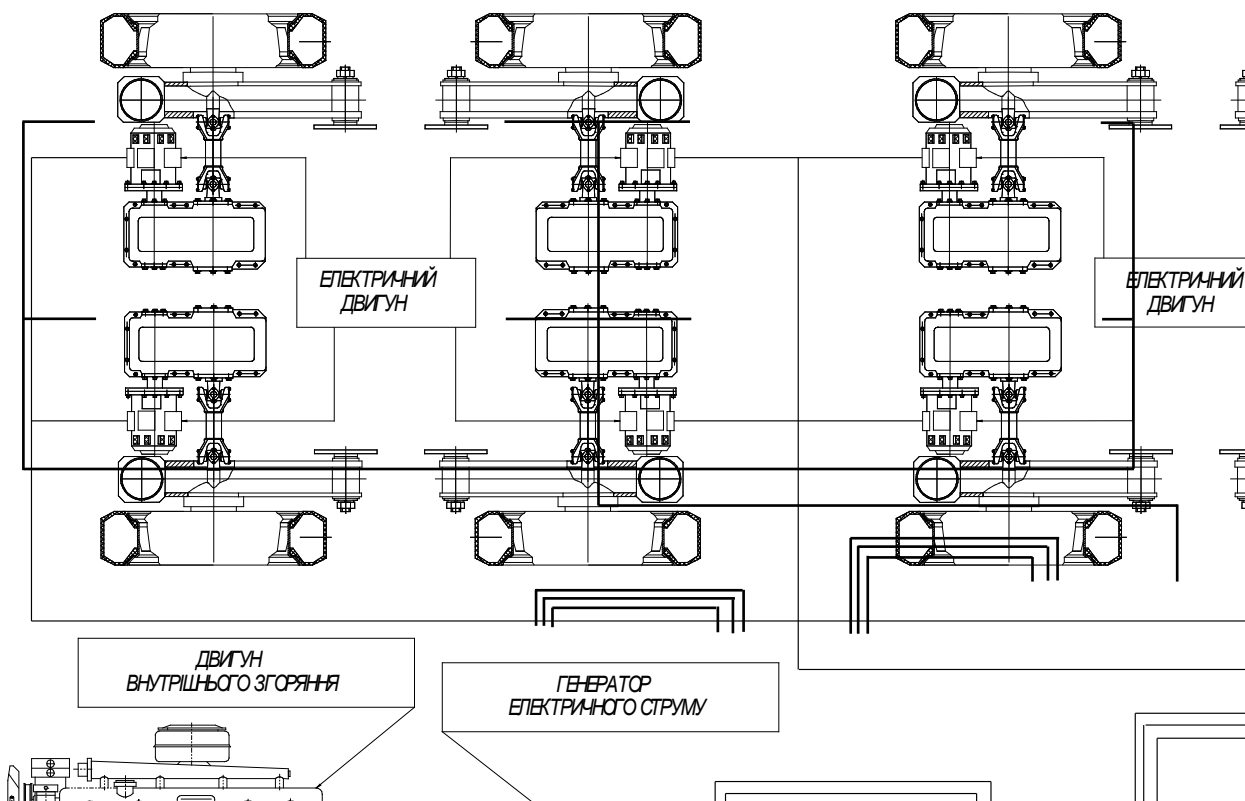
Рис. 2. Загальний вигляд машини, що пропонується

Варіант компоувальної схеми водометної спецмашини на тривісному шасі наведений на рис. 3.



**Рис. 3. Компоувальна схема водометної спецмашини: 1 – кермове колесо; 2 – водяна гармата; 3 – водій; 4 – переднє колесо; 5 – дизельний двигун в сполученні з електричним генератором; 6 – рама; 7 – паливний бак; 8 – акумуляторна батарея; 9 – водяний бак; 10 – бак для барвника води; 11 – бак для сльозогінного газу; 12 – водяна насосна установка; 13 – карданний вал заднього моста; 14 – електродвигун заднього моста; 15, 16 – редуктори ведучих мостів; 17 – карданний вал середнього моста; 18 – електродвигун середнього моста**

Схема електромеханічної трансмісії для шасі спецмашини з колісною формулою 4×4 наведена на рис. 4.



**Рис. 4. Схема електромеханічної трансмісії водометної спецмашини**

© С.П. Мазін, Г.М. Маренко, І.Л. Страшний, В.М. Франков, В.В. Скраль

Двигун внутрішнього згорання через редуктор обертає генератор електричного струму. Згенерований електричний струм через перетворювач напруги й електронний блок керування подається на електричні двигуни ходових модулів, які через редуктор й карданну передачу обертають ведучі колеса з незалежною підвіскою на поздовжньому важелі. Генератор також приводить у дію й електричний двигун насосної установки водомета та живить інше обладнання.

Запропонована схема трансмісії проста у компонованні й завдяки наявності блоку керування забезпечує можливість зміни крутного моменту на кожному колесі окремо, в залежності від навантаження на колесо і його зчеплення з дорогою, що може суттєво покращити показники керованості, прохідності й стійкості руху спецмашини.

Максимальну потужність двигуна внутрішнього згорання спецмашини визначаємо з умови забезпечення руху з максимальною заданою швидкістю за формулою

$$N_{\text{двз}} = \frac{m \cdot g \cdot \psi \cdot V_{\text{max}}}{3600\eta} + \frac{k \cdot F \cdot V_{\text{max}}^3}{46656\eta} \text{ [кВт]},$$

де  $m$  – повна маса машини, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\psi$  – коефіцієнт опору дороги;  $V_{\text{max}}$  – максимальна швидкість руху, км/год;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії трансмісії, за даними роботи [5] приймаємо для електромеханічної трансмісії  $\eta = 0,85$ ;  $k$  – коефіцієнт опору повітря, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>;  $F$  – лобова площа (площа парусності) спецмашини, м<sup>2</sup>.

Для розрахунків приймаємо:  $m_p = 17,836$  т (за технічними характеристиками аналогів);  $V_{\text{max}} = 70$  км/год;  $\psi = 0,015$  (для горизонтальної дороги з асфальтобетонним покриттям у хорошому стані);  $k = 0,7$ ;  $F = 7,5$  м<sup>2</sup>. Тоді

$$N_{\text{двз}} = \frac{17836 \cdot 9,8 \cdot 0,015 \cdot 70}{3600 \cdot 0,85} + \frac{0,7 \cdot 7,5 \cdot 70^3}{46656 \cdot 0,85} = 105,4 \text{ кВт.}$$

Необхідно зазначити, що на водометній спецмашині АВС-30 (див. рис. 1) двигун базового шасі має потужність 330 к.с. (243 кВт), що суттєво перевищує необхідне розрахункове значення.

На водометну спецмашину пропонується встановлювати відцентровий насос продуктивністю 40 л/с, для приводу якого необхідна потужність 62 кВт за створюваного тиску 1 МПа.

Перевірку потужності двигуна за умови роботи водомета під час руху спецмашини виконаємо виходячи з формули

$$N_{\text{двз max}} = N_{\text{вн}} + N_{\text{роз}},$$

де  $N_{\text{двз max}}$  – максимальна потужність двигуна, необхідна для забезпечення руху спецмашини у зоні розосередження натопву людей й одночасного приводу насоса водомета (машина рухається – водомет працює), кВт;  $N_{\text{вн}}$  – частина потужності двигуна, яка витрачається на привод водометного насоса, кВт;  $N_{\text{роз}}$  – частина потужності двигуна, яка витрачається на рух спецмашини зі швидкістю, що необхідна й доцільна під час розосередження натопву людей, кВт.

Частину потужності двигуна, яка витрачається на рух спецмашини зі швидкістю, необхідною під час розосередження натопву людей, визначаємо за формулою

$$N_{\text{роз}} = \frac{V_{\text{роз}}}{3,6\eta} \left( gm\psi_{\text{роз}} + \frac{kFV_{\text{роз}}^2}{13000} \right) \text{ [Вт]},$$

де  $V_{\text{роз}}$  – швидкість руху, необхідна під час розосередження натопву людей,  $V_{\text{роз}} = 5$  км/год;  $\psi$  – коефіцієнт опору дороги у зоні розосередження натопву.

Приймаючи, що максимальний ухил дороги у зоні розосередження відповідає вимогам будівельних норм і становить  $i = 9\%$ , знаходимо значення коефіцієнта опору дороги

$$\psi_{\text{роз}} = f + i = 0,015 + 0,09 = 0,105,$$

де  $f$  – коефіцієнт опору коченню, для сухої асфальтобетонної дороги  $f = 0,015 \dots 0,02$ .

Тоді

$$N_{\text{роз}} = \frac{5}{3,6 \cdot 0,85} \left( 9,8 \cdot 17836 \cdot 0,105 + \frac{0,7 \cdot 7,5 \cdot 5^2}{13000} \right) = 30000 \text{ Вт.}$$

У результаті маємо  $N_{\text{двз max}} = N_{\text{вн}} + N_{\text{роз}} = 62,0 + 30,0 = 92 \text{ кВт}$ .

Таким чином, можна констатувати, що потужності двигуна  $N_{\text{двз}} = 105,4 \text{ кВт}$  достатньо як для руху спецмашини з максимальною швидкістю 70 км/год у разі її переміщення до району використання, так і для руху зі швидкістю 5 км/год у зоні використання за одночасно працюючого водомета.

### Висновки

1. Існуючі вітчизняні водометні спецмашини (див. рис. 1) мають занижені експлуатаційні характеристики щонайменше з двох причин: через встановлення спеціального обладнання на шасі великовантажних автомобілів капотного компоновання з завищеною, враховуючи умови використання водометної спецмашини, потужністю основного двигуна й низькою паливною економічністю; через наявність двох ДВЗ на одній машині.

2. З метою спрощення конструкції й покращення експлуатаційних характеристик пропонується перспективні спецмашини створювати на шасі з гібридною силовою установкою. Враховуючи відносно просту конструкцію, в якості трансмісії пропонується прийняти електромеханічну.

3. Проведений аналіз і обґрунтування конструктивної схеми свідчать про можливість створення водометної спецмашини з сучасними показниками надійності, прохідності, стійкості руху і паливної економічності.

### Список використаних джерел

1. Нестерчук І.М. Аспекти створення сучасних водометних автомобілів // Сучасна спеціальна техніка. – 2013. – № 2(33). – С. 108-116.
2. Чаус В. Д. Спеціальні водометні автомобілі. / В. Д. Чаус, С. В. Алексєєв // Сучасна спеціальна техніка. – 2004. – № 3. – С. 40-45.
3. Мазін С.П. Пропозиції щодо вдосконалення конструкцій бронетранспортерів Національної гвардії України / Г.М. Маренко, А.Г. Скиба, В.М. Франков // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 2017. Випуск № 60. – С. 156-160.
4. Мазін С.П. Мельніков С. М. Вимоги до характеристик водометної машини для розосередження натовпу під час припинення масових безладь. Честь і закон. – Х. : Військ. ін-т ВВ МВС України, 2005. – № 1. – С. 34-39.
5. Експлуатаційні властивості автомобілів [Текст] : навч. посіб. / І. Л. Страшний, А. П. Горбунов. – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2014. – 94 с.

### Рецензенти:

**Таршин Володимир Анатолійович**, професор кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, доктор технічних наук, професор.

**Мазанов Володимир Георгійович**, доцент кафедри Національної академії Національної гвардії України, кандидат технічних наук, доцент.



УДК 539.3

**О.А. Мікуліч***Луцький національний технічний університет***РОЗВИТОК МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ЗАДАЧ У КОНТИНУУМІ КОССЕРА**

*У роботі розроблено аналітико-числовий метод дослідження напруженого стану структурно-неоднорідних середовищ, що послаблені тунельними порожнинами довільного перерізу за дії змінного у часі навантаження. У рамках континууму Коссера при використанні перетворення Фур'є за часом та модифікації методу граничних інтегральних рівнянь записані інтегральні рівняння першої основної задачі. Для визначення кільцевих напружень на границі порожнин побудовані аналітичні залежності. На основі розробленого методу досліджено зміну з часом кільцевих напружень у пінистих середовищах за дії осесиметричного імпульсного навантаження, прикладеного до границі порожнини.*

*Ключові слова:* континуум Коссера, напружений стан, нестационарна задача.

**Е.А. Микулич***Луцкий национальный технический университет***РАЗВИТИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ К РЕШЕНИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ В КОНТИНУУМЕ КОССЕРА**

*В работе разработан аналитико-численный метод исследования напряженного состояния структурно-неоднородных сред, ослаблены туннельными полостями произвольного сечения за действия переменной во времени нагрузки. В рамках континуума Коссера при использовании преобразования Фурье по времени и модификации метода граничных интегральных уравнений записаны интегральные уравнения первой основной задачи. Для определения кольцевых напряжений на границе полостей построены аналитические зависимости. На основе разработанного метода исследовано изменение со временем кольцевых напряжений в пенистых средах за действия осесимметричной импульсной нагрузки, приложенной к границе полости.*

*Ключевые слова:* континуум Коссера, напряженное состояние, нестационарная задача.

**O.A. Mikulich***Lutsk National Technical University***DEVELOPMENT OF THE BOUNDARY INTEGRAL EQUATIONS METHOD FOR THE SOLVING NON-STATIONARY PROBLEMS IN COSSERAT ELASTICITY**

*This paper proposes the novel analytic numerical method for investigation of the dynamic stress state of structural inhomogeneous media with tunnel cavities of the different cross-section under the action of variable in time loads.. Applying Fourier transforms for time variable and modification of boundary integral equation method the integral equation for the first exterior problem of Cosserat continuum are written. The analytical dependencies for determination of dynamic hoop and radial stresses are built. On the basis of the developed method, the time dependence of hoop stresses in foam medium with tunnel cavities was investigated.*

*Keywords:* Cosserat elasticity, stress state, non-stationary problem.

**Постановка проблеми.** Велика кількість сучасних досліджень присвячена створенню нових зернистих та пінистих композиційних матеріалів, що мають широке застосування. До основних переваг таких матеріалів слід віднести низькі показники теплопровідності, невелику густину (до  $50 \text{ кг/м}^3$ ), тривалі терміни експлуатації, а також стійкість до впливу агресивних середовищ.

Низка досліджень показала, що використання апарату класичної теорії пружності до дослідження напруженого стану таких матеріалів, особливо за динамічного навантаження, призводить до значних відмінностей між теоретичними та експериментальними результатами.

У рамках класичної теорії пружності не можна пояснити і спрогнозувати з необхідною точністю перебіг хвильових процесів, що відбуваються у структурно-неоднорідних середовищах за впливу імпульсного чи динамічного навантаження. Це обумовлено тим, що суцільна модель твердого тіла, яка лежить в основі класичної теорії пружності, не дає можливість показати ті властивості реальних тіл, що визначаються їх дискретною структурою.

Для врахування таких властивостей необхідно використовувати уточнені моделі, у яких властивості, що визначаються дискретною структурою, були б явно відображені.

Тому, у роботі для дослідження динамічної поведінки мікрополярних середовищ використовуються континуум Коссера [1]. У рамках цієї моделі кожна мікрочастинка розглядається як абсолютно тверде тіло: має шість ступенів вільності, що характеризують положення у просторі та орієнтацію. У рамках континууму Коссера з'являються додаткові фізичні параметри, які характеризують лінійний розмір, момент інерції частин та властивості частин

відносно обертання. Дослідження взаємодії частинок мікрополярного тіла здійснюється не тільки з урахуванням силових (звичайних), але і моментних напружень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існування моментних напружень в матеріалах спочатку було постульовано Войгтом [2]. Проте брати Коссери [3] були першими розробниками математичної моделі для аналізу матеріалів з моментними напруженнями. У вихідній теорії Коссера кінематичними величинами були переміщення та мікроповороти у середовищі. Гіпотетично вважалося, що мікроповороти можуть бути незалежними від механічного обертання усього середовища, що називається макроповоротом. Вважалося, що макроповорот є звичайним вектором обертання, визначеним як половина ротору переміщень.

У зв'язку зі складністю розв'язання диференціальних рівнянь рівноваги чи руху у моментному континуумі Коссера, точні аналітичні розв'язки побудовані лише для деяких класів задач. Наприклад, у роботах В.А. Пальмова розв'язана задача про дослідження концентрації напружень поблизу кругового отвору. У працях N. Sandru і R.D. Mindlin отримано розв'язок задачі про дію зосередженої сили та зосередженого моменту у нескінченному пружному просторі.

Значно більша кількість робіт присвячена розвитку експериментальних методів визначення пружних характеристик структурно-неоднорідних матеріалів у рамках континууму Коссера: матеріалу людської кістки, пінистих та волокнистих матеріалів. Серед таких робіт слід відмітити значну кількість праць Lakes R. S., серед яких [4-6] та інших авторів.

**Метою дослідження** є розробка аналітико-числового методу розрахунку динамічного напруженого стану структурно-неоднорідних середовищ, що послаблені порожнинами довільного сталого перерізу у рамках моментного континууму Коссера.

**Постановка завдань.** Розглянемо пружне структурно-неоднорідне середовище, що послаблене тунельною порожниною сталого довільного перерізу. Віднесемо його до декартової системи координат  $Ox_1x_2x_3$ , яку розмістимо у центрі ваги тіла так, щоб вісь  $Ox_3$  співпадала з віссю порожнини середовища (рис. 1). Область, яку займає середовище позначимо через  $\Omega$ . Граничний контур у перерізі, перпендикулярному до осі  $Ox_3$  позначимо через  $L$ .

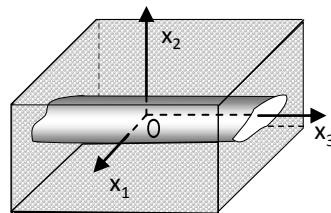


Рис. 1. Моделювання об'єкту дослідження

У рамках моментного континууму Коссера дослідимо розподіл динамічних радіальних та кільцевих напружень у середовищі за дії пружного імпульсу, що обумовлює осесиметричний тиск, прикладений до границі порожнини.

У роботі дослідження проводитимемо для випадку плоскої деформації (коли діаметр тунельної порожнини є достатньо малим). Граничні умови задачі записуються у вигляді:

$$\sigma_n|_L = -\sigma_0\varphi(t), \quad \tau_{sn}|_L = 0, \quad \mu_n|_L = 0 \quad (1)$$

де  $\varphi(t)$  — функція зміни інтенсивності пружного імпульсу з часом  $t$ ,  $\sigma_0$  — стала, що залежить від інтенсивності навантаження. За числових розрахунків зміну інтенсивності імпульсу з часом представимо у вигляді слабкої ударної хвилі [7]:

$$\varphi(\tau) = p_*\tau^{n_*}e^{-\alpha_*\tau}, \quad \tau > 0, \quad n_* \geq 0, \quad (2)$$

де  $p_*$ ,  $n_*$ ,  $\alpha_*$  — сталі,  $\tau = t \cdot c_l / a$  — безрозмірний часовий параметр,  $a$  — деякий характерний розмір,  $c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$  - швидкість хвиль розширення,  $\lambda$ ,  $\mu$  - сталі Ляме,  $\rho$  — густина середовища.

**Вибір методів дослідження.** Для дослідження напруженого стану структурно-неоднорідних середовищ за дії змінного у часі навантаження використаємо рівняння руху моментного континууму Коссера [1]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ji,j} + X_i &= \rho \ddot{u}_i, \\ \epsilon_{kji} \sigma_{ij} + \mu_{jk,j} + Y_k &= I \ddot{\phi}_k, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $u_i, \phi_k$  — компоненти векторів переміщень та мікроповоротів,  $X_i, Y_k$  — компоненти вектора масових сил та моментних зусиль,  $I$  — інерція обертання одиничного об'єму,  $\sigma_{ji}, \mu_{ji}$  — силові та моментні напруження. Відповідно до [1], у роботі використовувалися наступні залежності для визначення силових та моментних напружень:

$$\begin{aligned}\sigma_{ji} &= (\mu + \alpha)\gamma_{ji} + (\mu - \alpha)\gamma_{ij} + \lambda\gamma_{kk}\delta_{ij}, \\ \mu_{ji} &= (\gamma + \varepsilon)\kappa_{ji} + (\gamma - \varepsilon)\kappa_{ij} + \beta\kappa_{kk}\delta_{ij},\end{aligned}\quad (4)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \kappa$  — пружні характеристики металу у континуумі Коссера,  $\gamma_{ij} = u_{i,j} - \epsilon_{kji}\phi_k$  — несиметричний тензор деформацій;  $\kappa_{ij} = \varphi_{i,j}$  — тензор згину-кручення,  $\epsilon_{ijk}$  — антисиметричний тензор Леві-Чівіта.

**Викладення основного матеріалу.** Для розв'язання нестационарної задачі використаємо перетворення Фур'є за часовою змінною  $t$  [8]:

$$\hat{f}(x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t)e^{-i\omega t} dt, \quad (5)$$

де  $\omega$  — частота,  $i = \sqrt{-1}$ . Застосовуючи перетворення (5) до рівнянь руху (3), отримаємо рівняння, що є аналогами рівнянь усталених коливань з циклічною частотою  $\omega$ :

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_{ji,j} + \hat{X}_i + \omega^2 \rho \hat{u}_i &= 0, \\ \epsilon_{ijk} \hat{\sigma}_{ij} + \hat{\mu}_{mk,m} + \hat{Y}_k + \omega^2 I \hat{\phi}_k &= 0.\end{aligned}\quad (6)$$

Відповідно до непрямого підходу методу граничних елементів, для зручності подальших викладок граничні умови у області Фур'є-зображень для випадку заданого навантаження на границі порожнини (перша основна задача) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned}p_i &= \hat{\sigma}_{ji} n_j = \bar{p}_i \text{ на } L; \\ m_k &= \hat{\mu}_{jk} n_j = \bar{m}_k \text{ на } L.\end{aligned}\quad (7)$$

Використовуючи зважено-залишковий підхід [9], запишемо інтегральні залежності з урахування граничних умов:

$$\begin{aligned}\int_{\Omega} (\hat{\sigma}_{ji,j} + \hat{X}_i + \omega^2 \rho \hat{u}_i) u_i^* d\Omega &= \int_L (p_i - \bar{p}_i) u_i^* dL, \\ \int_{\Omega} (\epsilon_{ijk} \hat{\sigma}_{ij} + \hat{\mu}_{mk,m} + \hat{Y}_k + \omega^2 I \hat{\phi}_k) \phi_k^* d\Omega &= \int_L (m_k - \bar{m}_k) \phi_k^* dL,\end{aligned}$$

де  $u_i^*, \phi_k^*$  - фундаментальні розв'язки рівнянь (6) у області Фур'є-зображень.

Інтегруючи частинами перший член першого рівняння та другий член другого рівняння, додаючи отримані співвідношення з урахуванням несиметричного тензору деформацій, можна записати представлення для потенціальних зображень переміщень та мікроповоротів:

$$\begin{aligned}\hat{u}_i &= \int_L p_j \cdot U_{ij}^* dL + \int_L m_k \cdot \Phi_{kj}^* dL + \int_{\Omega} X_j \cdot U_{ij}^* d\Omega + \int_{\Omega} Y_k \cdot \Phi_{kj}^* d\Omega, \\ \hat{\phi}_k &= \int_L p_j \cdot U_{kj}^{**} dL + \int_L m_k \cdot \Phi_{kk}^{**} dL + \int_{\Omega} X_j \cdot U_{kj}^{**} d\Omega + \int_{\Omega} Y_k \cdot \Phi_{kk}^{**} d\Omega,\end{aligned}\quad (8)$$

де  $U_{ij}^*, U_{kj}^{**}, \Phi_{kj}^*, \Phi_{kk}^{**}$  - фундаментальні функції для переміщень та мікроповоротів,  $p_j, m_k$  - невідомі функції.

Для побудови фундаментальних функцій для переміщень та мікроповоротів використаємо методи теорії потенціалу та колокації. Для плоского випадку, що розглядається у роботі, рівняння руху через переміщення та мікроповороти записуються у вигляді:

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu)\partial_1 \hat{\theta} + \mu \Delta \hat{u}_1 - \alpha \partial_2 (\partial_1 \hat{u}_2 - \partial_2 \hat{u}_1) + 2\alpha \partial_2 \hat{\phi}_3 + \hat{X}_1 + \rho \omega^2 \hat{u}_1 &= 0; \\ (\lambda + \mu)\partial_2 \hat{\theta} + \mu \Delta \hat{u}_2 + \alpha \partial_1 (\partial_1 \hat{u}_2 - \partial_2 \hat{u}_1) - 2\alpha \partial_1 \hat{\phi}_3 + \hat{X}_2 + \rho \omega^2 \hat{u}_2 &= 0; \\ (\gamma + \varepsilon)\Delta \hat{\phi}_3 + 2\alpha (\partial_1 \hat{u}_2 - \partial_2 \hat{u}_1) - 4\alpha \hat{\phi}_3 + \hat{Y}_3 + I \omega^2 \hat{\phi}_3 &= 0.\end{aligned}\quad (9)$$

Продиференціюємо друге з рівнянь (9) по  $x_1$  та перше по  $x_2$  та віднімемо їх. Підставимо отримане рівняння у третє рівняння. Отримаємо визначальне співвідношення для визначення мікроповоротів у континуумі Коссера:

$$\Delta\Delta\hat{\phi}_3 - p\Delta\hat{\phi}_3 - q\hat{\phi}_3 = -\frac{1}{l_3^2} \left( \frac{-\partial_1\hat{X}_2 + \partial_2\hat{X}_1}{\rho c_2^2} + \frac{(\Delta - \kappa_2^2)\hat{Y}_3}{2\alpha} \right);$$

де  $l_3 = \sqrt{(\gamma + \varepsilon) / 2\mu}$  – розмірний параметр континууму Коссера,  $c_2 = \sqrt{(\mu + \alpha) / \rho}$  – швидкість хвиль зсуву у континуумі Коссера.

Використовуючи метод колокації [9] фундаментальні тензори переміщень та мікроповоротів можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{ij}^* &= A_0 K_0(\kappa_r r) \delta_{ij} + A_1 \partial_i \partial_j (K_0(\kappa_1 r) - K_0(\kappa_r r)) + \\ &+ (\Delta \delta_{ij} - \partial_i \partial_j) (a_0 K_0(\kappa_r r) + a_1 K_0(\kappa_1 r) + a_2 K_0(\kappa_2 r)); \\ U_{kj}^{**} &= (-1)^{j+1} \partial_{j+1} (\alpha_0 K_0(\kappa_r r) + \alpha_1 K_0(\kappa_1 r) + \alpha_2 K_0(\kappa_2 r)); \\ \Phi_{kj}^* &= A_0 A_1 (-1)^{j+1} \partial_{j+1} (K_0(\kappa_1 r) - K_0(\kappa_2 r)); \\ \Phi_{kk}^{**} &= A_0 A_2 (b_3 K_0(\kappa_1 r) - b_4 K_0(\kappa_2 r)); \end{aligned}$$

де  $\kappa_j$  – хвильові числа,  $A_k, a_k, \alpha_k, b_m$  – відомі сталі,  $k = 1, 2, 3; m = 3, 4$ .

Для задоволення граничних умов (1) у області Фур'є-зображень та визначення невідомих функцій силові та моментні напруження розраховувалися за формулами [10]:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_n &= (\hat{\sigma}_{11} + \hat{\sigma}_{22}) / 2 + (e^{-2i\alpha} (\hat{\sigma}_{11} - \hat{\sigma}_{22} + i(\hat{\tau}_{12} + \hat{\tau}_{21})) + e^{2i\alpha} (\hat{\sigma}_{11} - \hat{\sigma}_{22} - i(\hat{\tau}_{12} + \hat{\tau}_{21}))) / 4; \\ \hat{\tau}_{sn} &= (\hat{\tau}_{12} - \hat{\tau}_{21}) / 4 + i (e^{2i\alpha} (\hat{\sigma}_{11} - \hat{\sigma}_{22} - i(\hat{\tau}_{12} + \hat{\tau}_{21})) - e^{-2i\alpha} (\hat{\sigma}_{11} - \hat{\sigma}_{22} + i(\hat{\tau}_{12} + \hat{\tau}_{21}))) / 4; \quad (10) \\ \hat{\mu}_n &= ((\hat{\mu}_{31} - i\hat{\mu}_{32}) e^{i\alpha} + (\hat{\mu}_{31} + i\hat{\mu}_{32}) e^{-i\alpha}) / 2, \end{aligned}$$

де  $\alpha$  — кут між нормаллю до площинки та віссю  $Ox_1$ .

Тут для плоскої задачі компоненти тензора напружень визначалися на основі залежностей, що є аналогами закону Гука у моментному континуумі Коссера [1]:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{11} &= \lambda \hat{\theta} + 2\mu \partial_1 \hat{u}_1; \\ \hat{\sigma}_{12} &= \mu (\partial_2 \hat{u}_1 + \partial_1 \hat{u}_2) + \alpha (\partial_1 \hat{u}_2 - \partial_2 \hat{u}_1) - 2\alpha \hat{\phi}_3; \\ \hat{\sigma}_{21} &= \mu (\partial_2 \hat{u}_1 + \partial_1 \hat{u}_2) - \alpha (\partial_1 \hat{u}_2 - \partial_2 \hat{u}_1) + 2\alpha \hat{\phi}_3; \\ \hat{\sigma}_{22} &= \lambda \hat{\theta} + 2\mu \partial_2 \hat{u}_2; \\ \mu_{31} &= (\gamma + \varepsilon) \partial_1 \hat{\phi}_3; \quad \mu_{32} = (\gamma + \varepsilon) \partial_2 \hat{\phi}_3. \end{aligned}$$

Підставляючи зображення переміщень та мікроповоротів (8) у формули (10), виділяючи нерегулярні складові та застосовуючи формули Племеля-Сохоцького при граничному переході, отримаємо інтегральні рівняння для визначення невідомих функцій:

$$\begin{aligned} \frac{\text{Re}(q)}{2} + \mathbf{v.p.} \int_L (f_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + f_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + f_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL) &= -\sigma_0 \hat{\phi}(\omega); \\ \frac{\text{Im}(q)}{2} \left( 1 - \left( \frac{\alpha}{\mu} \right)^2 \right) + \mathbf{v.p.} \int_L (g_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + g_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + g_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL) &= 0; \\ \frac{m_3}{2} + \mathbf{v.p.} \int_L (G_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) q d\zeta + G_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) \bar{q} d\bar{\zeta} + G_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3 dL) &= 0. \end{aligned}$$

Отримана система інтегральних рівнянь розв'язувалася числово на основі методу механічних квадратур. Для інтегралів тику Коші використовувалися квадратурні формули підвищеної точності [11].

Використовуючи розроблений у роботі підхід, побудовано аналітичні залежності для визначення кільцевих та радіальних напружень:

$$\bar{\sigma}_\theta = \operatorname{Re}(q) \left( \frac{1}{2} - \left( \frac{c_\tau}{c_l} \right)^2 \right) + \mathbf{v.p.} \int_L (h_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_1 + h_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_2 + h_3(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3) dL,$$

$$\hat{\sigma}_r = \mathbf{v.p.} \int_L (h_4(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_1 + h_5(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) p_2 + h_6(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0) m_3) dL,$$

де  $h_k(\mathbf{x}, \mathbf{x}^0)$ ,  $k = \overline{1, 5}$  - відомі функції.

Оригінали кільцевих та радіальних напружень визначалися на основі дискретного оберненого перетворення Фур'є, що за числових розрахунків реалізовувався на основі алгоритму Кулі-Тьюкі швидкого перетворення Фур'є:

$$\sigma(T_k) = \frac{1}{T} \left( \sum_{n=-K}^{K-1} \hat{\sigma}(\omega_n) \exp\left(2\pi i \frac{n \cdot k}{K}\right) - \sum_{n=-K}^{K-1} \hat{\sigma}(\omega_n) \right), \quad (11)$$

де  $K$  — кількість елементів дискретної вибірки,  $\omega_n = 2\pi n/T$  — частоти вибірки,  $T_k = kT/K$ ,  $k = \overline{0, K-1}$  — фіксовані моменти часу. Для оптимізації числових розрахунків представлення (11) зручно обчислювати за допомогою швидкого дискретного перетворення Фур'є, при  $K = 2^m$ ,  $m$  — ціле додатне число.

**Результати числових розрахунків.** На основі розробленого аналітико-числового методу проведемо дослідження динамічного напруженого стану для пінополіуретану (рис. 2). У [6] на основі експериментальних досліджень отримані наступні значення пружних характеристик у континуумі Коссера:  $\alpha = 4,33$  МПа,  $\gamma = 40$  Н,  $\varepsilon = 4,5$  Н,  $\lambda = 763$  МПа,  $\mu = 104$  МПа. За числових розрахунків значення густини пінополіуретану приймалося  $\rho = 0,34$  г/см<sup>3</sup>, модуль Юнга  $E = 300$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,44$ .

Для числових розрахунків було вибрано 512 елементів дискретної вибірки для швидкого дискретного перетворення Фур'є та 80 вузлових точок на границі порожнини. При заданні модуляції імпульсу з часом було вибрано наступні параметри:  $p_* = 30$ ;  $n_* = 2$ ;  $\alpha_* = 4$ . Дослідження проводилися для інтервалу безрозмірного часового параметра  $\tau \in [0, 12c_l/a]$ .

На рис. 2 кривій 1 відповідає розв'язок, отриманий у рамках класичної теорії пружності на основі алгоритму, розробленому у [12], кривим 2-7 – розв'язки у континуумі Коссера, отримані на основі розробленого методу для випадків  $R = 0,1l_3$ ,  $0,25l_3$ ,  $0,5l_3$ ,  $1l_3$ ,  $3l_3$  та  $5l_3$  відповідно. Тут  $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_0$ .

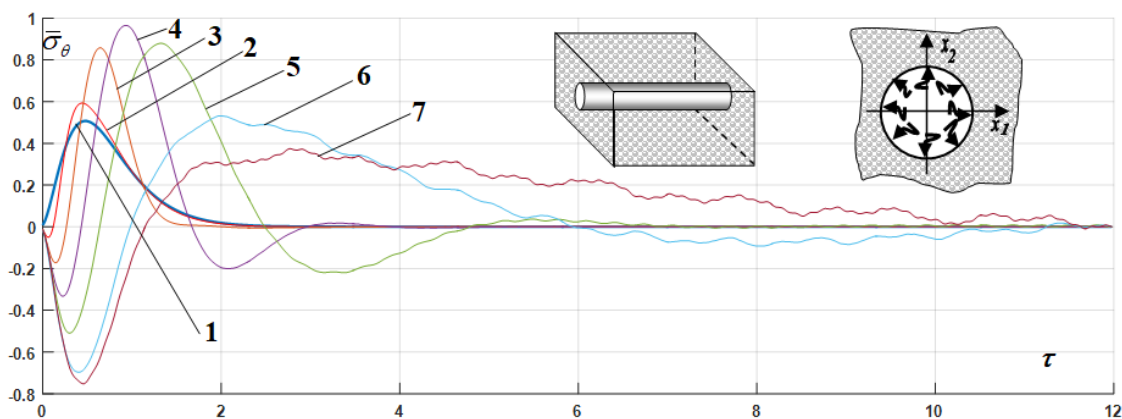


Рис. 2. Розподіл відносних кільцевих напружень на границі тунельної порожнини

З рис. 2 видно, що для випадків  $R \in [0, 1l_3; l_3]$  значення кільцевих напружень, розрахованих з урахуванням впливу обертально-зсувних деформацій, є вищими у 1,16 – 1,9 рази відповідних значень, отриманих у рамках класичної теорії пружності.

Для  $R > 3l_3$  значення динамічних кільцевих напружень у моментному континуумі Коссера є меншими відповідних значень, розрахованих на основі рівнянь класичної теорії пружності. Цей

факт узгоджується з відомими у результатами, отриманими на основі аналітичних розв'язків [10], записаних для континууму Коссера зі стисненим обертанням.

**Висновки.** В статті розроблено аналітико-числовий метод розв'язання нестационарних задач у моментному континуумі Коссера. За використання перетворення Фур'є за часом та модифікації методу граничних інтегральних рівнянь, побудовано інтегральні рівняння першої основної задачі, ядра яких мають особливості типу Коші.

Точність запропонованого методу забезпечується узгодженням отриманих результатів з відомими у літературі результатами.

Розроблений метод можна використовувати для повного аналізу перебігу нестационарних хвильових процесів у структурно-неоднорідних волокнистих, пінистих чи гранульованих середовищах.

#### Список використаних джерел:

1. Nowacki W. Theory of asymmetric elasticity. - Warszawa, Poland: Scientific Publishers (PWN) & Pergamon Press, 1986. - 126 p.
2. Voigt W. Theoretische studien u̇ber die elastizitȧtsverhȧltnisse der krystalle.// Abhandlungen der Mathematischen Classeder Kȯniglichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Gȯttingen. - 1887. - Vol. 34. - P. 3-51.
3. Cosserat E., Cosserat F. The'orie des corps de'formables. - Paris, France: A. Hermann et Fils, 1909. - 262 p.
4. Anderson W. B. and Lakes R. S. Size effects due to Cosserat elasticity and surface damage in closed-cell polymethacrylimide foam. // J. of Mater. Sci. - 1994. - 29. - P. 6413 - 6419.
5. Lakes R. Experimental methods for study of Cosserat elastic solids and other generalized elastic continua // Continuum models for materials with microstructure. - 1995.— Ch. 1. - P. 1-22.
6. Lakes R. S. Physical Meaning of Elastic Constants in Cosserat, Void, and Microstretch Elasticity // Journal of Mechanics of Materials and Structures. - 2016. - Vol. 11, No. 3. - P. 217-229.
7. O.A. Mikulich, V.I. Shvabjuk Interaction of weak shock waves with rectangular meshes in plates. // Odes'kyi Politehnychnyi Universytet. PRATSI. - 2016. vol. 2(49). - PP. 104-110.
8. Salih M.S. Fourier Transform - Signal Processing and Physical Sciences / M.S. Salih. - London: InTech, 2015. - 222 pp.
9. Banerjee P.K. Boundary element method in engineering science, McGraw Hill, New York, London, 1994. - PP. 65 - 82.
10. Г.Н. Савин, Н.А. Шульга. Динамическая плоская задача моментной теории упругости. // Прикладная механика. - 1967. - т. 3, вып. 6. - С. 216-221.
11. Саврук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. - К.: Наук. думка, 1981. - 324 с.
12. Shvabyuk V., Sulym H., Mikulich O. Stress state of plate with incisions under the action of oscillating concentrated forces // Acta Mech. et Automat. - 2015. - 9, No.3. - P. 140-144.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 544.77

І.А. Мороз<sup>1</sup>, О.М. Янчук<sup>2</sup>, В.П. Кашицький<sup>1</sup><sup>1</sup> Луцький національний технічний університет<sup>2</sup> Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки**ТОПОЛОГІЧНА СТРУКТУРА СЕДИМЕНТАЦІЙНИХ ОСАДІВ КАРБОНАТІВ МЕТАЛІВ  
У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ НЕІОННОГЕННОЇ ПАВ**

*Досліджено вплив промислової неіонногенної ПАВ TRITON X-100 на агрегативно-деагрегативні процеси під час приготування суспензій основного карбонату купруму та ніколу, карбонатів мангану та кобальту. Розглянуто особливості формування просторової структури осадів карбонатів металів із їхніх суспензій. Проаналізовано вплив TRITON X-100 на щільність укладання високодисперсних частинок в їхніх седиментаційних осадах, які одержані із водних суспензій.*

*Ключові слова:* топологічна структура, карбонати металів, поверхнево-активні речовини.

І.А. Мороз, А.Н. Янчук, В.П. Кашицкий

**ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ОСАДКОВ КАРБОНАТОВ  
МЕТАЛЛОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ НЕИОННОГЕННОЙ ПАВ**

*Исследовано влияние промышленной неионногенной ПАВ TRITON X-100 на агрегативно-деагрегативные процессы во время приготовления суспензий основного карбоната меди и никеля, карбонатов марганца и кобальта. Рассмотрены особенности формирования пространственной структуры осадков карбонатов металлов из их суспензий. Проанализировано влияние TRITON X-100 на плотность укладки высокодисперсных частиц в их седиментационных осадках, полученных из водных суспензий.*

*Ключевые слова:* топологическая структура, карбонаты металлов, поверхностно-активные вещества.

I.A. Moroz, O.M. Yanchuk, V.P. Kashytskyi

**TOPOLOGICAL STRUCTURE OF SEDIMENTATION SURFACES OF METAL CARBONATE  
IN WATER SOLUTIONS OF NONIONIC SURFACTANT**

*The influence of industrial non-ionic surfactant TRITON X-100 on aggregation-disaggregation processes during the preparation of suspensions of the main carbonate of cuprum and nicole, carbonate of manganese and cobalt was investigated. The obtained results are discussed within the framework of the model of redistribution of powders in liquid media. It is shown that the influence of nonionic surfactant on the redispersion ability of the medium depends on the degree of the powders dispersion.*

*Features of formation of spatial structure of metal carbonate sediments from their suspensions are considered. The influence of TRITON X-100 on the density of laying highly dispersed particles in their sedimentation sediments obtained from aqueous suspensions has been analyzed. The role of coagulation and redispersion processes of powders during the preparation of suspensions and aggregation of particles during sedimentation of suspensions in the formation of spatial structure of sediments is shown.*

*Key words:* topological structure, metal carbonates, surfactants.

**Постановка проблеми.** Порошки карбонатів металів поряд з їхніми оксидами та гідроксидами широко використовують для синтезу функціональної кераміки, властивості та структура якої непритаманна природним матеріалам [1-6]. У процесі виготовлення кераміки одним із важливих етапів є одержання початкової однорідної топологічної структури із тонкодисперсних частинок різної хімічної природи. У наступних етапах виготовлення кераміки ця просторова структура керамічної суміші суттєво впливає на параметри готових виробів, зокрема на відтворюваність їхніх властивостей [7]. Задача одержання однорідної топологічної структури початкової керамічної шихти особливо ускладнюється у разі використання тонкодисперсних порошків з розміром частинок менше 10 мкм, оскільки такі дисперсні частинки на повітрі знаходяться в агрегованому стані. Самочинне агрегування тонкодисперсних порошків обмежує можливості досягнення високої однорідності керамічної шихти та необхідної якості готових матеріалів. На просторову структуру порошків у керамічних сумішах впливає також їхня полідисперсність.

Властивості готової кераміки суттєво залежать від параметрів дисперсних систем, які виникають під час приготування формувальних керамічних мас. Властивості дисперсних систем зумовлені інтенсивністю міжчастинкової взаємодії, яку найефективніше можна регулювати за допомогою добавок ПАВ різної природи. Питання впливу ПАВ на агрегативну стабільність суспензій та топологічну структуру седиментаційних осадів дискутується давно, але для карбонатів металів цей вплив вивчався недостатньо. Окрім того подальше дослідження топологічної структури порошків, нагромадження нових експериментальних результатів для

порошків різної хімічної природи та обґрунтування теоретичних узагальнень залишається актуальною задачею сучасної керамічної технології.

**Постановка завдань.** Метою даної роботи є дослідження впливу неіоногенної поверхнево-активної речовини на колоїдно-хімічні властивості суспензій карбонатів металів та формування топологічної структури у седиментаційних осадах цих порошків.

**Викладення основного матеріалу.** Суспензії порошків основних карбонатів ніколу  $(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$ , купруму  $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$  та карбонатів мангану  $\text{MnCO}_3$ , кобальту  $\text{CoCO}_3$  готували шляхом внесення наважки порошків ( $2,5 \text{ г/дм}^3$ ) у водні розчини TRITON X-100 різної концентрації в межах від  $1,6 \cdot 10^{-4}$  моль/л до  $3,2 \cdot 10^{-3}$  моль/л з наступним механічним перемішуванням суспензій протягом 2 годин. Розчини TRITON X-100 з відповідною концентрацією поверхнево-активної речовини готували розчиненням обрахованої кількості речовини у бідистильованій воді без додаткового очищення. Розміри первинних частинок порошків визначали електронномікроскопічно (прилад "Gemini DSM 289", Zeiss, Німеччина). Діаметр первинних частинок для  $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$  дорівнював  $5,2 \pm 0,2$  мкм, для  $\text{MnCO}_3$  –  $3,2 \pm 0,1$  мкм, для  $(\text{NiOH})_2\text{CO}_3$  –  $0,4 \pm 0,04$  мкм і для  $\text{CoCO}_3$  –  $0,2 \pm 0,02$  мкм.

Для вивчення колоїдно-хімічних властивостей суспензій використовували оптичний метод дослідження [8]. Оптичну густину суспензій визначали, використовуючи спектрофлюориметр СМ-2203 з довжиною хвилі 530 нм. Похибка експериментальних вимірів складала біля 1%. Дослідження проводили за температури  $298 \pm 1$  К.

Вплив концентрації TRITON X-100 на діаметр частинок в суспензіях досліджуваних порошків наведено на рис. 1.

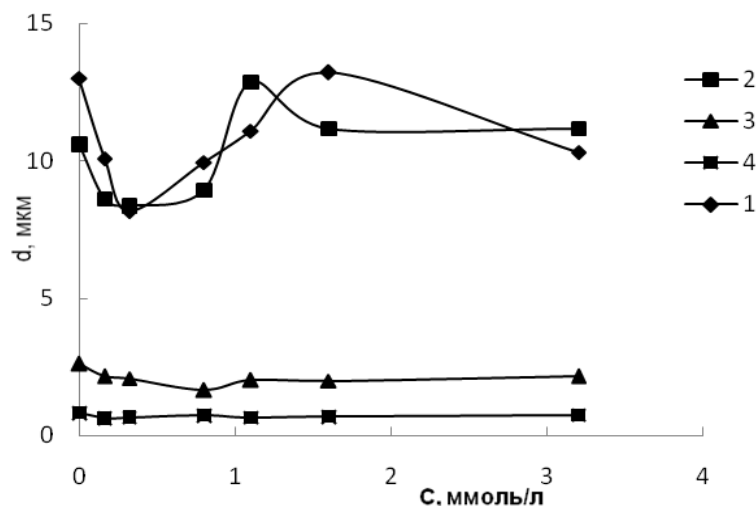


Рис. 1. Залежність діаметра частинок  $d$  від концентрації TRITON X-100 для: суспензій основного карбонату купруму (1), карбонату мангану (2), основного карбонату ніколу (3), карбонату кобальту (4).

Діаметри частинок, знайдені за результатами седиментаційного аналізу суспензій з вмістом твердої фази  $2,5 \text{ г/дм}^3$  у різних дисперсійних середовищах, подані в табл. 1. У цій таблиці також наведені результати електронномікроскопічного визначення розмірів частинок.

Високодисперсні порошки на повітрі, внаслідок дії далекосяжних поверхневих сил, знаходяться в агрегованому стані [9]. Порошки на повітрі утворюють зернисті структури з порами різних розмірів. Для зернистих структур з діаметром частинок  $d$  емпіричним шляхом встановлено, що середній радіус пор дорівнює  $d_0 = 0,42d$  [10], а результати комп'ютерного моделювання з врахуванням полідисперсності пор дають таке співвідношення  $d_0 = 0,255d$  [11].



Таблиця 1

**Діаметри частинок карбонатів металів у воді та водних розчинах TRITON X-100**

Порошок	Діаметри частинок (мкм) у рідких дисперсійних середовищах				Електронно-мікроскопічний діаметр частинок (мкм)
	вода	Розчин TRITON X-100 0,16 ммоль/л	Розчин TRITON X-100 0,32 ммоль/л	Розчин TRITON X-100 1,1 ммоль/л	
(CuOH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	13,0	10,1	8,2	11,1	5,2
MnCO <sub>3</sub>	10,6	8,6	8,4	12,9	3,2
(NiOH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2,6	2,2	2,1	2,0	0,4
CoCO <sub>3</sub>	0,82	0,62	0,66	0,64	0,2

Проведені нами дослідження підтверджують агрегованість порошків, адже діаметри частинок, знайдені електронно-мікроскопічним методом, є значно меншими за діаметри частинок у воді та розчинах неіоногенної ПАР. Це вказує на те, що знайдені седиментаційним методом діаметри частинок характеризують розміри агрегатів із первинних частинок.

Взаємодія рідини із пористими структурами розпочинається із змочування твердої поверхні, розтікання рідини по поверхні та її проникнення у пори. Тому, першою необхідною умовою самовільного проникнення рідини у пори під дією капілярних сил є змочування рідиною твердої поверхні, тобто кут змочування  $\theta < 90^\circ$  [12].

Тому, під час приготування суспензій у розчинах ПАР можуть проходити два одночасних процеси [13]:

- редиспергування порошків у розчинах ПАР, тобто руйнування агрегатів частинок, які існують на повітрі, в результаті змочування та дії зовнішньої механічної сили;
- адсорбція молекул ПАР на поверхні частинок, внаслідок якої може змінюватись характер міжчастинкової взаємодії і відбуватись стабілізація або флокуляція суспензій.

Внесення порошків основного карбонату купруму та карбонату мангану у розчини неіоногенної поверхнево-активної речовини з концентраціями, які нижчі критичної концентрації міцелоутворення (ККМ), сприяє покращенню агрегативної стійкості суспензій досліджуваних порошків. За літературними даними критична концентрація міцелоутворення для неіоногенної поверхнево-активної речовини TRITON X-100 перебуває в межах 0,24– 0,51 ммоль/л. Діаметр частинок основного карбонату купруму зменшується від 13 до 8,2 мкм, а діаметр частинок карбонату мангану – від 10,6 до 8,4 мкм. Після досягнення ККМ агрегативна стійкість порошків основного карбонату купруму та карбонату погіршується. Подальше підвищення концентрації поверхнево-активної речовини суттєво не впливає на колоїдно-хімічні властивості суспензій.

Вплив TRITON X-100 на агрегативну стійкість порошків основного карбонату ніколу та карбонату кобальту є незначним порівняно із суспензіями без внесення поверхнево-активної речовини.

Сукупний вплив ПАР на редиспергування порошків на обох стадіях приготування суспензій залежить від дисперсності порошків. Чим нижча дисперсність порошків, тим суттєвішим є вплив поверхнево-активних речовин на стійкість суспензій. Проведені дослідження показали, що для тонкодисперсних порошків (NiOH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CoCO<sub>3</sub> сукупний вплив ПАР на їхнє редиспергування є незначним.

Але поряд із редиспергуванням порошку в розчинах ПАР відбувається адсорбція молекул ПАР на твердій поверхні, яка може змінювати характер міжчастинкової взаємодії і зумовлювати широкий спектр дії ПАР на водні суспензії від стабілізації частинок до їхньої флокуляції. У разі повної стабілізації частинок внаслідок адсорбції ПАР фактично зберігається той ступінь редиспергування, який може бути досягнутим у першому процесі редиспергування. Флокуляція частинок внаслідок адсорбції ПАР практично повертає частинки у агрегований стан, який є подібним до стану порошків на повітрі. У реальних суспензіях дуже часто зустрічається проміжний стан між повною стабілізацією та флокуляцією, який характеризується суттєвою лабільністю (мінливістю).

Отже, сукупний вплив TRITON X-100 на редиспергування грубодисперсних порошків (CuOH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> та MnCO<sub>3</sub> є суттєвішим порівняно з порошками (NiOH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> та CoCO<sub>3</sub>.

Для визначення топологічної структури осадів визначали їхні седиментаційні об'єми, а середню щільність укладки частинок  $\varphi_0$  у них розраховували за формулою

$$\varphi_0 = \frac{m}{V_c \cdot \rho}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса порошку,  $\rho$  – густина речовини порошку,  $V_c$  – седиментаційний об'єм осадів порошоків із їхніх суспензій

Суспензії готували шляхом змішування 2 г порошку з 10 см<sup>3</sup> дисперсійного середовища різної хімічної природи з подальшим механічним перемішуванням протягом 2 годин. Седиментаційні об'єми формували у стандартних седиментаційних трубках. Заміри об'єму твердої фази робили після повного осідання частинок.

Одержані результати наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

**Щільність укладки частинок порошоків карбонатів металів на повітрі, воді та розчинах TRITON X-100**

Порошок	Щільність укладки частинок:				
	повітря	вода	Розчин TRITON X-100 0,16 ммоль/л	Розчин TRITON X-100 0,32 ммоль/л	Розчин TRITON X-100 1,1 ммоль/л
(CuOH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,50	0,47	0,49	0,51	0,46
MnCO <sub>3</sub>	0,40	0,38	0,43	0,42	0,42
(NiOH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,23	0,18	0,20	0,21	0,21
CoCO <sub>3</sub>	0,19	0,094	0,098	0,094	0,097

Щільність укладки частинок одержаних із суспензій на основі неіоногенної ПАР для основного карбонату ніколу та карбонату кобальту практично не залежить від концентрації. Ці зміни у щільності укладки частинок корелюють з впливом TRITON X-100 на агрегативну стійкість суспензій цих порошоків.

Для порошоків основного карбонату купруму та карбонату мангану підвищення концентрації TRITON X-100 до критичної концентрації міцелоутворення призводить до підвищення щільності седиментаційних осадів. Ці результати добре узгоджуються з емпіричним правилом: більш агрегативно стабільніші суспензії формують більш щільніші осадки [14].

**Висновки.** Проведені дослідження порошоків карбонатів металів показали, що на повітрі дані порошки є агрегованими, а знайдені седиментаційним методом діаметри частинок характеризують розміри агрегатів із первинних частинок.

Встановлено, що внесення порошоків основного карбонату купруму та карбонату мангану у розчини неіоногенної поверхнево-активної речовини з концентраціями, які нижчі критичної концентрації міцелоутворення (ККМ), сприяє покращенню агрегативної стійкості суспензій досліджуваних порошоків, а вплив TRITON X-100 на агрегативну стійкість порошоків основного карбонату ніколу та карбонату кобальту є незначним порівняно із суспензіями без внесення поверхнево-активної речовини. Щільність укладки частинок у седиментаційних осадах цих порошоків корелює із результатами дослідження агрегативної стійкості: для порошоків основного карбонату купруму та карбонату мангану підвищення концентрації TRITON X-100 міцелоутворення призводить до підвищення щільності седиментаційних осадів, а щільність укладки частинок одержаних із суспензій на основі неіоногенної ПАР для основного карбонату ніколу та карбонату кобальту практично не залежить від концентрації.

**Список використаних джерел:**

1. Bansal N.P. Handbook of Ceramic Composites. – Berlin/New York: Springer-Verlag, 2005. – 398 p.
2. Masuda H Powder Technology Handbook. – N.Y. : CRC Press, 2006. – 889 p.
3. M.E. Fayed, L. Otten, Handbook of Powder Science and Technology, Chapman & Hall, London, 1997. – 914 p.
4. Rahaman M. N. Ceramic Processing. – N.Y. : CRC Press, 2006. – 480 p.
5. Russel W. B., Saville D.A., Showalter W.R. Colloidal Dispersions. – London : Cambridge Univ. Press, 1989. – 148 p.

6. Болтачев Г.Ш., Волков Н.Б. Моделирование процесса компактирования нанопорошков в рамках гранулярной динамики // Журн. техн. физики. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 18–29.
7. Скороход В. В. Солонин Ю. М., Уварова И. В. Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов.– К. : Наук. думка, 1990. – 280 с.
8. Ходаков Т.С., Юдкин Ю.П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
9. Z.M. Yaremko, N.H. Tkachenko, C. Bellmann and A. Pich, Redispergation of TiO<sub>2</sub> particles in aqueous solutions // J. Colloid and Interface Sci. – 2006. – Vol. 296. – № 2. – P. 565–571.
10. Крючков Ю.Н. Параметры пористой структуры проницаемых материалов. 2. Моно- и полидисперсные материалы // Коллоидн. журн. – 1998. – Т. 60. – С. 357–360.
11. Ronault Y., Assouline S.A. Probabilistic approach towards modeling the relationships between particle and pore size distributions: the multicomponent packed sphere case // Powder Technology. – 1999. – Vol. 96. – P.33–41.
12. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
13. Муллер В.М., Сергеева И. П., Чураев Н. В. Адсорбция ионогенных ПАВ на заряженной поверхности: две модели // Коллоидн. журн. – 1995. – Т. 57, № 3. – С. 368–371.
14. Кройт Г.Р. Наука о коллоидах. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 540 с.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2018

УДК 004.942+656.052.1

**П.К. Ніколюк<sup>1</sup>, В.Ф. Комаров<sup>1</sup>, П.П. Ніколюк<sup>2</sup>**  
 Донецький національний університет імені Василя Стуса<sup>1</sup>  
 Вінницький національний технічний університет<sup>2</sup>  
**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПЕРЕХРЕСТЯ**

*Базовим елементом у технології регулювання міського трафіку являється перехрестя. Саме цей об'єкт, де перетинаються міські дороги, є і основною причиною а також і джерелом заторів. Тому першочергово необхідно здійснити інтелектуальну регуляцію проїзду транспортних засобів (ТЗ) через окреме перехрестя. Таке регулювання здійснюється з допомогою комп'ютерної програми, що враховує завантаженість напрямків на перехресті та здійснює відповідну корекцію протяжності фаз горіння червоного та зеленого світла.*

*Ключові слова:* розумне перехрестя, п'єзокристалічний датчик, зв'язані ТЗ, цикл роботи світлофора.

**П.К. Николюк, В.Ф. Комаров, П.П. Николюк**  
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПЕРЕХРЕСТОК**

*Базовым элементом в технологии регулирования городского трафика является перекресток. Именно этот объект, где пересекаются городские дороги, есть и основной причиной а также и источником пробок. Поэтому в первую очередь необходимо осуществить интеллектуальную регуляцию проезда транспортных средств (ТС) через отдельный перекресток. Такое регулирование осуществляется с помощью компьютерной программы, которая учитывает загруженность направлений на перекрестке и осуществляет соответствующую коррекцию протяженности фаз горения красного и зеленого света.*

*Ключевые слова:* разумный перекресток, пьезокристаллический датчик, связанные ТС, цикл работы светофора.

**P.K. Nikolyyuk, V. Komarov, P.P. Nikolyyuk**  
**INTELLIGENT CROSSROAD**

*The technology of such intellectual regulation of traffic in the big city, in which the rewillbeno traffic jams, is presented. It is proposed to solve the problem of traffic by controlling the regulation of traffic flow sat a separatein tersection and with in the entire metro polis. The choice of most optimal route is based on a monitoring the situation with traffic in the mode of constant control and correction of the route of eachvehicle, whic horders the route to the central office of traffic management (COTM).*

*The basic element in the technology of urban traffic regulation is the intersection. It is this object, where the city roads intersect, is the main reason as well as the source of traffic jams. Therefore, first of all, it is necessary to carry out an intelligent regulation of the passage of vehicles (TS) through a separate intersection. Such regulation is carried out by a computer program which takes into account congestion directions at the crossroads, and performs a correction length corresponding combustion phases red and green light.*

*Keywords:* intelligent crossroad, piezoelectricsensor, connected hicles, traffic light cycle.

**Постановка проблеми.** Дане дослідження є продовженням та уточненням робіт [1] та [2], що розглядають проблему трафіку у великому місті. В першу чергу така проблема пов'язана із заторами на перехрестях і, як наслідок, складністю проїзду кожного ТЗ по вибраному маршруту. З метою запобігання такого явища автори пропонують застосувати мережу «розумних» світлофорів; причому датчики сусідніх світлофорів взаємодіють між собою. Така взаємодія фактично означає, що не тільки світлофори знаходяться під контролем центрального пункту керування трафіком (ЦПКТ), а і ділянки дороги між сусідніми перехрестями. Таким чином з'являється можливість контролювати маршрути всіх ТЗ на дорогах міста. Детально ситуація щодо прокладання маршрутів для кожного ТЗ описана в роботі [2]. Виходячи із всього вищесказаного головна проблема, що вирішуватиметься в даній роботі полягає у поєднанні алгоритмів регулювання руху ТЗ як через окреме перехрестя, так і по всьому місту. Головний акцент приділяється алгоритму регулювання трафіку через окреме перехрестя.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Базовою проблемою регулювання дорожнього руху у мегаполісі є проблема оптимізації проїзду ТЗ через кожне окреме перехрестя. Саме на перехрестях виникають затори. Організувавши ефективний рух через такий об'єкт, досягнемо високої ефективності трафіку по всьому місту. Для організації проїзду ТЗ необхідно їх реєструвати. Причому способів реєстрації є багато [1]. Для вирішення нашої проблеми найбільш ефективним способом такої реєстрації є спосіб на основі п'єзокристалічних датчиків, вмонтованих в полотно дороги.

Компанія International Road Dynamics Inc. розробила досить ефективну конструкцію п'єзоелектричного датчика дорожнього руху Road Trax BL [3,4]. Чутливі елементи апарату легко монтуються в дорожнє полотно. Чутливість пристрою досить висока – не менше 250 мВ. При наїзді колісної пари на зону розташування датчика вихідний сигнал вказаної величини достатній

для реєстрації. Існує понад 10 видів та способів реєстрації рухомих ТЗ. По фізичному принципу дії типу датчики дорожнього руху поділяються на такі види [5]:

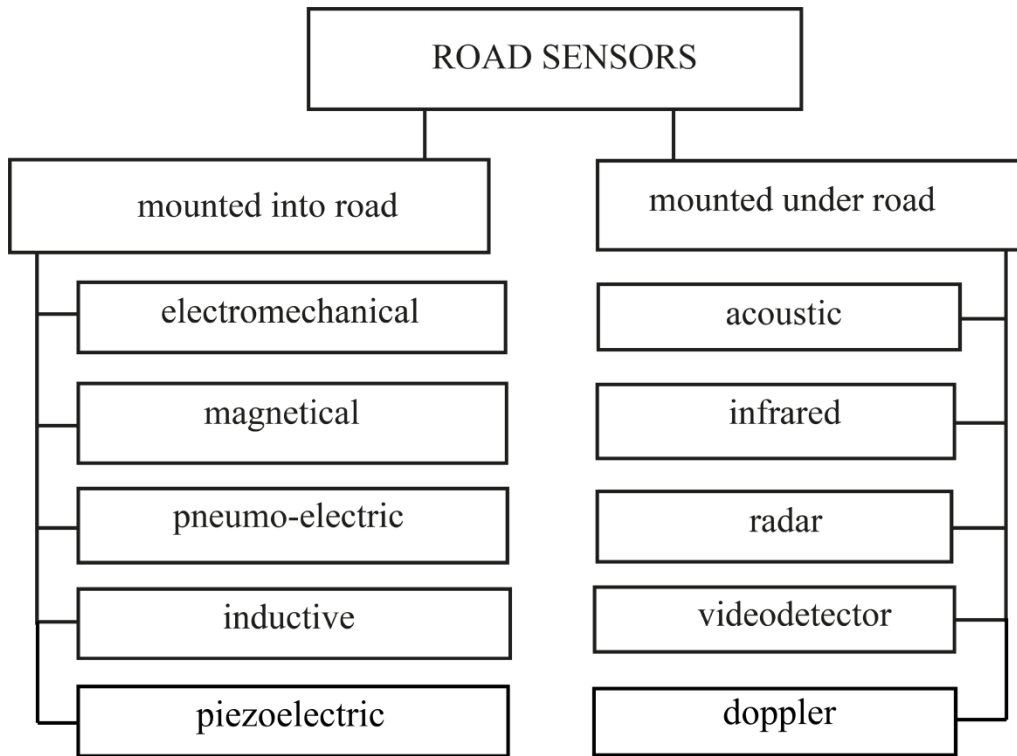


Рис.1. Класифікація датчиків дорожнього руху згідно дослідження [5].

Найбільш придатними для вирішення поставленої в нашій роботі задачі є датчики, що монтується в дорожнє полотно, а серед цієї групи п'єзокристалічні та індуктивні. Зауважимо, що п'єзоелектричні датчики є більш чутливі, чим індуктивні. Саме тому автори зупинились на високочутливих і ефективних п'єзокристалічних датчиках. В дослідженні [5] приведені технічні характеристики п'єзокристалічного датчика іншої конструкції типу 12-DOF. Це високоякісний високочутливий датчик, реєструючий величини тисків в широкому діапазоні величин. Пристрій працює в частотному діапазоні в околі частоти 11кГц з похибкою не більше 1%.

Теоретичні аспекти оптимізації трафіку на окремому перевантаженому ТЗ перехресті досліджені в роботі [6,7]. Тут розглядається так звана дискретно-часова модель (discrete-time model) для хрестоподібного перехрестя, що записується у вигляді системи рівнянь наступного виду:

$$J_D = \sum_{k=0}^N [q_1(k) + q_2(k)] + \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot T \cdot \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$q_1(k+1) \geq \max\{q_1(k) + d_1 \cdot T \cdot (u(k) - u_L), a_1 \cdot T(1 - u(k))\} \quad (2)$$

$$q_2(k+1) \geq \max\{q_2(k) + d_2 \cdot T(u_H - u(k)), 0\} \quad (3)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \quad (4)$$

$$q_i(0) = q_{i,\text{int}}, i = 1, 2; N = 0, 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

В приведених рівняннях фігурують такі змінні:

$J_D$  – модельна величина, що являє собою число ТЗ на перевантаженому перехресті, що не перетнули його (total delay);

$N$  – число циклів перемикання світлофора;

$k$  – нумератор циклів;

$q_1(k), q_2(k)$  – число ТЗ на перехресті в  $k$ -му циклі переключення світлофора відповідно на горизонтальному та вертикальному напрямках хрестоподібного перехрестя;

$a_1, a_2$  – число ТЗ, що прибули за одиницю часу відповідно на горизонтальний та вертикальний напрямки;

$T$  період перемикання світлофору (цикл роботи);

$u(k)$  – відношення величини фази горіння зеленого світла до аналогічної величини для червоної фази;

$d_1, d_2$  – число ТЗ, що перетнули перехрестя за одиницю часу;

$u_H = 1 - a_2/d_2, u_L = a_1/d_1$ ;

$u_{\min}, u_{\max}$  – відповідно мінімальне та максимальне значення  $u(k)$ ;

$q_{i,\text{int}}$  – початкова величина ТЗ на перехресті для горизонтального ( $i = 1$ ) та вертикального напрямків ( $i = 2$ ).

Цільова функція системи рівнянь (1)-(5) виражається виразом (1) і являє собою число ТЗ, що не перетнули перехрестя. Зрозуміло, що таку величину треба мінімізувати. Шуканими змінними є величини  $u(k)$ . Рівняння (2) і (3) представляють еволюцію з часом обох автомобільних черг. Рівняння (4) дає верхню і нижню границі  $u(k)$  в кожному циклі. Рівняння (5) представляє стартові (початкові) довжини автомобільних черг на перехресті. Загалом система рівнянь (1)-(5) являє собою задачу лінійного програмування. Графічний розв'язок цієї задачі представлений на рис.2.

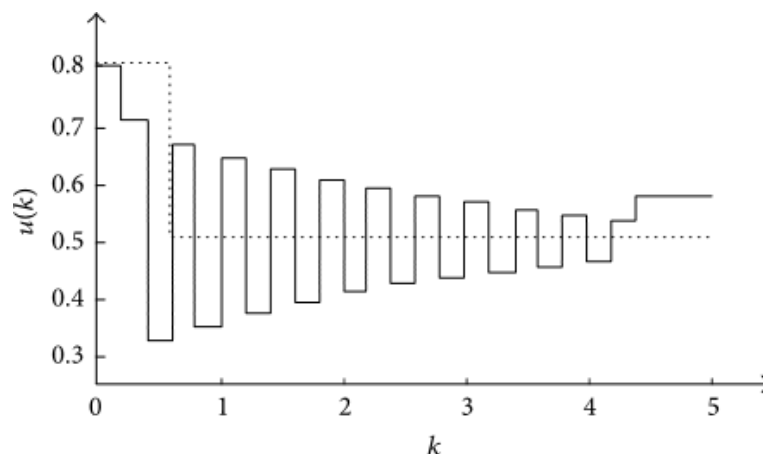


Рис. 2. Розв'язок системи рівнянь (1)–(5): суцільна лінія – точний розв'язок; точкова – наближений [7].

Дослідження методів синтезованої інформації, отримуваної із різноманітних джерел, таких як датчики, детектори, відеокамери і радары проведено в роботі [9]. Тут розглядається технологія зв'язаних ТЗ (connected vehicles), яка дає можливість збирати та аналізувати зв'язки типу «ТЗ – Інфраструктура» (V2I) та «ТЗ – ТЗ» (V2V). Зв'язки такого типу дають можливість зменшити імовірність заторів, збільшити безпеку руху та зменшити витрати палива.

На рис.2 зображена схема взаємодії автомобілів, що проїжджають перехрестя, із придорожною інфраструктурою. Система передачі даних OBU забезпечує V2X комунікацію, тобто взаємодію автомобілів з придорожною інфраструктурою.

**Постановка завдань.** З аналітичної сторони необхідно створити алгоритм та комп'ютерну програму, що забезпечують ефективне перемикання світлофорних фаз у відповідності із завантаженістю дорожніх напрямків. З технічного боку реєстрація ТЗ здійснюється з допомогою п'єзокристалічних датчиків, які фіксують число колісних пар, пропорційне числу ТЗ, що або в'їжджають на проїзну частину дороги між сусідніми перехрестями (так звані вхідні датчики) або виїжджають із цієї ділянки дороги – вихідні датчики.

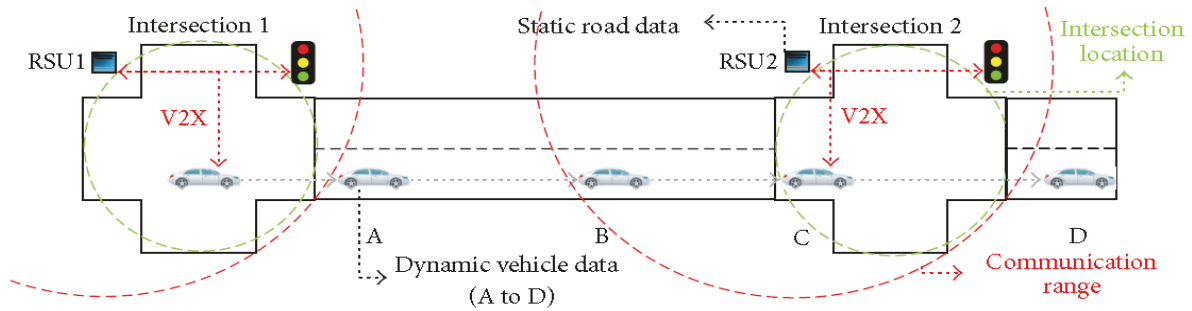


Рис. 3. Технологія зв'язаних автомобілів (CV), де RSU – Road Side Unit, тобто прикордоння комірка, яка взаємодіє як із світлофором, так і з автомобілем.

Діапазон взаємодії CV із RSU зображений у вигляді колової траєкторії [8]. На автомобілях встановлена система передачі даних OBU (On Board Unit).

При цьому вхідні та вихідні датчики на сусідніх перехрестях працюють сумісно. Це дозволяє контролювати не тільки міські перехрестя як автономні об'єкти, а також і всі міські траси.

#### Викладення основного матеріалу

Реєстрація ТЗ, перетинаючих перехрестя, організована наступним чином (рис.4).

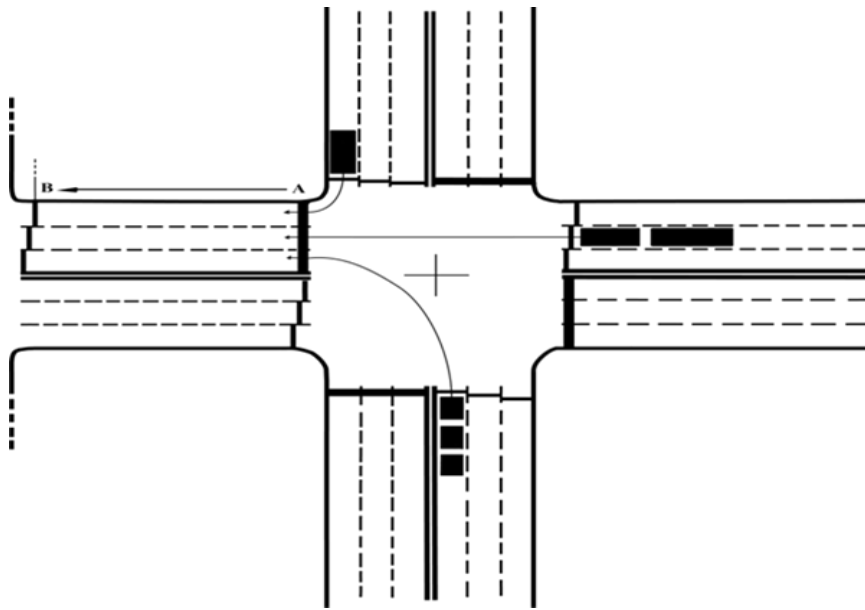


Рис. 4. Перехрестя А, з'єднане з сусіднім перехрестям В [1].

Чорними прямокутниками зображені ТЗ, маршрути яких пролягають в напрямку  $A \rightarrow B$ . Показані також вхідні (чорна смужка, позначена літерою А) та вихідні датчики (три рядом розташовані смужки, позначені літерою В). Кожен вхідний та вихідний датчики з'єднані з ЦПКТ (на рисунку зображений лише один такий сигнальний провід, що виходить від одного із датчиків В – це суцільна лінія, що переходить в пунктирну).

Зауважимо, що зображена на рис.4 зліва ділянка дороги  $A \rightarrow B$  між сусідніми перехрестями дозволяє контролювати всю транспортну мережу міста, адже тут представлена ділянка дороги між сусідніми перехрестями, що знаходиться під контролем вхідних та вихідних датчиків. Іншими словами, кожне перехрестя працює не автономно, а у тісній взаємодії із сусідніми перехрестями. Така взаємодія здійснюється за рахунок того, що вхідні та вихідні датчики (рис. 4) працюють в парі – як один елемент. За рахунок цього можливо прослідкувати за динамікою руху ТЗ вздовж ділянки дороги  $A \rightarrow B$ . На якісному рівні динаміка руху в даному разі обумовлена

співвідношенням між величиною ТЗ, що в'їхали за певний час (наприклад, за час, рівний циклу переключення світлофора) та виїхали із даної ділянки дороги. Технічно процес організований наступним чином: датчик А (вхідний датчик) реєструє автомобілі, які в'їжджають на ділянку дороги АВ з усіх можливих напрямків перехрестя А.В свою чергу комплекс вихідних датчиків на перехресті В реєструє автомобілі, що виїхали за межі цієї ділянки.

Фактично наявність вхідних та вихідних датчиків дозволяє сформувати запис виду

$$\sum_{h=1}^f (N_{A_h B_h} / n_{A_h B_h}) l_{A_h B_h} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Тут  $h$  – індекс, що позначає смуги руху вздовж маршруту, що зчеплені між собою та утворюють нерозривну траєкторію. Символ  $f$  означає число смуг виду  $A_h B_h$ , які формують прокладений маршрут.  $N_{A_h B_h}$  – число автомобілів, що в'їжджають на ділянку дороги  $A \rightarrow B$  між сусідніми перехрестями, а  $n_{A_h B_h}$  – відповідно число автомобілів, що виїжджають із цієї ділянки дороги та реєструються тріадою вихідних датчиків (рис.4). Величина  $l_{A_h B_h}$  являє собою просто геометричну довжину дороги між сусідніми перехрестями.

Отже, в основі всієї технології регулювання трафіку як вихідна комірка слугує окреме регульоване перехрестя. Вважатимемо, що цикл роботи цього світлофора – це величина, що, як правило, складається з таких складових

$$T = trh + tgh + tyh + tp, \quad (7)$$

де  $trh$  – час червоного світла у горизонтальному напрямку;

$tgh$  – час горіння зеленого світла у горизонтальному напрямку;

$tyh$  – час горіння жовтого світла також у горизонтальному напрямку;

$tp$  – час горіння зеленого світла для пішоходів.

Таке саме співвідношення можна записати по відношенню до вертикального напрямку перехрестя, тобто

$$T = trv + tgv + tyv + tp, \quad (8)$$

де  $trv$  – час червоного світла у вертикальному напрямку;

$tgv$  – час горіння зеленого світла у вертикальному напрямку;

$tyv$  – час горіння жовтого світла так само у вертикальному напрямку;

$tp$  – час горіння зеленого світла для пішоходів.

Зауважимо, що важливим чинником покращення надійності та достовірності даних, отримуваних на основі аналізу результатів вхідних та вихідних датчиків, є інформація, передана GPS-пристроями. Справа в тому, що майже кожен водій працює якщо не з GPS-навігатором, то із мобільним телефоном чи смартфоном з програмою Google-карт. Це дозволяє використати GPS-дані в якості додаткового джерела інформації. Описана ситуація детально розглядається в роботах [10-14]. Важливо зауважити, що GPS-дані не дають точної інформації. Але для нашої задачі такі дані важливі як допоміжний показник щодо інтерпретації даних, отримуваних від дорожніх датчиків. В цьому відношенні з урахуванням специфіки поставленої в роботі задачі, статистичний характер GPS-даних цілком прийнятний і немає необхідності точно визначати положення кожного ТЗ: важливим є лише спектр таких, отримуваних з певною долею достовірності. Чому важливо поєднати дані, отримувані із п'єзокристаличних датчиків, з GPS-даними? Справа в тому, що основну роль в нашій програмі відіграють саме дані, отримувані із датчиків – вхідних та вихідних, – розташованих між сусідніми перехрестями. З іншого боку, програма передбачає використання водіями GPS-навігаторів. Тому цілком логічно використати GPS-інформацію в повній мірі. На доцільність поєднання стаціонарних даних та мобільних, отримуваних із GPS-пристроїв чи смартфонів, вказується, зокрема, і в роботі [15]. Подібний алгоритм використання GPS-даних для прокладання оптимальних маршрутів детально розглядається також в дослідженні [16]. Тут використовуються набори GPS-даних, що характеризуються географічною широтою, довготою та часовим маркером. GPS-точки в даній роботі генеруються з певною вибраною частотою імітатором і на основі них прокладається оптимальний маршрут а також обраховується середня швидкість кожного ТЗ.



Тепер представимо сам алгоритм регулювання трафіку на окремому перехресті, в якому використані змінні, описані під формулами (7) та (8). З використанням приведених змінних програму регуляції трафіку можна записати у наступному вигляді:

```

package IC;
import java.util.Random;
package IC;
import java.util. Random;
import static java.lang.StrictMath.abs;
interface Lights{
intREDH =0;
intYELLOWH =1;
intGREENH =2;
intREDV =3;
intYELLOWV =4;
intGREENV =5;
intGREENP = 6;
intERROR = -1;
}
class T implements Lights {
private int delay;
private static int light = REDH;
T(intsec) {
delay = 1000 * sec;
}
public int shift() {
int count = (light++) % 7;
try {
switch (count) {
case REDH:
Thread. Sleep (delay);
break;
case YELLOWH:
Thread. Sleep (delay / 3);
break;
case GREENH:
Thread. Sleep (delay / 2);
break;
case REDV:
Thread. Sleep (delay);
break;
case YELLOWV:
Thread. Sleep (delay / 3);
break;
case GREENV:
Thread. Sleep (delay / 2);
break;
case GREENP:
Thread. Sleep (delay );
break;
}
} catch (Exception e) {
return ERROR;
}
return count;
} }
class Traffic Regulator {
static int T = 96;

```

```

private static T t = new T(1);
static Random gn1 = new Random();
static Random gn2 = new Random();
static Random gn3 = new Random();
static Random gn4 = new Random();
Traffic Regulator() {
}
public static void main(String[] args) {
double k = Math.abs((gn1.nextDouble() + gn2.nextDouble()) /
    (gn3.nextDouble() + gn4.nextDouble()));
double tg = 35.0;
double tp = 23.0;
double tyh = 2.0;
double tgh = k * tg;
double trh = (double)T -tyh-tgh-tp;
double tgv = abs(2.0 * tg-tgh);
double trv = (double)T -trh;
int tyv = 2;
for(int j = 0; j < 7; ++j) {
switch(t.shift()) {
case -1:
System.out.println("Time error!");
break;
case 0:
System.out.println("red horizontal!");
System.out.format("%.1f%n", trh);
break;
case 1:
System.out.println("yellow horizontal!");
System.out.println(tyh);
break;
case 2:
System.out.println("green horizontal!");
System.out.format("%.1f%n", tgh);
break;
case 3:
System.out.println("red vertical!");
System.out.format("%.1f%n", trv);
break;
case 4:
System.out.println("yellow vertical!");
System.out.println(tyv);
break;
case 5:
System.out.println("green vertical!");
System.out.format("%.1f%n", tgv);
break;
case Lights.GREENP:
System.out.println("green pedestrian!");
System.out.println(tgp);
break;
default:
System.err.println("Unknown light.");
return;
}}}}

```

В результаті роботи програми отримуємо:

red horizontal!  
29,6  
yellow horizontal!  
2.0  
green horizontal!  
41,4  
red vertical!  
66,4  
yellow vertical!  
2  
green vertical!  
28,6  
green pedestrian!  
23.0  
Process finished with exitcode 0.

Зупинимось коротко на аналізі даної програми, яка регулює проїзд ТЗ через хрестоподібне перехрестя. В якості констант вибираються величини типу  $REDH = 0$  – червоне світло в горизонтальному напрямку. Принципово те, що програма аналізує завантаженість ТЗ напрямків перехрестя: чим більше завантажений напрямок – горизонтальний чи вертикальний – тим більше горітиме зелене світло у відповідному напрямку, звичайно в межах періоду перемикання світлофора, який в даному разі вибраний рівним 96 с. З метою імітації реальної ситуації на перехресті, в програмі включено чотири генератори випадкових величин, що імітують завантаженість перехрестя ТЗ. Власне, нас цікавить відношення числа автомобілів, що розташовані на горизонтальному та вертикальному напрямках. В програмі таке відношення задається величиною коефіцієнта  $k$ . Варіація величини  $k$  імітує якраз відношення у змінах завантажених. Тому спектр чисел на виході програми щораз змінюється випадковим чином, моделюючи реальну динаміку трафіку на перехрестях міст. Змінюються, зокрема, величини, що задають час горіння зеленого світла у горизонтальному та вертикальному напрямках.

Отже, презентована програма дає можливість суттєво покращити пропускну здатність перехрестя завдяки «розумному» режиму їх роботи в плані протяжності горіння різних фаз.

**Висновки.** Цікаве висловлення приведене в роботі [10]. Приведемо його дослівно: «However, to the best of our knowledge, no research has been conducted to apply deep learning the way into large-scale transport at ionnetwork modeling and analysis.» В перекладі даний вираз звучить так: «Однак, наскільки нам відомо, не проводилось ніякого дослідження з метою застосування теорії в моделюванні та аналізі широкомасштабної транспортної мережі». Ми в певній мірі усунули цей недолік. Робота носить практичний характер, а її результати можуть бути використані на реальних міських перехрестях з метою покращення умов проїзду як через окреме перехрестя, так і через все місто.

### Список використаних джерел

1. Богуто Д.Г., Волинець В.І, Ніколюк П.К., Ніколюк П.П. Автоматизована система керування рухом транспортних засобів в межах міста / Д.Г. Богуто, В.І. Волинець, П.К. Ніколюк, П.П. Ніколюк // Вісник Харківського університету, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління».– 2017.– №5. – С. 3-9.
2. Богуто Д.Г., Комаров В.Ф., Ніколюк П.К., Ніколюк П.П. Інтелектуальний алгоритм управління міським трафіком/ Д.Г. Богуто, В.Ф. Комаров, П.К. Ніколюк, П.П. Ніколюк // Вісник Харківського університету, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2018.– №38. – С. 46-54.
3. Piezoelectric RoadTrax BL - International Road Dynamics, Inc.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.irdinc.com/sensors/piezoelectric-roadtrax-bl.html](http://www.irdinc.com/sensors/piezoelectric-roadtrax-bl.html).
4. Датчики дорожнього движения – Студопедия. [Електронний ресурс].– Режим доступу:[https://studopedia.ru/7\\_31480\\_datchiki-dorozhnogo-dvizheniya.html](https://studopedia.ru/7_31480_datchiki-dorozhnogo-dvizheniya.html).
5. Jun Liu, Chuan-Wei Liang, Min Li, KeJian, Lan Qin, and Jing-Cheng Liu. Principle Research on a Novel Piezoelectric 12-DOF Force/Acceleration Sensor/Liu Jun , Liang Chuan-Wei, Li Min, JianKe, Qin Lan, and Liu Jing-heng//Journal of Sensors.–V.2017. – Article ID 2836365. –16 pages.
6. YingfengCai, Ze Liu, Xiaoqiang Sun, Long Chen, Hai Wang, and Yong Zhang.Vehicle Detection Based on Deep Dual-Vehicle Deformable Part Models/ CaiYingfeng, Liu Ze, Sun Xiaoqiang, Chen Long, Wang Hai, and Zhang Yong //Journal of Sensors. – Volume 2017. – Article ID 5627281. – 10 pages.

7. Jiyuan Tan, Xiangyun Shi, Zhiheng Li, Kaidi Yang, Na Xie, Haiyang Yu, Li Wang, Zhengxi Li. Continuous and Discrete-Time Optimal Controls for an Isolated Signalized Intersection/ Tan Jiyuan, Shi Xiangyun, Li Zhiheng, Yang Kaidi, Xie Na, Yu Haiyang, Wang Li, Li Zhengxi // Journal of Sensors. – Volume 2017. – Article ID 6290248. – 11 pages.
8. Ilya Ioslovich, Jack Haddad, Per-Olof Gutman, David Mahalel. Optimal traffic control synthesis for an isolated intersection/ Ilya Ioslovich, Jack Haddad, Per-Olof Gutman, David Mahalel // Control Engineering Practice. – 2011. – V. 19. – Is. 8. – P. 900-911.
9. Pang-wei Wang, Hong-bin Yu, Lin Xiao, Li Wang. Online Traffic Condition Evaluation Method for Connected Vehicles Based on Multisource Data Fusion/ Wang Pang-wei, Yu Hong-bin, Xiao Lin, Wang Li // Journal of Sensors. – Volume 2017. – Article ID 7248189. – 11 pages.
10. Mohammed Quddu, Simon Washington. Shortest path and vehicle trajectory aided map-matching for low frequency GPS data/ Quddu Mohammed, Washington Simon // Transportation Research Part C. – 2015. – V. 55. – P. 328-339.
11. Sina Dabiri, Kevin Heaslip. Inferring transportation modes from GPS trajectories using a convolutional neural network/ Dabiri Sina, Heaslip Kevin // Transportation Research Part C. – V. 86. – 2018. – P. 360-37.
12. Feilong Wang, Cynthia Chen. On data processing required to derive mobility patterns from passively-generated mobile phone data/ Wang Feilong, Chen Cynthia // Transportation Research Part C. – V. 87. – 2018. – P. 58-74.
13. X. Ma, H. Yu, Y. Wang, Y. Wang, and J. Gomez-Gardenes. Large-scale transportation network congestion evolution prediction using deep learning theory. Ma X., Yu H., Wang Y., Wang Y., Gomez-Gardenes J. // PLoS ONE. – 2015. – V. 10. – №3. – Article ID e0119044. – 17 p.
14. Mahdi Hashemi, Hassan A. Karimi. A weight-based map-matching algorithm for vehicle navigation in complex urban networks/ Hashemi Mahdi, Karimi A. Hassan // J. of Intel. Transp. Systems. – 2016. – V. 20. – Is. 6. – P. 45-76.
15. Mahmood Rahmani, Eric Jenelius, Harilaos N. Koutsopoulos. Floating car and camera data fusion for non-parametric route travel time estimation/ Rahmani Mahmood, Jenelius Eric, Koutsopoulos N. Harilaos // Procedia Comp. Science. – 2014. – V. 37. – P. 390-395.
16. Masoud Fadaei Oshyaniv, Marcus Sundberg, Anders Karlström. Consistently estimating link speed using sparse GPS data with measured errors/ Masoud Fadaei Oshyaniv, Marcus Sundberg, Anders Karlström // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2014. – V. 111. – P. 829-838.

**Рецензенти:**

**Крижановський Володимир Григорович**, д.т.н., професор кафедри радіофізики та кібербезпеки Донецького національного університету імені Василя Стуса

**Бісікало Олег Володимирович**, д.т.н., професор, декан факультету комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018

УДК 621.865.8

**Б.М. Палій***студент магістратури професійного спрямування кафедри технічної кібернетики НТУУ "КПІ"***АНТРОПОМОРФНИЙ ПНЕВМАТИЧНИЙ ЗАХВАТ З МОЖЛИВІСТЮ 3D РУХУ ПАЛЬЦІВ**

*Об'єктом дослідження є захвати промислових роботів, а саме антропоморфні, або людиноподібні, зокрема модульні механічні антропоморфні захвати, котрим було приділено основну увагу. У статті зроблено огляд можливої конфігурації (кількості та розташування пальців). Метою роботи є структурний синтез та структурно-кінематичний аналіз механізмів пневматичного антропоморфного захвату. Для досягнення мети пропонується використання класичних відомих методів, розповсюджених в теорії механізмів, але адаптованих відповідно до поставлених задач.*

*Ключові слова: антропоморфних захватний пристрій, модульний захватний пристрій, структурний аналіз, кінематичний аналіз, функціональне моделювання, віртуальне моделювання.*

Форм. 19, Рис. 5, Літ. 5

**Б.Н. Палій***студент магістратури професійної направленності кафедри технічної кібернетики**НТУУ "КПІ"***АНТРОПОМОРФНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ 3D ДВИЖЕНИЯ ПАЛЬЦЕВ**

*Объектом исследования являются захваты промышленных роботов, а именно антропоморфные, или человекообразные, в частности модульные механические антропоморфные захваты, которым было уделено основное внимание. В статье сделан обзор возможной конфигурации (количества и расположения пальцев). Целью работы является структурный синтез и структурно-кинематический анализ механизмов пневматического антропоморфного захвата. Для достижения цели предлагается использование классических известных методов, распространенных в теории механизмов, но адаптированных соответствии с поставленными задачами.*

*Ключевые слова: антропоморфное захватное устройство, модульное захватное устройство, структурный анализ, кинематический анализ, функциональное моделирование, виртуальное моделирование.*

Форм. 19, Рис. 5, Лит. 5

**B. Palii***student for professional-directed master degree, Department of Technical Cybernetics NTUU "KPI"***ANTROPOMORPHIC PNEUMATIC ENGAGEMENT WITH THE POSSIBILITY OF 3D FINGER MOTION**

*The object of the study are grips of industrial robots, namely anthropomorphic or humanoid, in particular modular mechanical anthropomorphic grips, which have been in the focus of attention. The article gives an overview of the possible configuration (number and location of fingers). The aim of the work is structural synthesis and structural and kinematic analysis of the mechanisms of pneumatic anthropomorphic grip. To achieve the goal, it is proposed to use the classical known methods, which are common in the theory of mechanisms, but are adapted in accordance with the tasks set.*

*Key words: anthropomorphic gripping device, module gripping device, structural analysis, kinematic analysis, functional modeling, virtual modeling.*

Form. 19, Pic. 5, Lit. 5

**Вступ**

В області робототехніки останнє десятиліття відзначено стійким зростанням інтересу до створення людиноподібних (антропоморфних) роботів. Інтерес цей пов'язаний перш за все з тенденцією створення безлюдних технологій з елементами штучного інтелекту як в цивільній, так і промисловій областях, а також персонального робота – партнера людини. Найбільших успіхів у цьому напрямку досягли фірми Японії. Їх багаторічна цілеспрямована робота дозволила створити ряд зразків роботів з вражаючими характеристиками і можливостями.

**Аналіз досліджень і публікацій**

Системи захвату такого штучного інтелекту – це складні мехатронні системи, використовувані роботами, особливо промисловими, в цілях фіксації різних частин об'єктів, подальшого їх просторового закріплення і перенесення їх від початкової координатної точки до кінцевої, шляхом роботизованої дії або технологічного процесу. Згідно типу стискального зусилля, системи захвату можна класифікувати як системи механічні, вакуумні та магнітні [5].

Механічні системи захвату також відомі як двосторонні системи, тому що захват виконується з використанням принаймні двох протилежних зусиль, що надаються на стискаєму частину об'єкта.

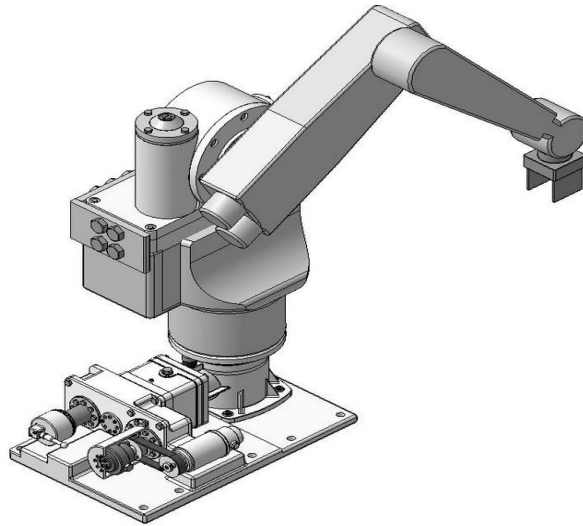


Рис. 1. – Схема промислового робота з антропоморфною механічною системою захвату [1]

У даних систем головним компонентом виступає механічна структура, яка забезпечує безпосередній контакт елементів від частини до частини і збільшує в разі необхідності зусилля захвату, яке необхідно для забезпечення стабільного контакту.

Згідно конструктивним особливостям механічні системи можна градуювати по основним типам механічних пристосувань для захвату: щелепи, пальці (антропоморфні) або щупальці.

В наш час, для промислових роботів використовуються в основному механічні захватні системи з щелепами, однак антропоморфні системи стають все більш популярними: перші – для простої механічної обробки фасонних частин, а другі – для мікро-обробки складних фасонних частин.

Наприклад, у механізмах протезів найчастіше використовуються кінематичні елементи з чотирма ступенями свободи. Вони знайшли своє втілення, в першу чергу, в конструкції пальців. Для іншої частини механізму, в доповнення до згаданих елементів – загальної кінематичної передачі (шестерні, кулачки), зазвичай використовуються механічні коробки передач.

Особливості оптимізації елементів та сполук, що використовуються в захватному промислового роботі, при зчепленні антропоморфних механізмів, впливають із їх структурних особливостей і конструкції – числа пальців, а, так само, кількості і відносного розташування фаланг – фаланг може бути і більше трьох, однак вони повинні бути дуже гнучкими, пружними, з подібними або навіть ідентичними формами фалангам пальців людини. Отримані результати часто використовуються для оптимізації дизайну.

При деталюванні антропоморфних пристроїв прийняття різних структурних форм не обмежене.

Розмір моделі руки передбачена, як для механізмів протезів. Фаланги пальців можуть взагалі мати однаковий розмір або форму, пропорційні розміру або формі пальців рук. Розташування пальців може бути подібно людській руці; пальці можуть бути розміщені в одній площині або в різних площинах. Відносно положення, в залежності від кількості пальців (але не менше двох), необхідно вибирати так, щоб їх просторове охоплення було максимальним. Кілька можливих версій відносного позиціонування пальців представлено на рисунку 2, з якого видно можливі варіанти 3D компонування.

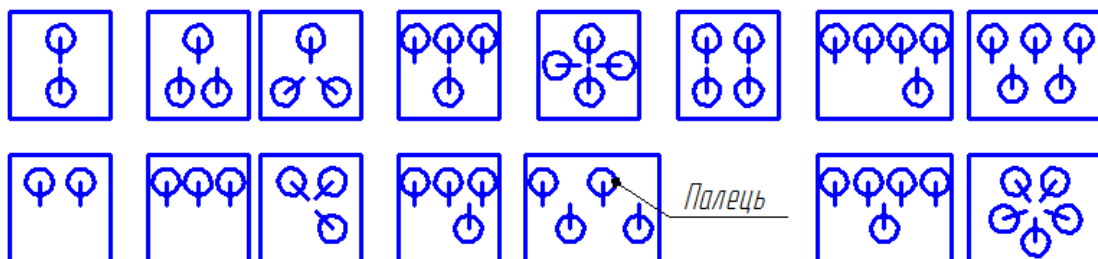


Рис. 2 – Можливі положення пальців [3]

З точки зору ступеня рухливості, всі пальці зазвичай приводяться в дію незалежно один від одного; отже, ступінь рухливості дорівнює числу пальців.

На рисунку 3 видно пальці трьох, чотирьох і п'яти фаланг, отриманих як один структурний механізм модуля.

Конфігурація пальців встановлюється через структурний синтез, тобто керування типом механізму, кількістю фаланг і кількістю підключених механізмів.

На наступному етапі структурного аналізу визначається ступінь рухливості, кінематичні та статичні параметри, які є незалежними, а також функції, що передають зовнішній рух і сили.

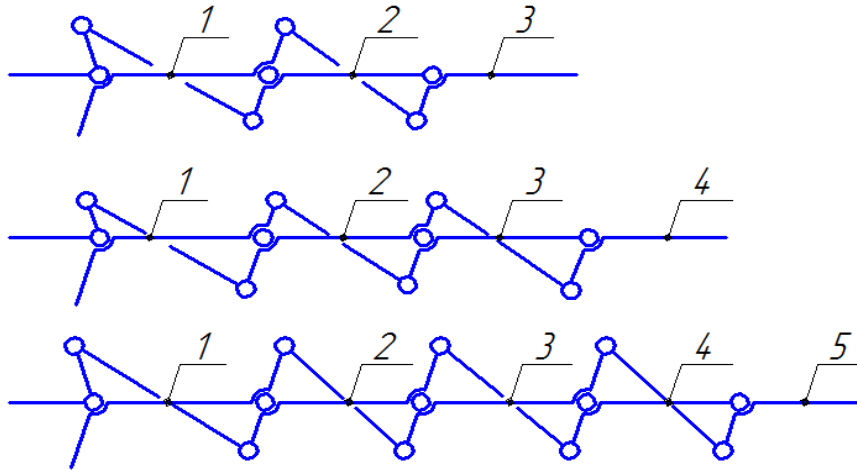


Рис. 3 – Модульні пальці [2]

На рисунку 4 представлена структурна схема пальця.

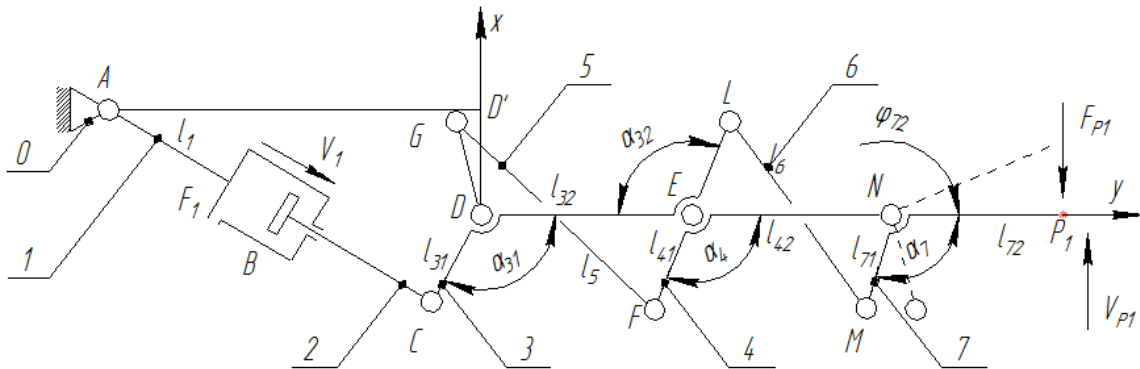


Рис. 4 – Структурна схема пальця [2]

**Постановка задачі**

Для механізму, показаного на рисунку 4, ступінь рухливості для кожного моно-контурного механізму визначається за формулою

$$M_k = \sum f_i - \chi_k \tag{1}$$

де  $f_i$  – ступінь рухливості пари,  $f_i = 1$ ;

$\chi_k = 3$  – кінематичний ранг моно-контура механізму.

$$M_1 = f_A + f_B + f_C + f_D - \chi_1 = 1 + 1 + 1 + 1 - 3 = 1$$

$$M_2 = f_D + f_E + f_F + f_G - \chi_2 = 1 + 1 + 1 + 1 - 3 = 1$$

$$M_3 = f_L + f_M + f_N + f_E - \chi_3 = 1 + 1 + 1 + 1 - 3 = 1 \tag{2}$$

Для багатоконтурного механізму ступінь рухливості визначається за формулою

$$M = \sum M_k - \sum f_c \quad (3)$$

де  $M_k$  – ступінь рухливості для моно-контурного механізму;  
 $f_c$  – ступінь рухливості загальної пари

$$\sum f_c = f_D + f_E = 1 + 1 = 2 \quad (4)$$

Тому

$$\begin{aligned} M &= M_1 + M_2 + M_3 \\ \sum f_c &= 1 + 1 + 1 - 2 = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

$M=1$  являє собою незалежний рух (незалежна швидкість)

$$v_1 = \dot{\varphi} \quad (6)$$

і функцію, яка передає зовнішню силу

$$F_m = F_m(M_1) \quad (7)$$

$L - M = 1$  означає функцію, яка передає зовнішній рух і незалежне вимірювання моменту  $M_7$  (генерує стискаючи зусилля).

### Вирішення задачі

При кінематичному синтезі приймаємо усередненні лінійні і кутові розміри, необхідні для правильного висновку стискаючих зусиль механізму, при відносному руху пальців [4].

Кінематичний аналіз виконується з використанням методу замкнутого векторного контуру, застосований послідовно до контура вектора відповідного моно-контуру механізмів представлений на рисунку 5.

Для контура ABCD (рисунок 5, а), векторне рівняння

$$AB + BC + CD + DA = 0 \quad (8)$$

в матричній формі та скалярній формі векторів

$$\begin{aligned} AB &= l_1 \begin{vmatrix} \cos 0 \\ \sin 0 \\ 0 \end{vmatrix} \\ BC &= l_2 \begin{vmatrix} \cos \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 \\ 0 \end{vmatrix} \\ CD &= l_2 \begin{vmatrix} \cos \varphi_{31} \\ \sin \varphi_{31} \\ 0 \end{vmatrix} \\ DA &= l_2 \begin{vmatrix} \cos \varphi_{01} \\ \sin \varphi_{01} \\ 0 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

Крім того, відповідні системи скалярної системи

$$\begin{cases} l_1 \cdot \cos 0 + l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_{31} \cdot \cos \varphi_{31} + l_{01} \cdot \cos \varphi_{01} = 0 \\ l_1 \cdot \sin 0 + l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_{31} \cdot \sin \varphi_{31} + l_{01} \cdot \sin \varphi_{01} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Ця система зводиться до функції положення

$$\varphi_{31} = \varphi_{31}(s_1) \quad (11)$$



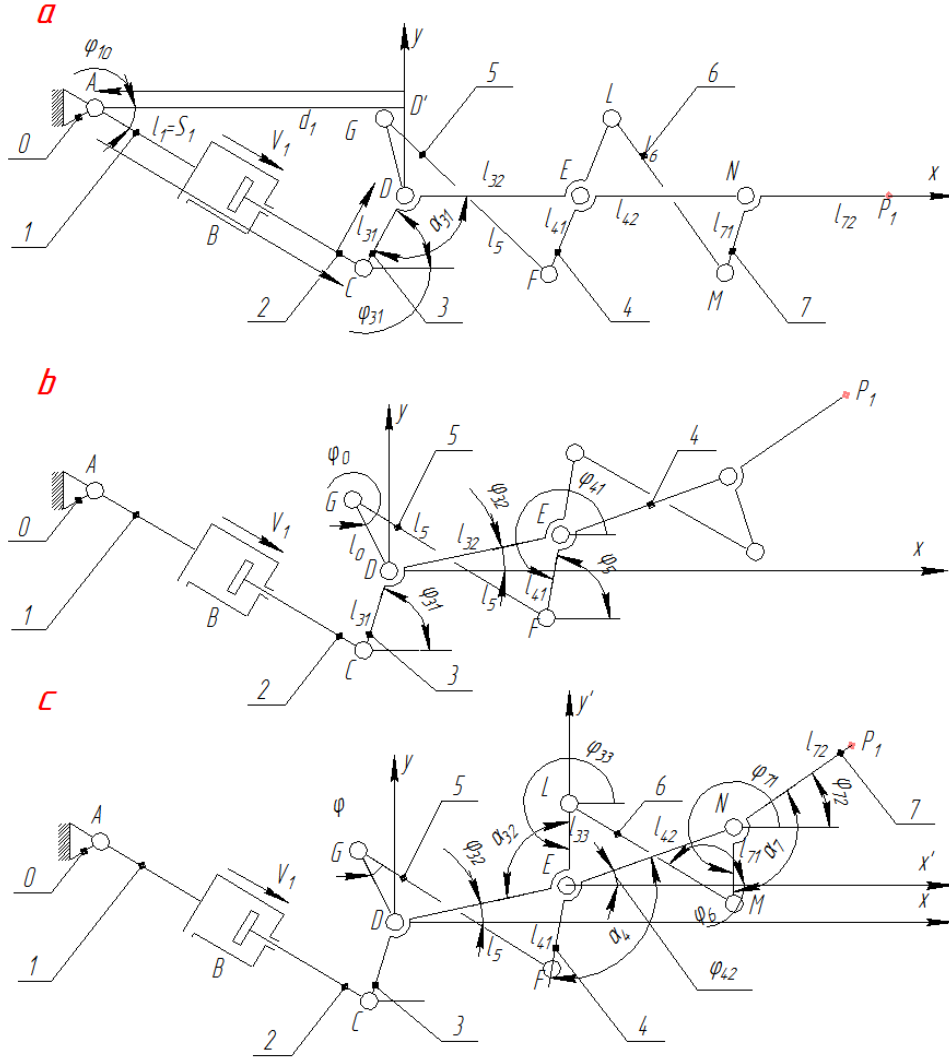


Рис. 5. – Кінематична схема і векторні контури

Згідно рисунка 5, б, рівняння, яке описує замикання векторного контуру для механізму DEFG

$$\overline{DE} + \overline{EF} + \overline{FG} + \overline{GD} = 0 \tag{12}$$

Це призводить до функції, яка передає позиції

$$\varphi_{41} = \varphi_{41}(\varphi_{31}, s_1) \tag{13}$$

В матричній формі скалярна форма векторів

$$DE = l_{32} \begin{vmatrix} \cos \varphi_{32} \\ \sin \varphi_{32} \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$EF = l_{41} \begin{vmatrix} \cos \varphi_{41} \\ \sin \varphi_{41} \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$FG = l_5 \begin{vmatrix} \cos \varphi_5 \\ \sin \varphi_5 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$GD = l_0 \begin{vmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

(14)

Крім того, відповідна скалярна система

$$\begin{cases} l_{32} \cdot \cos \varphi_{32} + l_{41} \cdot \cos \varphi_{41} + l_5 \cdot \cos \varphi_5 + l_0 \cdot \cos \varphi_0 = 0 \\ l_{32} \cdot \sin \varphi_{32} + l_{41} \cdot \sin \varphi_{41} + l_5 \cdot \sin \varphi_5 + l_0 \cdot \sin \varphi_0 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Беручи до уваги, що  $\varphi_{32}$  є функцією  $\varphi_{31}$  та  $s_1$ ,  $\varphi_{41}$  може бути визначеною.

Згідно рисунка 5, с, рівняння, пов'язане з замиканням векторного контуру механізму ENML

$$\overline{EN} + \overline{NM} + \overline{ML} + \overline{LE} = 0 \quad (16)$$

У матричному вигляді скалярна форма векторів

$$\begin{aligned} EN &= l_{42} \begin{vmatrix} \cos \varphi_{42} \\ \sin \varphi_{42} \\ 0 \end{vmatrix} & ML &= l_6 \begin{vmatrix} \cos \varphi_6 \\ \sin \varphi_6 \\ 0 \end{vmatrix} \\ LE &= l_{33} \begin{vmatrix} \cos \varphi_{33} \\ \sin \varphi_{33} \\ 0 \end{vmatrix} & LE &= l_{33} \begin{vmatrix} \cos \varphi_{33} \\ \sin \varphi_{33} \\ 0 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Крім того, відповідна скалярна система

$$\begin{cases} l_{42} \cdot \cos \varphi_{42} + l_{71} \cdot \cos \varphi_{71} + l_6 \cdot \cos \varphi_6 + l_{33} \cdot \cos \varphi_{33} = 0 \\ l_{42} \cdot \sin \varphi_{42} + l_{71} \cdot \sin \varphi_{71} + l_6 \cdot \sin \varphi_6 + l_{33} \cdot \sin \varphi_{33} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Рішення системи приводить до функції, пов'язаної з перенесенням позицій для елемента 7

$$\varphi_{71} = \varphi_{71}(s_1) \quad (19)$$

### Висновки

У відповідності з ідеями, описаними в цій статті, основний висновок звучить наступним чином:

1. Антропоморфні системи захвату (з пальцями) використовуються більше і частіше для промислових робіт.
2. Існує один основний тип антропоморфних механічних захоплень (з пальцями) відповідно до їх конструктивних елементів.
3. Існуючи типи антропоморфних механічних захоплень можна розділити на дві групи: традиційні механічні антропоморфні захоплення і модульні механічні антропоморфні захоплення.
4. Керування промисловим антропоморфним пневматичним захопленням можна здійснювати на підставі синтезу та структурно-кінематичного аналізу механізмів захоплення, що можуть бути виконані відомими класичними методами, доволі популярними в теорії механізмів, але адаптованими, відповідно поставленим завданням.

### Література

1. Bolboe, M. 2013. Theoretical and experimental researches regarding the anthro-pomorphic gripping systems with a reduced number of fingers, designed for robots. Transilvania University of Brasov.
2. Doroftei, I. 2005. Robotics, I-II. Iasi: CERMI (Technique, Scientific and Didactic Publishing House).
3. Itu, A. 2010. Contributions to Gripping Strategies in Real and Virtual Environment using a Three-Fingered Anthropomorphic Gripper. Transilvania University of Brasov.
4. Salisbury, J.K., & Roth, B. 1983. Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands. ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, p.105.
5. Staretu, I. 2011. Gripping Systems. Tewksbury, Massachusetts: Derc Publishing House.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2018

УДК 766

**М.В. Панасюк**

гл.бухгалтер/ ООО «ПАТТАЙЯ-КЛУБ»/Оптика «Флора»-собственник  
 магистр Киевский национальный торгово-экономический университет  
 член-корреспондент украинская академия наук (УАН)

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ, КАК НОВОЕ ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В ОПТИКЕ И СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДАННОГО ВИДА ИЗДЕЛИЙ, КАК НЕОБХОДИМЫЙ ФАКТОР ВОЗМОЖНОСТИ ЕЁ ШИРОКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

*В статье раскрыто, что дополнительная реальность в бытовой и персональной оптике еще только развивается, но у нее предполагают большое будущее. Отмечено, что базовые проблемы, которые возникают при внедрении на рынке новейшего инновационного продукта уже сегодня полностью решены, позволяет резко и существенно снизить уровень первичных инвестиций в организацию точек реализации и обслуживания нового продукта. Автором статьи представлено, модель системы для корректировки в деионизированной воде кислотности и щелочности в двух направлениях. Проанализированы варианты возможных источников воды для обработки в системе, привёл в производственные комплексы фотолитографии, в которых используется деионизированная вода, имеющая свойства близкие к тем свойствам, которые мы предполагаем наиболее необходимыми и подходящими для сервисного обслуживания оптических стёкол очков дополнительной реальности. Представлена модель электрохимического реактора с источником питания, и указано, что такая технология рекомендуется к использованию впервые, то потребовалось изготовить простейший прототип для проверки в реальных условиях возможности практической реализации нескольких инновационных технологий, первой из которых явилась техника и технология электрохимического реактора.*

*Ключевые слова:* очки, оптика, дополнительная реальность, мемристор, технология очистки стёкол.

*Рис.: 5. Лит.: 11*

**М.В. Панасюк**

Гол.бухгалтер/Власник бізнеса ТОВ «ПАТТАЙЯ-КЛУБ»/Оптика «Флора»-власник  
 Магістр (спеціаліст) з обліку і аудиту член-кореспондент УАН

### **ДОДАТКОВА РЕАЛЬНІСТЬ, ЯК НОВИЙ ІННОВАЦІЙНИЙ НАПРЯМОК У ОПТИЦІ І СЕРВІС ЦЬОГО ВИДУ ВИРОБІВ, ЯК НЕОБХІДНИЙ ЧИННИК МОЖЛИВОСТІ ЇЇ ШИРОКОГО ВИКОРИСТАННЯ**

*У статті розкрито, що додаткова реальність у побутовій та персональній оптиці ще тільки розвивається, але для неї припускають велике майбутнє. Відзначено, що базові проблеми, що виникають при впровадженні на ринку нового інноваційного продукту вже сьогодні повністю вирішені, дозволяє різко і суттєво знизити рівень початкових інвестицій в організацію точок реалізації та обслуговування нового продукту. Автором статті представлено, модель системи для коригування в деіонізованій воді кислотності і лужності в двох напрямках. Проаналізовано варіанти можливих джерел води для обробки в системі, автором приведено в виробничі комплекси фотолітографії, в яких використовується деіонізована вода, що володіє властивостями близькими до тих властивостей, які ми припускаємо найбільш необхідними і відповідними для сервисного обслуговування оптичних дзеркал окулярів додаткової реальності. Представлена модель електрохімічного реактора з джерелом живлення, і вказано, що така технологія рекомендується до використання вперше, відповідно варто було б виготовити найпростіший прототип для перевірки в реальних умовах можливості практичної реалізації декількох інноваційних технологій, першою з яких стала техніка та технологія електрохімічного реактора.*

*Ключові слова:* окуляри, оптика, додаткова реальність, мемристор, технологія очищення дзеркал.

*Рис.: 5. Літ.: 11*

**M. Panasiuk**

Master in Accounting and Audit, Chief Accountant/ Business owner "PATTAYA-CLUB" Ltd / Optika  
 "Flora" – owner Member of UAS

### **AUGMENTED REALITY AS A NEW INNOVATIVE DIRECTION IN OPTICS AND SERVICING OF THIS TYPE OF PRODUCTS AS A NECESSARY FACTOR FOR THE POSSIBILITY OF ITS WIDESPREAD USE**

*The research paper reveals that the augmented reality in household and personal optics is still developing, but it is supposed to have a great future. It is noted that the basic problems that arise when introducing the newest innovative product in the market have been completely solved today, allowing to dramatically and significantly reduce the level of primary investment in the organization of points of sale and servicing of a new product. The author of the research paper presents a model of the system for adjusting acidity and alkali in two directions in deionized water. Variants of possible water sources for treatment in the system have been analyzed, and the application in the production complexes of photolithography with the use of deionized water with properties close to those properties that are assumed the most necessary and suitable for servicing optical glasses of augmented reality have been described. It is stated that for comparison, variants with distilled water and water with a high degree of purification were also considered and analyzed, but the properties and qualities of deionized water*

*were still more preferable. The model of an electrochemical reactor with a power source is presented, and it is indicated that this technology is recommended for use for the first time, and it was required to produce a prototype for testing in real conditions the possibility of practical realization of several innovative technologies, the first of them being the technique and technology of electrochemical reactor. In the mentioned reactor, the electrode cells have working zones separated by a neutral membrane arranged symmetrically between the two electrodes. As one of the important principles of operability in electrode cells, the deionized water is treated in a developed ascending flow. It is noted in the research paper that the system for the preparation and treatment of deionized water is very simple in terms of design, it uses the most widely used engineering materials and components, it can be installed in any small trade enterprise that sells optical devices and glasses, including augmented reality glasses of both current and future modifications. It is indicated in the study that augmented reality (AR) is understood as the technology of superimposing virtual objects on a picture of the real world in the eyes of a person. The most popular household technology applications are the AR browser and AR glasses. In the browser, virtual objects are superimposed on a picture from the camera of a smartphone or tablet, and in glasses they are displayed on a lens or on a mini-monitor.*

*Key words: glasses, optics, augmented reality, memristor, glass cleaning technology.*

**Введение.** Дополнительная реальность в бытовой и персональной оптике еще только развивается, но у нее предполагают большое будущее. Такая гарнитура пока стоит недешево, и носить ее целый день неудобно. Тем не менее, есть несколько качественных устройств, которые имеются в продаже либо находятся на конечной стадии разработки. Их маркетинговый обзор мы и постараемся провести.

С момента релиза первого успешного проекта очков дополненной реальности Oculus Rift прошло уже больше трех лет. Эти очки с первых секунд использования вызывали wow-эффект, но через определенное время, когда пользователи вдоволь могли наиграться новым гаджетом, интерес к нему пропал. Дело в том, что за все это время, разработчики так и не смогли сделать из очков дополнительной реальности устройство, которое было бы таким же привычным как смартфон, игровая приставка или смарт-часы.

Как представляется автору настоящей публикации одной из причин такого положения является состояние сервисных технологий, которые ещё не готовы к обслуживанию таких сложных устройств в условиях массового производства и соответственно потребления.

Состояние с патентной защитой этих новых технологий также вызывает множество вопросов.

Удивляет тот факт, что, несмотря на то, что проекты и технологии визуализации дополнительной реальности обещают быстрый рост объёмов продаж, динамика патентной защиты достаточно вялая и неактивная.

#### **Анализ последних исследований.**

При проведении патентного поиска по ключевым словам, по патентному ведомству США автором было найдено всего 133 патентных заявки и не было найдено ни одного гранта патента на эту тему: Glasses of additional reality, - зарегистрировано только 113 патентных заявок

Visualization of additional reality, - зарегистрировано только 20 патентных заявок

Первый анализ опубликованных патентных заявок показал, что все эти заявки носят поисковый характер и не фиксируют внимание на конструкции и системах очков дополнительной реальности как на сложившихся изделиях, тем более, что во всех примерах идёт речь об изделиях на последней стадии разработки.

#### **Постановка задачи исследований.**

Поскольку автор настоящей серии статей занимается практической реализацией указанных изделий на конкретном рынке, отмечается, что для такой реализации по состоянию на сегодняшний день необходимо учитывать экономические факторы, имеющие место на конкретной территории. Это и покупательная способность населения, и возможно высокая пока ещё затратноёмкость таких продуктов, эффективность логистических цепочек поставок данных изделий. Существует объективная необходимость организации пунктов технического обслуживания на определённых территориях, обучение персонала как для эффективного продвижения указанных изделий на рынке, так и для качественного сервисного обслуживания. Не хватает целого ряда технических решений для изделий и инструментов, сопутствующих этим новшествам, к первым из которых относятся технические решения и продукты, предназначенные для сопровождения очков дополнительной реальности в повседневной жизни, как например отмылке стёкол от неизбежных в повседневной практике применения загрязнений, как органического, так и неорганического происхождения.

**Цель статьи.** Исследовать базовые проблемы, которые возникают при внедрении на рынке новейшего инновационного продукта, а также существенно снизить уровень первичных инвестиций в организацию точек реализации и обслуживания нового продукта. Предоставить

модель системы для корректировки в деионизированной воде кислотности и щёлочности в двух направлениях.

**Изложение основного материала.** Экономические факторы включают в себя исключительно важные аспекты наличия на сегодняшний день предыдущего опыта в освоении такого рода исключительно комплексных инновационных технологий, значительная группа которых так или иначе включает в себя технологии производства углерод - углеродных композитных материалов.

Сегодня в принципе готово производство как углерод-углеродных тканей (ткань из вискозы в объём которой методом многоэтапного пиролиза введён углерод) так и листов из этих тканей, получаемых методом спекания углерод-углеродных тканей в специальных прессформах, что позволяет электроды электрохимических ячеек изготавливать именно этим методом.

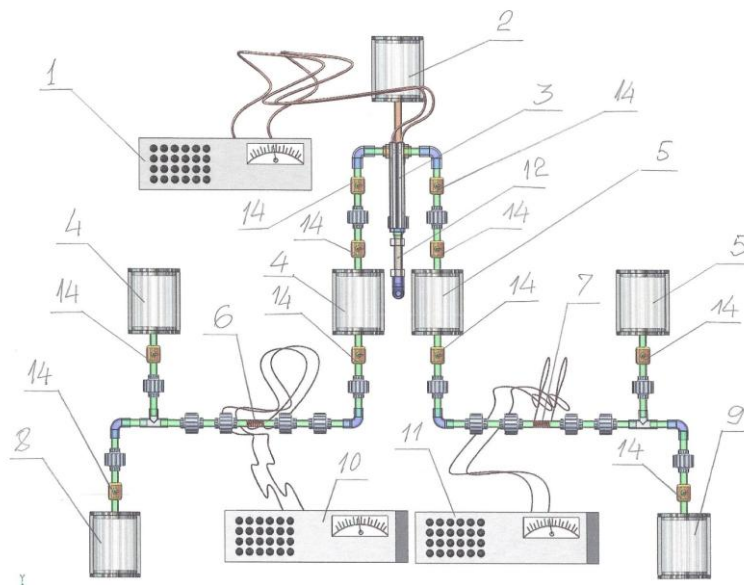
Это позволяет в дальнейшем полностью исключить электрохимическую деструкцию электродов (например изготовленных из титана, или ещё хуже из нержавеющей стали) и попадание в воду солей тяжёлых металлов.

Таким образом, благодаря предложенной технологии очистки стёкол, потребители двух уровней, - сервисные компании и конечные потребители инновационных продуктов получают возможность во всех операциях по обслуживанию клиентов полностью соответствовать требованиям экологических стандартов практически всех стран мира.

То, что одна из базовых проблем, возникающих при внедрении на рынке новейшего инновационного продукта уже сегодня полностью решена, позволяет резко и существенно снизить уровень первичных инвестиций в организацию точек реализации и обслуживания нового продукта.

Снижение стартовых расходов не только сделает более привлекательным весь процесс выхода на рынок с новым продуктом, но и создаст много рабочих мест.

Поскольку стёкла очков дополнительной реальности пачкаются также, как и стёкла обычных очков, то с практической точки зрения, первое, что необходимо предусмотреть - это создание комплексной технологии для получения моющей и дезинфицирующей жидкости из воды не содержащей высоких концентраций солей, в том числе и солей жёсткости



**Рис. 1. Модель системы для корректировки в деионизированной воде кислотности и щёлочности в двух направлениях**

\*авторская разработка

- 1 – источник питания для электрохимического реактора
- 2 – ёмкость с деионизированной водой для подачи в электрохимический реактор
- 3 – электрохимический реактор с межэлектродным пространством в котором обработка ведётся в двух параллельных восходящих потоках
- 4 - сборник воды с пониженным уровнем кислотности
- 5 – сборник воды с повышенным уровнем щёлочности
- 6 – сенсорный модуль для измерений пониженного уровня кислотности

- 7 – сенсорный модуль для измерений повышенного уровня щёлочности
- 8 – сборник воды с пониженным уровнем кислотности
- 9 – сборник воды с повышенным уровнем щёлочности
- 10 – генератор импульсов для импедансно – резонансного сенсора
- 11 – генератор импульсов для импедансно-резонансного сенсора

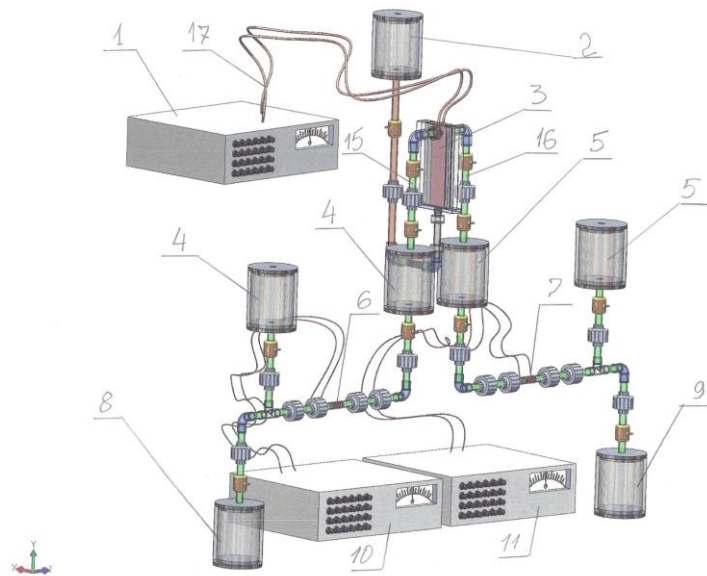
Но этого оказалось недостаточно. Как потребовала реальность - жидкость для использования при отмывке должна быть изолятором, что бы исключить любые возможные локальные токовые импульсы.

Анализ вариантов возможных источников воды для обработки в системе, привёл в производственные комплексы фотолитографии в которых используется деионизированная вода, имеющая свойства близкие к тем свойствам, которые мы предполагаем наиболее необходимыми и подходящими для сервисного обслуживания оптических стёкол очков дополнительной реальности.

Для сравнения рассматривались и анализировались также варианты с дистиллированной водой и с водой с глубокой степенью очистки, но свойства и качества деионизированной воды всё-таки оказались предпочтительнее.

Особо анализировались также возможности в будущем при необходимости использовать деионизированную воду, как после обработки в электрохимическом реакторе, так и до обработки, - в процессах приготовления различных эмульсий, для последующего применения в сервисных работах на очках дополненной реальности.

Опытные проверки показали возможность получения высококачественных эмульсий как с деионизированной водой до обработки, так и с водой после изменения уровня нейтральной кислотности или щёлочности.



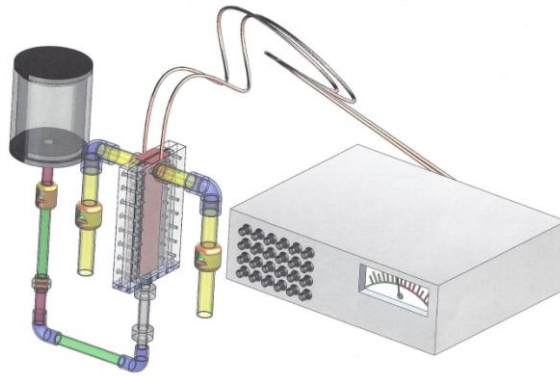
**Рис. 2. Модель системы для корректировки в деионизированной воде кислотности и щёлочности в двух направлениях**

\*авторская разработка

- 12 – вводный трубопровод в электрохимический реактор
- 14 – регулировочно – управляющие вентили
- 15, 16 – флоуметры
- 17 – токоподводящие кабели

Подбор и анализ различных вариантов окончательно показал, что наиболее подходящим оказывается вариант с применением деионизированной воды, которая широко используется в микроэлектронике и является привычным компонентом технологии фотолитографии.

Эта вода производится в значительных количествах и её стоимость относительно невысокая.



**Рис. 3. Модель электрохимического реактора с источником питания**

\*авторская разработка

Так как такая технология рекомендуется к использованию впервые, то потребовалось изготовить простейший прототип для проверки в реальных условиях возможности практической реализации нескольких инновационных технологий, первой из которых явилась техника и технология электрохимического реактора.

В указанном реакторе электродные ячейки имеют рабочие зоны, разделённые нейтральной мембраной, расположенной симметрично двух электродов.

Как один из важных принципов работоспособности в электродных ячейках обработка деионизированной воды идёт в развитом восходящем потоке.

При этом расстояние между рабочими плоскостями электродов составляет всего 3 миллиметра, из которых толщина мембраны составляет 1 миллиметр.

Таким образом, толщина потока жидкости в такой электродной ячейке составляет всего 1 миллиметр.

Такая толщина потока позволила резко поднять плотность тока до 100 ампер на квадратный дециметр, что в свою очередь позволило произвести электрохимическую коррекцию кислотности и щёлочности в воде очень близкой по своим параметрам и свойствам к диэлектрической жидкости.

Так как полученная жидкость имеет два потока на выходе из системы, то для обработки оптики очков дополнительной реальности имеется возможность применять воду как с высоким щёлочным эффектом, так и воду с высоким кислым эффектом.

Таким образом, была получена возможность очищать поверхность оптических стёкол от микроорганизмов и бактерий при помощи воды с кислым фоном и очищать от жировых загрязнений при помощи воды с щёлочным фоном.

При этом надо отметить тот факт, что так как система для подготовки и обработки деионизированной воды очень проста по устройству, в ней используются наиболее широко применяемые в машиностроении конструкционные материалы и комплектующие, её можно устанавливать в любом небольшом торговом предприятии, реализующем оптические приборы и очки, в том числе и очки дополнительной реальности, как сегодняшних модификаций, так и будущих модификаций.

Есть ещё один фактор, не относящийся только к специфике и требованиям к оптике очков дополнительной реальности, но вообще к оптическим приборам широкого пользования.

Идёт речь об антиаллергенном эффекте.

Так как в электрохимическом реакторе системы токоподвод на катод и анод электродной ячейки ведётся от одного источника питания, то при наличии одной и той же площади активной поверхности электродов, при эквивалентной плотности тока происходит явление корректировки параметров жидкости в двух направлениях совершенно пропорционально, - то есть как кислая реакция одной части потока, так и щёлочная реакция второй части потока не вызывают никаких аллергических реакций при одновременном использовании.

Этот феномен в корне меняет потребительские качества системы не только для очков дополненной реальности, но и для любых других оптических приборов.

Как в каждой системе для динамической электрохимической обработки жидкостей, и особенно, для обработки жидкости с низким уровнем токопроводности, конструкция электродной ячейки приобретает решающее значение.



В расчёт идут все конструктивные особенности такой ячейки, все материалы для изготовления электродов, материалы и конструкция нейтральной мембраны и материалы и конструкция корпуса ячейки. Как оказалось особый потенциал эффективности заложен в применении электродов из углерод-углеродных композитов



*Рис. 4. Модель электродной ячейки электрохимического реактора*

\*авторская разработка

Простота электродной ячейки определила простоту всей системы обработки воды.



*Рис. 5. Фотография системы для реальной корректировки кислотности и щёлочности в деионизированной воде*

\*авторская разработка

Фотографии реальной системы – прототипа демонстрируют запроектированную предельную простоту и как следствие невысокую стоимость при весьма удобной эксплуатации.

Такую систему без особых затрат возможно установить и эксплуатировать практически в любом торговом комплексе и при помощи продуктов, произведённых с её помощью, довести уровень обслуживания такого типа изделий до уровня технологического совершенства всех современных и будущих оптических приборов.

Чтобы представить ситуацию с состоянием дел в технологическом поле, включающем кроме традиционных оптических технологий и материалов целый ряд процессов и групп технологий и материалов, автор предлагает анализ общего состояния дел в инновационном развитии этого направления.

Ещё несколько лет тому назад, как чудо, появились шлемы для пилотов боевых летательных аппаратов, на прозрачном щитке которых отображалась оперативная информация.

Эта группа изобретений быстро прижилась и сегодня это одно из важнейших направлений развития техники управления и контроля для летательных аппаратов и не только.

Бытовая электроника развилась настолько глубоко, что аналогичные идеи воплощаются в бытовых устройствах массового спроса.

Коротко об этих новшествах и связанных с ними изобретениях.



Компания Google, например, разрабатывает очки, вместо стекол у которых будут прозрачные экраны. Об этом сообщает сайт 9to5Google со ссылкой на человека, который видел прототип (это сообщение прежде всего настораживает, так как информация может быть предназначена для дезинформации).

Очки смогут выполнять сразу несколько задач.

Во-первых, они станут дополнением к локационным сервисам Google. На стекла-экраны будет выводиться информация об окружающих пользователя объектах.

Во-вторых, в прототип очков будет встроена камера со вспышкой. Картинка с нее будет использоваться в нуждах приложений, однако делать фотоснимки будет тоже возможно.

Управлять системой, предположительно, можно будет наклонами головы. Несколько кнопок управления будут вынесены на дужки очков.

В очки будет встроена модуль GPS; не исключено также, что в них будет Wi-Fi и Bluetooth. Информатор 9to5Google заявил, что по аппаратным характеристикам очки будут соответствовать "старому смартфону".

Первые сведения об очках, которые СМИ называют Google X Glasses, появились ещё в декабре 2011 года.

Два месяца спустя информация о проекте подтвердилась с некоторыми уточнениями. Видевший прототип человек рассказал, что экраном будет служить только одна линза, а не две, как предполагалось ранее. Внешне устройство сильно напоминает Oakley Thump - солнцезащитные очки с MP3-плеером, которые вышли ещё в 2004 году.

Когда Google собирается запустить очки в продажу, неизвестно. По одной из версий, прежде чем отправить Google X Glasses в магазины, компания устроит "пилотное тестирование" - бесплатно распространит партию очков среди своих сотрудников или среди ограниченного круга лиц.

Очки с прозрачными экранами представляют собой пример "дополненной реальности" - ситуации, когда виртуальные объекты накладываются на объекты реального мира. В серии фильмов "Терминатор" такой особенностью обладало зрение героя Арнольда Шварценегера.

Факты последних дней показывают, что эта тема становится исключительно популярной и на этом технологическом и инновационном поле начинают играть всё более крупные игроки, но при этом всё равно остаётся непонятным инертное состояние патентной защиты этой группы технологий.

Компания Microsoft подала в Патентное ведомство США (USPTO) заявку, в которой описываются очки дополненной реальности - устройство, способное "накладывать" виртуальные объекты на изображение окружающего мира. Об этом сообщает Unwired View.

В отличие от очков Project Glass, которые разрабатывает компания Google, устройство Microsoft не предназначено для постоянного ношения. Подразумевается, что пользователь надевает очки в ситуациях, для ориентирования в которых могут потребоваться дополнительные разъяснения.

Таковыми ситуациями, по мнению Microsoft, могут быть публичные мероприятия - например, концерты или спортивные состязания. В последнем случае очки могут показывать статистику команд и отдельных игроков, счет, имена игроков и так далее.

Очки могут включать в себя камеру, микрофон и динамики. Подсказки, которые выдает устройство, могут быть как текстовыми, так и голосовыми.

Патентное ведомство США опубликовало заявку. Компания Microsoft направила этот документ в ведомство в ещё в мае 2011 года.

Разработку очков дополненной реальности ведут и продолжают старые разработки несколько компаний. Очки Google, использующие операционную систему Android, поступили в продажу ещё в 2013 году; над устройством со схожими возможностями работает также Olympus. Компания Oakley выпустила и продолжает развивать свой вариант - горнолыжную маску с миниатюрным экраном, который показывает спортсмену его скорость и другие сведения.

Не все разрабатываемые системы и устройства имеют такие же особенности.

Компания Olympus представила и продолжает развивать прототип очков дополненной реальности под названием MEG4.0, сообщается в пресс-релизе компании.

Напротив глаз пользователя очков находится дисплей с разрешением 320 на 240 точек. Картинка с экрана накладывается на "картину мира" глазами владельца устройства. Очки весят менее 30 граммов.

По задумке Olympus, экран очков светится не постоянно. Он включается в среднем раз в три минуты на пятнадцать секунд, выводя необходимую информацию, а потом снова гаснет. В таком режиме использования очки могут проработать до восьми часов.

В очки встроен акселерометр. Он позволяет управлять устройством движениями головы. Кроме того, акселерометр определяет, в какую сторону смотрит пользователь.

Очки соединяются со смартфоном или планшетом через Bluetooth. В устройстве отсутствует встроенная камера.

Olympus подчеркивает, что очки являются экспериментальным устройством, процесс усовершенствования которого продолжается. Планируется ли продолжать запускать их в массовое производство, компания не сообщает.

Разработкой очков дополненной реальности также занимается компания Google. В отличие от очков Olympus, Google Glasses оборудованы камерой и выводят картинку на экран в постоянном режиме, а не интервалами по 15 секунд.

Google Glasses поступили в продажу в 2013 году по цене в полторы тысячи долларов, но купить их могли только разработчики. Более дешевая версия для рядовых пользователей появилась в магазинах позже.

Поиск свободной ниши на указанном технологическом поле продолжается с исключительной интенсивностью, но опять же уровень этой интенсивности не до конца понятен, так как интенсивность патентной защиты этих решений не отвечает объявленному уровню развития этих проектов и также объявленному уровню широты поиска новых технических решений.

Есть и продолжает появляться информация об новых идеях и новых, основанных на них разработках.

Американская компания Oakley представила горнолыжную маску дополненной реальности. Маска получила название Oakley Airwave.

Airwave позволяет лыжнику или сноубордисту получать информацию о текущих высоте и скорости и о пройденном расстоянии, не отвлекаясь от катания. Сведения отображаются на маленьком экране, который находится напротив правого глаза пользователя. Технологию вывода данных на экран Oakley лицензировала у компании Recon Instruments.

Маску можно связать со смартфоном на iOS или Android по каналу Bluetooth. В этом случае на экран будут выводиться и сведения о новых письмах, сообщениях и звонках, а также о музыкальных композициях, которые воспроизводит плеер.

Для Airwave разработано приложение Buddy. Оно позволяет узнать, кто из друзей владельца маски катается поблизости. "Прокрутка" данных на экране осуществляется с помощью пульта, который крепится на запястье лыжника.

Под дополненной реальностью (ДР) понимают технологию наложения виртуальных объектов на картину реального мира в глазах человека. Самые популярные бытовые применения технологии - это браузер ДР и очки ДР.

В браузере виртуальные объекты накладываются на картинку с камеры смартфона или планшета, а в очках - выводятся на линзу или на мини-монитор.

Компания Google продолжает тестирование новых версий очков дополненной реальности, но информация о результатах этих испытаний и поисков весьма противоречивая.

Но создание самого устройства без программно – алгоритмической периферии не даёт этой технологии развиваться настолько быстро, как того требует рынок.

И такое решение, кажется, нашлось.

Американские ученые предложили принципиальную схему электронного вычислительного устройства, информация в котором хранится и обрабатывается в одних и тех же ячейках - так же, как это происходит в нейронах мозга. Препринт работы выложен в архиве Корнельского университета, кратко о ней пишет блог издания Technology Review.

Принципиальное отличие нового вычислительного устройства от существующих компьютеров заключается в том, что хранение и обработка информации в нем не разделено пространственно, а осуществляется в одних и тех же ячейках. Именно так устроена работа мозга человека и любой нервной сети.

В мозге на уровне нейрона одновременно происходит суммирование сигналов, приходящих от многих других нейронов и формирование памяти о уже проведенных импульсах. В основе этого процесса лежит синаптическая пластичность - свойство нервных контактов при частом использовании работать все лучше.

Электронным аналогом нейрона в новом компьютере могут выступить мем-устройства - особые резисторы, конденсаторы и катушки. Первое из них - мемристор было теоретически описано еще сорок лет назад, однако создать его удалось только в 2008 году. Мемристор представляет собой резистор, изменяющий свое сопротивление в зависимости от силы тока, проходившей через него в прошлом.

Выводы и задачи дальнейших исследований.

В статье раскрыто, что дополнительная реальность в бытовой и персональной оптике еще только развивается, но у нее предполагают большое будущее. Отмечено, что базовые проблемы, которые возникают при внедрении на рынке новейшего инновационного продукта уже сегодня полностью решены, позволяет резко и существенно снизить уровень первичных инвестиций в организацию точек реализации и обслуживания нового продукта. Проанализированы варианты возможных источников воды для обработки в системе, привёл в производственные комплексы фотолитографии, в которых используется деионизированная вода, имеющая свойства близкие к тем свойствам, которые мы предполагаем наиболее необходимыми и подходящими для сервисного обслуживания оптических стёкол очков дополнительной реальности.

Указано в рамках исследования, что под дополненной реальностью (ДР) понимают технологию наложения виртуальных объектов на картину реального мира в глазах человека. Самые популярные бытовые применения технологии - это браузер ДР и очки ДР. В браузере виртуальные объекты накладываются на картинку с камеры смартфона или планшета, а в очках - выводятся на линзу или на мини-монитор. В качестве альтернативы мем-устройствам для создания "электронного мозга" ученые рассматривают спинтроникку - электронику на спинах. Ранее инженеры Intel предложили схему нейроморфного чипа - элементарной единицы такой вычислительной машины.

Авторы новой работы, предлагается усовершенствовать, как соединяя и комбинируя мем-устройства можно получить вычислительную машину, мощность которой не ограничивается постоянным перебрасыванием данных из памяти в процессор и обратно.

1. Method, system and apparatus for treatment, cleaning and regeneration of technologic liquid solutions, including water in systems for surfaces of glass cleaning, including optic lenses and solar panels. /Maryna Panasiuk// US Patent Applications. US 62/626,088 - 2018.

2. Apparatus and method for micro emulsion generation, including nano emulsions with re-emulsification conditions and glass surfaces cleaning solutions. /Maryna Panasiuk// US Patent Applications. US 62/626,087 - 2018.

3. SMART GLASSES HAVING INTERFERING LIGHT FILTERING / Johnson; Lonny Eric ; et al./ /US Patent Applications 20180031836 - 2018

4. HEAD MOUNTED APPARATUS AND GRIPPING APPARATUS / Kawamura; Takumi// US Patent Applications 20170307787 – 2017

5. METHOD FOR OPERATING VIRTUAL REALITY GLASSES AND SYSTEM WITH VIRTUAL REALITY GLASSES / KUEHNE; Marcus ; et al.// US Patent Applications 20150378155 - 2015

6. WEARABLE GLASSES AND METHOD OF PROVIDING CONTENT USING THE SAME / JOO; Ga-hyun// US Patent Applications 20160034042 – 2016

7. GLASSES-TYPE MOBILE TERMINAL AND METHOD OF OPERATING THE SAME/ PARK; Jisoo ; et al.// US Patent Applications 20180005421 – 2018

8. METHOD AND SYSTEM FOR DISPLAYING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS/ SEVOSTIANOV; PETR VYACHESLAVOVICH// US Patent Applications 20170366805 - 2017

9. WEARABLE SMART GLASSES / Liao; Chunyuan// US Patent Applications 20170371164 - 2017

10. WEARABLE GLASSES, CONTROL METHOD THEREOF, AND VEHICLE CONTROL SYSTEM / PARK; Sung Woo// US Patent Applications 20160173865 - 2016

11. Image and augmented reality based networks using mobile devices and intelligent electronic glasses/ Rao, et al.// United States Patent 9,380,177 – 2016

Стаття надійшла до редакції 23.05.2018

УДК: 539.4

**О.С. Поліщук***Хмельницький національний університет***ПРОЦЕС ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ПРИ УДАРНОМУ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

*Розглянуто питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа.*

*Ключові слова:* ударник, робочий інструмент, матеріал, удар, операції легкої промисловості.

**О.С. Полищук****ПРОЦЕСС ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПРИ УДАРНОМ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЕРАЦИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Рассмотрены вопросы о процессах и явлениях, возникающих в системе ударник машины - рабочий инструмент - материал - основа.*

*Ключевые слова:* ударник, рабочий инструмент, материал, удар, операции легкой промышленности.

**O. Polishchuk****THE PROCESS OF ENERGY TRANSFERRING WHILE SHOCK PERFORMANCE OF LIGHT INDUSTRY OPERATIONS**

*The issue of processes and phenomena that arise in such system as: machine drummer - working tool - material - basis is considered.*

*Keywords:* drummer, working tool, material, kick, of light industry operations.

**Постановка проблеми.**

Під ударом розуміють сукупність явищ, що виникають при зіткненні тіл і супроводжуються повним або частковим переходом кінетичної енергії в їх деформації. Вивчати удар почали з часів Леонардо да Вінчі; цим займалися Галілей, Ньютон, Гюйгенс, Декарт, Маріон, Лейбніц. Вони розглядали процес динамічної взаємодії двох тіл як миттєвий процес і оцінювали лише кінцевий результат удару - зміну швидкостей тіл. Декарт ввів поняття кількості руху. Ньютон сформулював основні закони механіки, розглянув пружний і непружний удар, ввів поняття коефіцієнта відновлення енергії при ударі. Гюйгенс сформулював закон збереження імпульсу при контактній взаємодії тіл [1].

Тривалість удару зазвичай дуже мала і на практиці лежить в діапазоні від декількох десятитисячних до мільйонних часток секунди ( $10^{-4}$  -  $10^{-6}$  с). Ударні сили, що розвиваються в місці контакту тіл змінюються за час удару в широких межах і можуть досягати значень, при яких середні тиски на площадках контакту становлять  $10^9$  -  $10^{10}$  Па (десятки і сотні тисяч атмосфер). Дія ударних сил призводить до значних змін швидкостей точок тіл. Наслідками удару можуть бути також залишкові деформації, пружні (звукові) коливання, нагрівання тіл, зміна механічних властивостей їх матеріалів та ін.

Очевидна вигода руйнування ударом обумовлена можливістю трансформувати кількість руху ударника в імпульс великої сили [2]. 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, трикотажна і шкіргалантерейна 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 зворотньо - поступальним рухом робочих органів. До таких операцій можна віднести: вирубання та перфорацію деталей взуття та одягу; клеймування і маркування; встановлення і закріплення металеві фурнітури і т.п. Всі операції припускають взаємодію робочих органів пресів з матеріалами, що мають різні фізико - механічні властивості. Взаємодія носить ударний характер: в окремих випадках виконавчий орган преса повинен розрізати матеріал або зробити в ньому отвори, а в інших залишити слід на поверхні (тиснення) не руйнуючи поверхню матеріалу. Процес руйнування матеріалу здійснюється одиничним ударом, що передається через проміжну ланку робочий інструмент. Робочий інструмент (різак, пробійник) занурюється в матеріал під дією хвилі напруження після удару по ньому робочого органу пресу.

Ударний ефект при виконанні даних операцій в основному досягається на устаткуванні, що використовує пневматичний, гідравлічний, електромеханічний приводи. Актуальним питанням є процес передачі енергії при ударному виконанні вище зазначених операцій на пресовому обладнанні з використанням двигунів на основі безпосереднього перетворення електричної енергії в механічну енергію руху робочих органів. Таке перетворення електричної енергії може бути здійснено за допомогою лінійних електродвигунів різного типу, які теж почали використовуватися для виконання даних операцій та яких робочий орган переміщується з більшою швидкістю [3, 4].

Виходячи з вище викладеного можна констатувати, що процес ударного виконання операцій легкої промисловості є актуальним завданням.

**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.

Повздовжньому удару стержнів присвячені роботи Тимошенко С.П., Бержерона Л., Динника О.М., Бідермана В.Л., Кільчевського М.О., Гольдсмита В., Пановко Я.Г. та інших.

Руйнуванню матеріалів ударною дією та вивченню поздовжніх коливань в машинах ударної дії присвячені роботи Алабушева П.М., Александрова Є.В., Манжосова В.К., Саруєва Л.А., Тагаєва Б.Т., Шапошнікова І.Д., Саймона Р. та інших [5].

**Постановка завдань.** В останні роки з'явилася 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 [2].

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. З використанням явища удару в легкій промисловості можна виконувати наступні операції: вирубування деталей для взуття, одягу та шкір-галантерейних виробів; виконання перфорації на деталях; пробивання отворів під металеву фурнітуру; закріплення металевієї фурнітури; забивання закріплювачів в матеріал; виконання операції тиснення візерунків на деталях; виконання операції клеймування та маркування на деталях та виробках тощо.

Необхідно розглянути питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа (вирубна плита), а саме: привести загальну уяву про зіткнення елементів; розглянути процес передачі енергії при виконанні різних технологічних операцій. Причому елементи, що стикаються і передають удар (ударник з прикріпленим робочим інструментом; ударник - робочий інструмент і ударник – закріплювач) і матеріал (деталь) будуть розглядатися як система, в якій від кожної ланки залежить кінцевий результат її функціонування (приклад систем: ударник – робочий інструмент – матеріал при виконанні операції вирубування деталей). Цілеспрямованість системи обумовлює призначення і параметри її ланок. Так, для виконання операції вирубування деталей в приведеній системі найбільш ефективним способом потрібно: передати енергію від ударника пресового устаткування до матеріалу з як найменшими втратами енергії; використати енергію удару на руйнування матеріалу з найбільшим к.к.д.; знайти найкращі конструктивні варіанти ланок по їх довговічності, зносостійкості і т.п.

**Викладення основного матеріалу.** При виконанні операцій легкої промисловості основною формою ударної дії робочого інструменту на матеріал (деталь) буде безпосередній удар по матеріалу (деталі) робочим інструментом і дія на матеріал (деталь) на протязі короткого часу імпульсу певної сили в результаті передачі енергії удару від ударника пресового устаткування через робочий інструмент. При ударному виконанні операцій легкої промисловості може бути два випадки.

1. Ударник із закріпленим робочим інструментом (різак, просікач, пробійник, клеймувальник, маркувальник), що розміщений на певній відстані від матеріалу (деталі) наносить по ньому удари.

2. Ударник наносить удари по робочому інструменту, що знаходиться на матеріалі (деталі).

В обох випадках енергія удару буде залежати головним чином від робочого ходу ударника і в основному від його ваги.

В роботі [2] розглядається процес передачі енергії удару при ударних видах буріння. Розроблену методику та отриманні результати даної роботи можна використати для визначення коефіцієнту передачі енергії при виконанні операцій легкої промисловості.

Потенціальна енергія піднятого над матеріалом (чи робочим інструментом) ударника буде визначатися за формулою:

$$W_n = QH = mgH \quad (1)$$

де  $Q$  - вага ударника;  $m$  - маса ударника;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $H$  - висота підйому.

При русі ударника потенціальна енергія переходить в кінетичну і витрачається на руйнування матеріалу, або розвальцювання деталі при встановленні металевої фурнітури і на переборення опору руху робочого інструменту перед ударом. Відомо, що кінетична енергія ударника перед ударом складає:

$$W_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

де  $v$  - передударна швидкість.

Враховуючи опір сил при русі робочого інструменту можна записати:

$$W_n = kW_k, \quad (3)$$

де  $k$  - коефіцієнт зменшення енергії  $W_n$  внаслідок дії сил опору руху ударника.

Починаючи занурюватися в матеріал зі швидкістю  $v$ , робочий інструмент витрачає кінетичну енергію на його руйнування, при завершенні удару швидкість робочого інструменту падає до нуля. Кількість руху ударника переходить в імпульс сили, це перетворення відповідно до другого закону Ньютона записується у вигляді:

$$mv = \int_0^T F(t) dt. \quad (4)$$

Права частина рівності представляє собою імпульс дії сили  $F$ , що змінюється в часі ударника на матеріал. Час  $T$  удару залежить від властивостей матеріалу і початкових умов зіткнення, ваги і розмірів ударника, передударної швидкості, а також від профілю леза робочого інструменту.

Суть удару з точки класичної механіки заключається в зіткненні тіл, що характеризується миттєвою зміною їх швидкостей до деяких кінцевих значень. Існують інші визначення удару як явища взаємодії тіл, що протікає за дуже короткий проміжок часу, на протязі якого проходить кінцева зміна їх швидкостей або діє сила дуже великої величини. Автор роботи [5] визначає удар як явище, що виникає при зіткненні тіл і яке супроводжується повним або частковим переходом кінетичної енергії тіл в енергію деформації.

В теорії удару, заснованій на класичній механіці, розглядаються випадки абсолютно непружного, абсолютно пружного і не зовсім пружного удару. При абсолютно непружному зіткненні два тіла, що мають передударні швидкості  $v_{01}$  і  $v_{02}$ , після удару не роз'єднуються і набувають загальної швидкості  $v$ .

При абсолютно пружному ударі енергія ударної системи до і після удару залишається постійною, а відносні швидкості руху тіл залишаються попередніми. На практиці також зіштовхуються з не зовсім пружним ударом, тобто таким, при якому проходить втрата частини енергії на непружні деформації при зіткненні і, відповідно, зменшення відносної швидкості після удару.

Абсолютно непружний удар виникає при виконанні наступних операцій легкої промисловості: вирубування, перфорування та пробивання деталей; закріплення металевої фурнітури; забивання закріплювачів, тиснення візерунків.

Не зовсім пружний удар виникає при виконанні операцій легкої промисловості клеймування, маркування деталей.

При виконанні операцій легкої промисловості необхідно розглядати процес передачі енергії від одного елемента (того що вдаряє) іншому (того по кому вдаряють), який в ударній системі на початку виконання технологічної операції являється нерухомим (вирубання деталей, перфорування, закріплення металевої фурнітури). Тому необхідно більш детально зупинитися на визначенні коефіцієнта передачі енергії удару як одному з найважливіших факторів, що обумовлює ефективність ударного виконання операцій легкої промисловості, і не торкатися питання ударної взаємодії робочого інструменту з матеріалом. Взаємодію в даному випадку неможна віднести до поняття передачі енергії удару.

Коефіцієнтом передачі енергії удару в ударній системі, що складається із двох елементів, є відношення енергії переданої елементу по якому вдаряють до всієї енергії елемента, який вдаряє.

При абсолютно непружному ударі післяударні швидкості  $v_1$  і  $v_2$  однакові і рівні  $v$ . Енергія елемента, що вдаряє перед ударом визначається за формулою:

$$W_{01} = \frac{m_1 v_{01}^2}{2}, \quad (5)$$

де  $m_1$  - маса елемента, що вдаряє.

Енергія, що отримується елементом по якому вдаряють дорівнює:

$$W_2 = \frac{m_2 v^2}{2}, \quad (6)$$

де  $m_2$  - маса елемента по якому вдаряють.

Коефіцієнт передачі енергії удару складає:

$$\eta = \frac{W_2}{W_{01}}. \quad (7)$$

На основі закону збереження імпульсу при ударі можна записати:

$$mv_{01} = m_1 v_1 + m_2 v_2,$$

звідки

$$v = \frac{m_1 v_{01}}{m_1 + m_2}. \quad (8)$$

Підставляючи у формулу (7) вирази  $W_{01}$  і  $W_2$  і використовуючи залежність (8), отримаємо:

$$\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (9)$$

Замінивши  $m_1$  на  $\lambda m_2$  ( $\lambda = \frac{m_1}{m_2}$ ), знаходимо, що:

$$\eta = \frac{\lambda}{(1 + \lambda)^2} \quad (10)$$

Взявши похідну  $\frac{d\eta}{d\lambda}$  і прирівнявши її до нуля, визначимо значення  $\lambda$ , при якому коефіцієнт передачі  $\eta$  максимальний:

$$\frac{d\eta}{d\lambda} = \frac{1 - \lambda}{(1 + \lambda)^3} = 0, \\ \lambda = 1.$$

Таким чином, при абсолютно непружному ударі найбільший коефіцієнт передачі енергії  $\eta = \frac{1}{4}$ , що має місце при співвідношенні мас, що стикаються  $\lambda = \frac{m_1}{m_2} = 1$ .

При не зовсім пружному ударі коефіцієнт  $\eta$  є максимальним і рівним 1 при  $k = -1$  і  $\lambda = \frac{m_1}{m_2} = 1$ , тобто коли удар стає абсолютно пружним. В даному випадку формула:

$$\eta = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} (1 - k)^2 \quad (11)$$

перетворюється у формулу

$$\eta = \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}. \quad (12)$$

При  $k = 0$  удар стає абсолютно непружним і залежність (11) перетворюється в (9).

При теоретичному і практичному використанні формул класичної механіки в розрахунках ударних систем коефіцієнт відновлення  $k$  грає ледь не основну роль. Значення його визначають експериментально, в більшості випадків  $k = -(0,5...1)$ , найбільш часто в конструкторських розрахунках приймають  $k = -0,55$ .

Вивчаючи зіткнення стержнів з різними радіусами закруглень торців, що ударяються Є.В. Александров в своїй роботі [6] показав, що для одних і тих же матеріалів значення коефіцієнта  $k$  не є постійним, як це вважалося раніше, а змінюється в залежності від форми поверхонь, що стикаються. У випадку зіткнення стержнів приблизно рівного перерізу краще співпадіння теоретичних значень з практичними спостерігається при  $\lambda = 1$ .

При виконанні операцій легкої промисловості формули теорії удару, заснованій на класичній механіці, можна використати головним чином при визначенні коефіцієнта передачі енергії удару від ударника пресового устаткування через робочий інструмент матеріалу (виробу). Більшість цих формул по конструкції аналогічні формулі (11) і можуть бути знайдені в технічній літературі. Їх відмінність може заключатися в нових коефіцієнтах, що замінюють коефіцієнт відновлення і враховують властивості самого матеріалу (виробу), форму і геометричні параметри самого робочого інструменту і т.п.

Більш точну уяву про процеси передачі енергії удару через робочий інструмент дає хвильова теорія удару. Але і класична теорія в деяких випадках може привести до достатньо точних результатів в технічних розрахунках.

В хвильовій теорії удару зіткнення тіл розглядається як виникнення коливань (хвиль деформації), що розповсюджуються від місця контакту по сферичним колам з кінцевою швидкістю. При ударному виконанні операцій легкої промисловості буде мати місце розповсюдження коливань в пружному середовищі (матеріал ударника, робочого інструменту) в результаті зіткнення ударника з робочим інструментом. Найбільш повно хвильова теорія розроблена для випадку зіткнення двох пружних стержнів, це теорія плоского поздовжнього удару [2]. Основою її послужили дослідження Б. Сен-Венана, Л.М.А. Нав'є, К.Г. Неймана, Т. Юнга, Ж.В. Бусинекса і інших. Засновником теорії плоского удару вважається Б. Сен-Венан, запропонувавший її більше 140 років тому.

Розглянемо плоский поздовжній удар з точки зору хвильової теорії стосовно операцій легкої промисловості. Припустимо, що на всю поверхню торця пружного робочого інструменту (наприклад циліндричного різачка) певної довжини раптово прикладене рівномірно розподілене навантаження  $P$  (рис.1). Під дією цього навантаження від торця стержня починає розповсюджуватися зі швидкістю  $c$  хвиля пружної деформації стискання, яка за час  $t$  пройде відстань  $ct$ . За той же час плоска поверхня торця робочого інструменту, рухаючись під впливом навантаження  $P$  зі швидкістю  $u$ , меншою чим  $c$  переміститься на відстань  $ut$ . З тією ж швидкістю  $u$  рухаються і всі перерізи, паралельні торцю на дільниці робочого інструменту, що деформується. Відносна деформація дільниці, на якій розповсюдилася хвиля стискання, визначається за формулою:

$$\varepsilon \frac{ut}{ct} = \frac{u}{c}.$$

Відомо, що  $\sigma = \varepsilon E$ , тому:

$$\sigma = \frac{u}{c} E, \quad (13)$$

де  $\sigma$  -напруження стискання, рівне  $\frac{P}{A}$  ( $A$  -площа перерізу робочого органу);  $E$  -модуль поздовжньої пружності (модуль Юнга).

Прирівнюємо імпульс сили до кількості руху:



$$Pt = mu ,$$

$$Pt = \rho Actu ,$$

де  $\rho$  - густина матеріалу стержня.

Звідси:

$$\frac{P}{A} = \rho cu ,$$

або

$$\sigma = \rho cu . \quad (14)$$

Прирівнявши праві частини рівності (13) і (14), отримаємо:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (15)$$

Таким чином швидкість розповсюдження хвилі пружної деформації залежить тільки від фізичних властивостей матеріалу робочого інструменту.

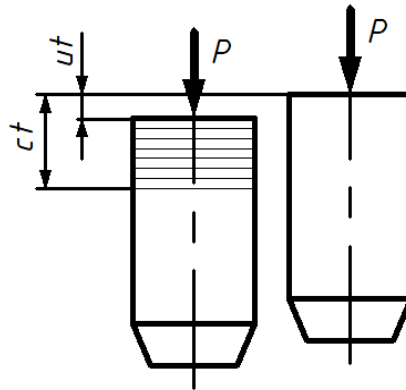


Рис. 1. Схема виникнення в робочому інструменті поздовжньої хвильової деформації стискання під дією раптово прикладеного навантаження  $P$

Теорія пружності описує стан робочого інструменту при плоскому поздовжньому ударі одним рівнянням:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 a_x}{\partial t^2} , \quad (16)$$

де  $a$  - переміщення торця робочого інструменту;  $x$  - відстань, на яку розповсюдилася хвиля деформації (вісь  $x$  співпадає з віссю робочого інструменту).

Поскільки  $\sigma_x = E \frac{da}{dx}$ , то:

$$E \frac{\partial^2 a_x}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 a_x}{\partial t^2} .$$

Враховуючи залежність (15), отримаємо:

$$\frac{\partial^2 a_x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a_x}{\partial x^2} \quad (17)$$

Отримане рівняння називається хвильовим, із його аналізу випливає, що деформація при ударі розповсюджується у формі хвилі з постійною швидкістю  $c$ .

Розповсюджуючись вздовж робочого інструменту, хвиля деформації несе з собою енергію, яка складається із рівних по значенню частин кінетичної і потенціальної енергії. Рівновагою між цими частинами енергії хвилі і пояснюється постійність швидкості її переміщення.

Кінетична енергія у хвилі може бути визначена із виразу:

$$W_k = \frac{mu^2}{2}$$

де  $m$  – маса робочого інструменту на який розповсюджується зона деформації.

Але  $m = Act\rho$ , відповідно отримаємо:

$$W_k = \frac{Act\rho u^2}{2}.$$

Замінивши  $u$  на  $\sigma$  із формули (14) отримаємо:

$$W_k = \frac{A}{2\rho c} \sigma^2 t,$$

або

$$W_k = \frac{Ac}{2E} \sigma^2 t.$$

В загальному випадку, коли напруження змінюється в часі, отримаємо:

$$W_k = \frac{Ac}{2E} \int_0^T \sigma^2(t) dt,$$

а повна енергія, що переноситься хвилею деформацію буде дорівнювати:

$$W = \frac{Ac}{E} \int_0^T \sigma^2(t) dt, \quad (18)$$

Існують різні випадки передачі енергії удару пружному робочому інструменту певної довжини від ударника, площа поперечного перерізу якого може бути рівною, меншою, або більшою площі поперечного перерізу робочого інструменту.

В нашому випадку площа поперечного перерізу ударника  $A_1$  більше площі поперечного перерізу робочого інструменту  $A_2$  ( $A_1 > A_2$ ). При зіткненні робочого інструменту з ударником, у якого площа поперечного перерізу більша, чим у робочого інструменту, від контакту зіткнення по робочому інструменту починає розповсюджуватися хвиля стискання, швидкість часток в якій більше, чим у хвилі ударника (рис.2).

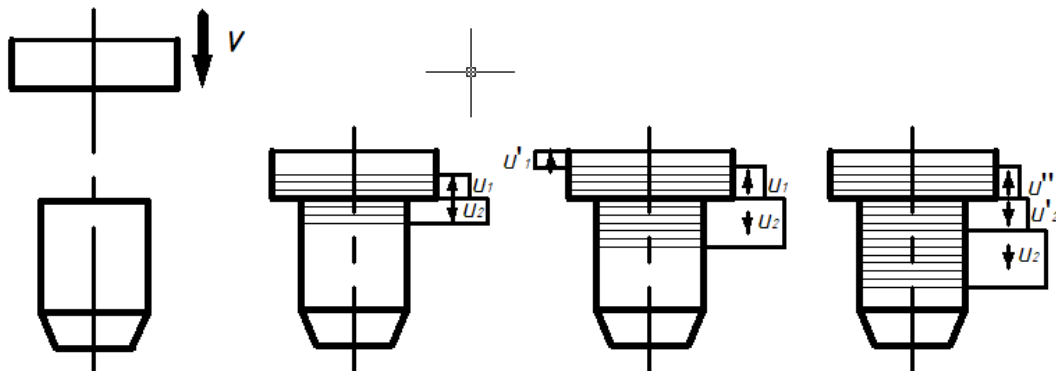


Рис.2. Схема передачі енергії удару робочому інструменту меншої чим у ударника площі поперечного перерізу

На контактні зіткнення сила, що діє на ударник, рівна силі, що діє на робочий інструмент. Тому враховуючи залежність (14), можна записати:

$$P = A_1 \rho c u_1 = A_2 \rho c u_2, \quad (19)$$

З даної формули випливає, що:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{u_1}{u_2},$$

але

$$A_1 > A_2,$$

значить

$$u_1 > u_2.$$

При ударі зі швидкістю  $v$  по робочому інструменту, як вже відмічалось, в ударнику поблизу контакту виникає пружна хвиля деформації стискання. Поверхня торця ударника і паралельні їй перерізи, що охоплені хвилею, рухаються зі швидкістю  $u_1$  по відношенню до вільного торця

ударника. З іншої сторони контакту виникає пружна деформація стискання в робочому інструменті зі швидкістю руху часток  $u_2$ . Із умови рівності просторових швидкостей контактуючих кінців ударника робочого інструменту на протязі зіткнення впливає, що:

$$v - u_1 = u_2 \quad (20)$$

Виходячи із залежності (20) можна записати, що:

$$u_2 > \frac{v}{2} > u_1. \quad (21)$$

При відбитті від вільного торця ударника швидкість часток у хвилі подвоюється і вільна поверхня ударника набуває швидкості  $v - 2u_1$ . Переміщуючись від вільного торця до контакту зіткнення, фронт хвилі розтягу послідовно розвантажує ударник від напруження стискання, причому вільні від напруження перерізи ударника набувають швидкості  $v - 2u_1$ . Дійсно, просторова швидкість перерізу в стиснутій частині рівна  $v - u_1$  (20) і направлена в сторону удару. У хвилі розтягу швидкість  $u'_1 = u_1$  і направлена в протилежну сторону. При складанні хвиль сумарна просторова швидкість перерізу ударника складе:

$$v - u_1 - u'_1 = v - 2u_1$$

При досягненні хвилею напруження контактної поверхні ударник виявляється ненавантаженим, але він має просторову швидкість:

$$v - 2u_1 \neq 0.$$

В результаті від контакту зіткнення починають розповсюджуватися нові хвилі стискання зі швидкістю відповідно  $u'_1$  і  $u'_2$ , і так продовжується до повного затухання удару. Тривалість кожної ступені у хвилі стискання робочого інструменту буде рівна  $t = \frac{2L_1}{c}$ .

Коефіцієнт передачі енергії удару в даному випадку знаходиться наступним чином [2]. Замінивши  $\sigma$  на  $\frac{P}{A}$  в формулі (14), позначимо добутки  $A_1\rho_1c_1 = z_1$  і  $A_2\rho_2c_2 = z_2$ . Тоді вираз (19) запишеться у вигляді:

$$z_1u_1 = z_2u_2 \quad (22)$$

Вирішуючи спільно рівняння (20) і (21) і вводячи позначення  $r = \frac{z_1}{z_2}$ , отримаємо:

$$u_1 = v \left[ \frac{1}{r+1} \right], \quad (23)$$

$$u_2 = v \left[ \frac{r}{r+1} \right]. \quad (24)$$

Очевидно, що в такому ж вигляді може бути записана формула для  $u'_2$ , в якій швидкість  $v$  повинна бути замінена на  $v - 2u_1$ :

$$u'_2 = (v - 2u_1) \left[ \frac{r}{r+1} \right].$$

Підставивши замість швидкості  $u_1$  її вираз (23), отримаємо:

$$u'_2 = u_2 \left[ \frac{r-1}{r+1} \right]. \quad (25)$$

Розмірковуючи аналогічним чином, знаходимо для  $n$ -ї ступені швидкість:

$$u_2^{(n)} = u_2 \left[ \frac{r-1}{r+1} \right]^n \quad (26)$$

Повна енергія у хвилі стискання, що переміщується по робочому інструменту визначається із формули [2]:

$$W = \frac{A_2 c_1 t \sum \sigma_2^2}{E_2} = \frac{2A_2 L_1}{E_2} \left[ (\sigma_2^2 + \sigma_{21}^2 + \dots + \sigma_{2(n-1)}^2) + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \sigma_{2n}^2 \right] \quad (27)$$

де  $n$  - позитивне ціле число  $\frac{L_2}{L_1} \geq n > \frac{L_2}{L_1} - 1$ ;  $L_2$  - довжина робочого інструменту;  $\sigma_2, \sigma_{21}, \dots, \sigma_{2n}$  - амплітуда напруження в кожному кроці хвилі стискання, що розповсюджується по робочому інструменту.

Використовуючи формулу (14) і підставляючи замість величини  $\sigma$  її вираз через  $u_2$  (24–26), отримаємо:

$$W = 2A_2 L_1 \rho_2 v^2 \left[ \frac{r}{4} (1 - k^n) + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \frac{r^2 k^{n+1}}{(r+1)^2} \right], \quad (28)$$

де

$$k = \frac{r-1}{r+1}$$

Кінетична енергія ударника пере зіткненням дорівнює:

$$W_y = \frac{A_1 L_1 \rho_1 v^2}{2},$$

і відповідно коефіцієнт передачі енергії буде визначатися за формулою [2]:

$$\eta = \frac{W}{W_y} = \frac{A_2}{A_1} \left[ r(1 - k^n) + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \frac{4r^2 k^{n+1}}{(r+1)^2} \right] \quad (29)$$

Якщо  $\rho_1 = \rho_2$ ,  $c_1 = c_2$ , то

$$\eta = 1 - k^n + \left(\frac{L_2}{L_1} - n\right) \frac{4rk^{n+1}}{(r+1)^2}. \quad (30)$$

Аналіз даної формули показує, що чим вищої висоти робочий інструмент, тим повніше передається на нього енергія.

**Висновки.** В статті розглянуто питання про процеси і явища, що виникають в системі ударник машини – робочий інструмент – матеріал – основа, а саме: приведено загальну уяву про зіткнення елементів; розглянуто процес передачі енергії при виконанні технологічних операцій легкої промисловості. Визначається коефіцієнт передачі енергії удару від ударника до робочого інструменту.

#### Список використаних джерел:

1. Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – №5 – С.1 – 15.
2. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – Л: Недра, 1977. – 159 с.
3. Кармаліта А.К., Поліщук О.С. Перспективи застосування електромагнітних приводів в легкій промисловості // Вісник технологічного університету Поділля. - 1997. - №1. Ч.2. - С.131-133.
4. Поліщук О.С., Пильник Є.Р., Прибега Д.В., Кармаліта А.К. Перспективи застосування лінійних індукційно-динамічних двигунів в якості приводу пресового обладнання для виконання технологічної операції вирубування деталей взуття // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – №2 Т. 2. – С. 203 – 205.
5. 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.
6. Александров Е.В., Соколовский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 198с.

#### 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 13.06.2018

УДК 656.1

**Н.В. Пономарьова, Т.В. Волкова***Харківський національний автомобільно-дорожній університет***АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИКОРДОННИХ ПУНКТІВ ПРОПУСКУ В ЄДИНОМУ МИТНОМУ ПРОСТОРИ КРАЇНИ**

*Ефективність впровадження світових стандартів у митний простір України залежить від існуючої та резервної технічної оснащеності, а також від пропускної спроможності прикордонних пунктів пропуску (ППП). В рамках дослідження проаналізовані існуючі ППП автомобільного вантажного та пасажирського виду транспорту. Означені основні аспекти функціонування ППП та виділені ті, які не задовольняють попиту на виконання митних процедур.*

*Ключові слова:* прикордонний пункт пропуску, митна політика, швидкість оформлення транспортних засобів, види митного контролю.

**Н.В. Пономарёва, Т.В. Волкова****АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОГРАНИЧНЫХ ПУНКТОВ ПРОПУСКА В ЕДИНОМ ТАМОЖЕННОПРОСТРАНСТВЕ СТРАНЫ**

*Эффективность внедрения мировых стандартов в таможенное пространство Украины зависит от существующей и резервной технической оснащенности, а также от пропускной способности пограничных пунктов пропуска (ППП). В рамках исследования проанализированы существующие ППП автомобильного грузового и пассажирского вида транспорта. Указаны основные аспекты функционирования ППП и выделены те, которые не удовлетворяют спросу на выполнение таможенных формальностей.*

*Ключевые слова:* пограничный пункт пропуска, таможенная политика, скорость оформления транспортных средств, виды таможенного контроля.

**N.V. Ponomareva, T.V. Volkova****ANALYSIS OF THE MODERN STATUS OF THE FUNCTIONING OF BORDER CHECKPOINTS IN THE UNIFIED CUSTOMS SPACE OF THE COUNTRY**

*The effectiveness of the introduction of world standards in the customs space of Ukraine depends on the existing and reserve technical equipment, as well as on the capacity of border checkpoints (BCP). Within the framework of the study, the existing BCPs of the cargo and passenger automobile transport were analyzed. The main aspects of the BCP functioning are indicated and those that do not meet the demand for customs formalities are identified. Increasing the technical equipment of points of passage through the state border and improving their work allows obtaining additional revenues from the growth of the volume of transportation in Ukraine, increasing tax revenues to budgets of different levels, and improving the use of industrial infrastructure. Effective work of checkpoints can help attract investment, including foreign, aimed at implementing large-scale projects to radically improve the supply of industrial and technical equipment, and create new jobs in the field of international transport services.*

*Keywords:* border checkpoint, customs policy, speed of vehicles registration, types of customs control

**Постановка проблеми.** Сучасний етап реалізації митної політики України характеризується постійним зростанням обсягів і розширенням масштабів міжнародної торгівлі, ускладненням та посиленням динамізму торговельних процесів, посиленням вимог міжнародних організацій щодо забезпечення вільного доступу іноземних товарів на внутрішні ринки та зниженням національних торговельних бар'єрів.

Розташування України на шляху основних транзитних потоків між Європою та Азією, наявність незамерзаючих морських портів, розгалуженої мережі залізниць та автомобільних доріг, трубопроводів створюють сприятливі умови для активізації вантажопотоків у напрямках «Північ-Південь», «Захід-Схід». В Україні як державі, що претендує на повноправне членство в Європейському союзі, необхідно формувати митну політику з дотриманням вимог світових організацій. Міжнародний процес модернізації митної справи торкнувся також України. Прийняття Рамкових стандартів безпеки та спрощення міжнародної торгівлі, які розроблені Всесвітньою митною організацією, а також приєднання до Конвенції про спрощення та гармонізацію митних процедур стало новою точкою відліку в розвитку державної митної справи в Україні [1].

Державна митна політика є складовою частиною державної економічної політики [2]. Основним завданням митної політики є захист митних інтересів та забезпечення митної безпеки України, регулювання зовнішньої торгівлі, захисту внутрішнього ринку та стабілізації економіки України. Ефективна митна політика держави відіграє чи не найбільшу роль у здійсненні зовнішньоекономічної діяльності та забезпеченні привабливого інвестиційного середовища.

На сьогоднішній день взаємодія митних і контролюючих органів з підприємством безсистемна. Митниця не може завершити митний контроль без дозволів інших контролюючих служб, що в свою чергу провокує затримки митного оформлення та черги наППП.

Євроінтеграційний курс розвитку України обумовлює необхідність модернізації транспортно-митної інфраструктури, що, у свою чергу, вимагає вирішення низки проблем у даній сфері, зокрема, покращення інфраструктурної забезпеченості національної мережі міжнародних транспортних коридорів та підвищення пропускної спроможності ПППУ країни, зокрема автомобільних [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У науковій літературі значна увага приділяється дослідженню питань, що стосуються сучасного стану та перспектив розвитку митної політики країни. Зокрема, вивченням зазначеної проблематики займаються Бакурова А., Собкевич О., Овруцкая Т., Кучерук Г., Пасічник А. та ін. Логістизація митної справи, тобто впровадження до її інструментарію логістичних прийомів та засобів, - безперервний процес, який охоплює усі складові цього багатоманітного виду державної діяльності, в першу чергу процедури митного контролю. Даний напрямок має за основу аналіз митно-логістичних потоків, тобто потоків пов'язаних з перетином митного кордону України та справлянням відповідних митних зборів та платежів. Усе більш відчутним стає відставання митного контролю від сучасних потреб пропускної здатності та світових стандартів контролю товару. Однією із найважливіших проблем, з якою стикнулись митні органи при запровадженні електронного декларування, є законодавча неврегульованість діяльності різних органів влади. Впровадження електронних технологій повинно носити міжвідомчий характер. Важко забезпечити ефективне функціонування такої системи лише в одній структурі, оскільки державні органи взаємодіють між собою.

Логістика повинна забезпечити узгодженість матеріальних (товарних), інформаційних та фінансових потоків у митній діяльності, оптимальну технологію переміщення товарів через митний кордон з метою прискорення цього процесу, а також відпрацювання стандартних логістичних вимог як по відношенню до митних режимів, так і до учасників зовнішньоторговельної діяльності.

Дослідження зовнішньоекономічних операцій, а саме експорту, імпорту та транзиту вантажів у ракурсі використання різних видів транспорту є одним із важливих аспектів аналізу транспортно-митної інфраструктури держави. В розрізі напрямку руху транспорту (в'їзд-виїзд) найбільш завантаженими є українсько-польська та українсько-білоруська ділянки митного кордону. Основна ж частка транзитних вантажних автомобілів припадала на українсько-молдовську та українсько-білоруську ділянки. Проте, незважаючи на наявність значних позитивних зрушень, транспортна система України все ще потребує суттєвого удосконалення та розвитку [4].

Одним із шляхів вдосконалення процедур митного контролю є спрощення процедур, необхідних для митного оформлення. Скорочення переліку документів, необхідних для митного контролю, означає можливість виведення їх за межі митного оформлення. Тобто документи, необхідні для реалізації імпортованої продукції на території України, суб'єкт ЗЕД може отримати після завершення митного оформлення товарів. Необхідними є документи, які використовуються у нетарифному регулюванні при митному оформленні: ліцензії Мінекономіки на експорт та імпорт товарів, документи з експортного контролю товарів, дозволи Національного банку на переміщення валютних цінностей. А також документи, які мають вплив на нарахування податків та платежів, зокрема, це контракти, рахунки, специфікації та документи, безпосередньо необхідні для переміщення самого товару.

Проведення митного контролю через певний час після завершення митного оформлення є найбільш перспективним напрямом поліпшення роботи митних органів. З метою сприяння зовнішній торгівлі та збільшенню товарообігу митні органи спрощують процедури митного контролю при митному оформленні на кордоні [5].

**Постановка завдань.** В роботі поставлена метапроаналізувати основні аспекти функціонування існуючих ППП в митному просторі країни та обрати ті, які не задовольняють попиту на виконання митних процедур.

**Викладення основного матеріалу.** Недостатня координація діяльності державних підрозділів і відомств, що відповідають за контроль транскордонних переміщень, негативно відбивається на торгівлі. Режим в ППП через державний кордон України включає правила в'їзду в ці пункти перебування та виїзду з них осіб, транспортних засобів, ввозу та знаходження вантажів, товарів та тварин, які встановлюються виключно в інтересах створення необхідних умов для

виконання державного, санітарно-епідеміологічного, ветеринарно-санітарного, фітосанітарного, екологічного та інших видів контролю.

Основна мета режиму, що вводиться полягає у створенні в ППП визначеного комплексу організаційних дозволяючих заходів та режимних обмежень, а також виключити доступ на територію ППП сторонніх осіб, транспортних засобів та вантажів щодо незаконного пересічення державного кордону.

У пунктах пропуску через державний кордон України, в яких забезпечено функціонування комплексів автоматизованого контролю за переміщенням радіоактивних речовин та ядерних матеріалів, радіологічний контроль вважається завершеним, якщо товари випущені з пункту пропуску через державний кордон України для переміщення їх у митницю призначення. У такому разі інформаційна система на підставі відмітки посадової особи ДФС України про пропуск товарів автоматично формує відмітку про здійснення радіологічного контролю[6]. Результати контролів, які здійснено на кордоні, вносяться до ІТ- системи відповідними контролюючими органами. Інформаційна система повідомляє відповідний контролюючий орган про автоматично сформовані рішення щодо здійснення відповідного виду державного контролю [7,8].

Усього у митному просторі України функціонує 100 ППП для автомобільного транспорту (вантажних, пасажирських). Територія України має спільні кордони з сімома країнами (рис.1) [9].

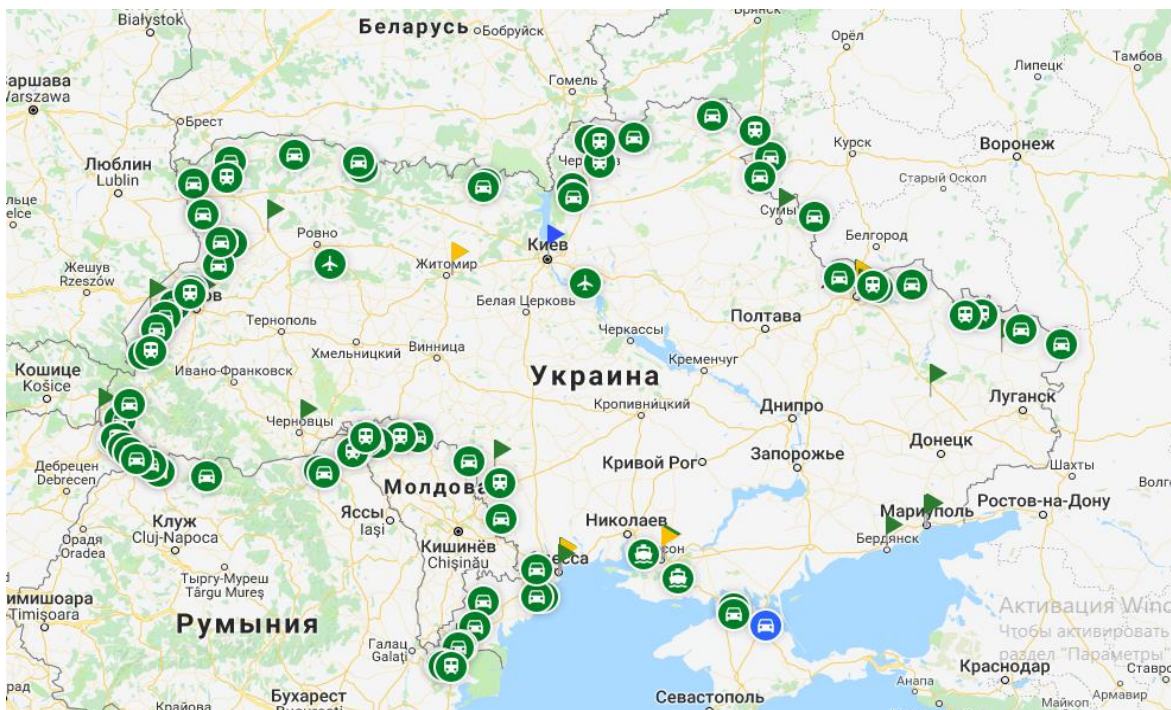


Рис.1. Скріншот інтерактивної мапи України, щодо розміщення ППП

Таким чином на кордоні з Польщею розташовано усього ППП 14 у тому числі 8 автомобільних, на кордоні із Словачькою Республікою – 6 ПППу тому числі 2 автомобільних, на кордоні з Угорщиною – 7 ПППу тому числі 5 автомобільних, на кордоні з Румунією – 10 ПППу тому числі 3 автомобільних, на кордоні з Молдовою – 54 ПППу тому числі 41 автомобільних, на кордоні з Російською Федерацією – 31 з них 23 автомобільних, на кордоні з Білорусією – 27 з них 20 автомобільних.

За допомогою інтерактивної мапи Державної прикордонної служби України були проаналізовані ППП за наступними критеріями: категорія ППП, характер перевезень, режим роботи ППП, швидкість пропуску транспортних засобів (табл. 1). Для характеристики ППП були виділені наступні категорії: міжнародні (для пропуску громадян та транспортних засобів усіх держав); міждержавні (для пропуску громадян України та громадян суміжних держав, а також транспортних засобів, що їм належать); місцеві (для спрощеного пропуску громадян України та громадян суміжних держав, які проживають в прикордонних областях (районах), а також транспортних засобів, що їм належать).



Таблиця 1.

## Характеристика автомобільних ППП

Назва ППП	Категорія ППП			Характер перевезень		Режим роботи	Швидкість пропуску, ТЗ./год
	міжна-род-ний	між-державний	місце-вий	вантажний	паса-жир-ський		
Солотвино-Сігету Мармаціей	+	-	-	+	до 3,5 т	Ц/Д	65
Пулемець-Томашівка	+	-	-	+	+	Ц/Д	6
Доманове - Мокрани	+	-	-	+	+	Ц/Д	30
Дольськ - Мохро	+	-	-	+	+	Ц/Д	20
Gorodishche - Verhniy-Terebezhiv	+	-	-	-	+	I/B	20
Виступовичі – Нова Рудня	+	-	-	+	+	Ц/Д	14
Славутич - Комарин	+	-	-	+	+	Ц/Д	15
Нові Яриловичі – Нова Гута	+	-	-	+	+	Ц/Д	15
Сеньківка - Веселівка	+	-	-	+	+	Ц/Д	15
Грем`яч - Погар	+	-	-	+	+	Ц/Д	15
Катеринівка - Крупець	+	-	-	+	+	Ц/Д	65
Бачівськ - Тросбортне	+	-	-	+	+	Ц/Д	90
Юнаківка - Суджа	+	-	-	+	+	Ц/Д	60
Велика Писарівка - Грайворон	+	-	-	+	+	Ц/Д	55
Плетневка - Шебекино	+	-	-	+	+	Ц/Д	70
Танюшівка - Ровеньки	+	-	-	+	+	Ц/Д	60
Просяне-Бугайовка	+	-	-	+	+	Ц/Д	65
Кучурган- Первомайськ	+	-	-	+	+	Ц/Д	65
Чонгар (Салькове)	-	-	+	-	+	I/B	I/B
Каланчак	-	-	+	-	+	I/B	I/B
Старокозаче - Тудора	+	-	-	+	+	Ц/Д	35
Нові Трояни – ЧаDIR Лагуна	+	-	-	+	+	Ц/Д	6
Серпневе 1 – Басараб`яска	+	-	-	+	+	Ц/Д	3
Платонове – Гоянул Ноу	+	-	-	+	+	Ц/Д	11
Болган - Хрїстова	+	-	-	+	+	Ц/Д	8
Могилів – Подільський – Отач*	+	-	-	+	+	Ц/Д	43
Росошани - Брїченъ	+	-	-	+	+	I/B	I/B
Порубне - Сїрет*	+	-	+	+	+	Ц/Д	58
Солотвино-Сігету Мармаціей	+	-	-	-	до 3,5 т	Ц/Д	65
Дякове-Халмеу*	+	-	-	+	+	Ц/Д	60
Вилок - Тїсабеч	+	-	-	-	+	Ц/Д	65
Лужанка - Берегшуранъ	+	-	-	+	+	Ц/Д	65
Косино-Барабаш	+	-	-	-	+	7:19	50
Дзвїнкове – Лонья	+	-	-	-	+	8:16	40
Смїлнїца - Кросценко	+	-	-	до7,5	+	Ц/Д	42
Шегинї – Медика*	+	-	-	+	+	Ц/Д	66
Грушїв - Будомеж	+	-	-	-	до 3,5 т	Ц/Д	41
Рава Руська – Хребенне*	+	-	-	+	+	Ц/Д	68
Угринїв - Долгобичув	+	-	-	+	+	Ц/Д	42
Устїлуг - Зосїн	+	-	-	+	+	Ц/Д	46
Ягодин – Дорогуськ*	+	-	-	+	+	Ц/Д	55

Умовні позначення: \* - наявність черг на ППП; Ц/Д – режим роботи ППП цілодобово; I/B – інформація відсутня.

Отже, проаналізувавши можна зробити наступні висновки, такі ППП як: Могилів – Подільський – Отач, Порубне – Сїрет, Дякове-Халмеу, Шегинї – Медика, Рава Руська – Хребенне,



Ягодин – Дорогуськ не задовольняють попит на виконання митних процедур, чим обумовлюються постійні черги.

**Висновки.** Таким чином, не дивлячись на достатньо розгалужену мережу ППП по державному кордоні України, існують ППП, які враховуючи певну пропускну спроможність не відповідають обсягу попиту на виконання митних процедур. Тому у загальному випадку пріоритетними напрямками розвитку митної справи в Україні мають стати наступні: запровадження на всіх ППП спільного митного контролю, що дасть змогу, спільно використовуючи існуючу митну інфраструктуру переймати досвід та форми митного контролю сусідів; спрощення та модернізація процедур під час перетинання товарами і транспортними засобами митного кордону України, впровадження процедури «єдиного вікна»; розвиток мережі вантажних митних комплексів і логістичних центрів.

Перспективою даного дослідження є деталізація параметрів функціонування ППП, які мають постійні черги та побудова регресійної моделі проходження видів транспорту через ППП. В якості критерія ефективності передбачається використання загальних витрат часу фізичних та юридичних осіб при проходженні їх через ППП.

### Література

1. Про приєднання України до Міжнародної конвенції про спрощення і гармонізацію митних процедур у змінній редакції згідно з Додатком I до Протоколу про внесення змін до Міжнародної конвенції про спрощення та гармонізацію митних процедур [Електронний ресурс] Офіційний сайт [www.zakon3.rada.gov.ua](http://www.zakon3.rada.gov.ua): Режим доступу <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/227-16>.
2. Митний кодекс України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://sfs.gov.ua/mk/>
3. Вакульчик О. М. Використання досвіду ЄС в побудові системи законо-давчого та методичного забезпечення митного постаудиту в Україні / О.М. Вакульчик, Т. С. Єдинак, О. О. Книшек // Вісник Академії митної служби України. Серія: «Економіка». – 2013. – № 2 (50). – С. 11–23.
4. Кучерук Г. Масштаби та структура міжнародної торгівлі транспортними послугами / Г. Кучерук, В. Віденко // Збірник наукових праць ДЕ ТУТ. Серія «Економіка і управління». – 2013. – Вип. 23-24.
5. Гребельник О.П. Митна справа: [підручник] / О.П. Гребельник; 4-те вид., оновл. та доповн. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 472 с.
6. Постанова Кабінету Міністрів України «Деякі питання реалізації принципу “Єдиного вікна” під час здійснення митного, санітарно-епідеміологічного, ветеринарно-санітарного, фітосанітарного, екологічного, радіологічного та інших видів державного контролю» від 25 травня 2016 р. № 364 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/364-2016-p>
7. Концепція проекту «Єдине вікно - локальне рішення» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.singlewindow.org/conception>
8. Горобець В. "Єдине вікно" на митниці [Електронний ресурс] / Віталій Горобець. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://biz.censor.net.ua/columns/3008083>.
9. Офіційний сайт Державної прикордонної служби України. Інтерактивна мапа [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dpsu.gov.ua/ua/map>

### Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. Войтов В.А., Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Васеленка, Харків.

д-р техн. наук, проф. В.П. Волков, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

Стаття надійшла до редакції 19.06.2018

УДК 621.923.1

**Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як,  
П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

### **КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ PDC-ДОЛІТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ**

*В статті розглянуто проблему розміщення різців на лопатях долота типу PDC. Встановлено, що при традиційних схемах розміщення не забезпечується рівномірне спрацювання різців, які встановлені на різних радіусах лопатей долота. З метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях, обґрунтовано доцільність використання параболічної спіралі Вогеля. Встановлено, що таке розміщення різців забезпечує однакову стійкість до спрацювання в процесі руйнування гірської породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота, і відповідно, навантаження компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем.*

*В статті розглянуто проблему розміщення різців на лопатях долота типу PDC. Встановлено, що при традиційних схемах розміщення не забезпечується рівномірне спрацювання різців, які встановлені на різних радіусах лопатей долота. З метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях, обґрунтовано доцільність використання параболічної спіралі Вогеля. Встановлено, що таке розміщення різців забезпечує однакову стійкість до спрацювання в процесі руйнування гірської породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота, і відповідно, навантаження компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем.*

*Ключові слова: долота PDC, різці м різцем., схема розміщення різців, експлуатаційні показники, спіральні моделі.*

**Т.А. Пригоровская, П.И. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Питудей, Л.Я. Ропьяк,  
П.М. Присяжнюк, М.И. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

### **КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЕСПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ PDC-ДОЛІТ ДЛЯ ПОВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗАТЕЛІВ**

*В статті розглянуто проблему розміщення різців на лопатях долота типу PDC. Встановлено, що при традиційних схемах розміщення не забезпечується рівномірний знос різців, які встановлені на різних радіусах лопатей долота. З метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях, обґрунтовано доцільність використання параболічної спіралі Вогеля. Встановлено, що таке розміщення різців забезпечує однакову стійкість до спрацювання в процесі руйнування гірської породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота, і відповідно, навантаження компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем.*

*Ключові слова: долота PDC, різці, схема розміщення різців, експлуатаційні показники, спіральні моделі.*

**T.O. Pryhorovska, P.I. Voytenko, V.V. Vryukalo, L.D. Pitulej, L.Ya. Ropyak, P.M. Prysyzhnyuk,  
M.Y. Burda, D.L. Lutsak, L.D. Lutsak**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

### **PDC DRILL BIT PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THEIR PERFORMANCE INDICATORS INCREASING**

*The problem of placing the reeds on the blades of a bit of type PDC is considered in the article. It is established that under traditional schemes of placement the uniform operation of the teeth, which are installed on different radius of the blades of a bit, is not provided. With the purpose of rational placement of rock-cutting elements on the shovels, the expediency of using the Vaugel parabolic spiral was substantiated. It is established that such a placement of cutters provides the same stability to trigger during the destruction of rock. Increasing the cutting path with the distance to the periphery of the bit, respectively, the load is offset by a decrease in the width of the zone of destruction of the rock with each cutter.*

*Key words: PDC bit, cutters, chip placement diagram, performance indicators, spiral models.*

**Постановка проблеми.** Проблеми оптимізації процесу конструювання, виготовлення та експлуатації породоруйнівного інструменту увійшли в Національну програму забезпечення України паливно-енергетичними ресурсами "Нова енергетична стратегія України до 2035 року. Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" [1], згідно з якою планується збільшення національного газу і нафто видобутку, зокрема нетрадиційного газу та видобутку на шельфі.

Породоруйнівний інструмент є головним елементом бурового обладнання, оскільки безпосередньо здійснює руйнування гірської породи. Дослідники приділяють значну увагу коливанням бурильної колони [2], удосконаленню конструкцій доліт [3], кріпленню зубців [4],

© Т.О. Пригоровська, П.І. Войтенко, В.В. Врюкало, Л.Д. Пітулей, Л.Я. Роп'як,  
П.М. Присяжнюк, М.Й. Бурда, Д.Л. Луцак, Л.Д. Луцак

експериментальним дослідженням стійкості різців [5], дослідженню схем розміщення різців за спіральними моделями [6].

Показники відпрацювань бурових доліт, в першу чергу, залежать від якості бурового інструменту та його технічних характеристик, що підтверджується світовим досвідом, де роботи, спрямовані на вдосконалення конструкцій інструменту не припиняються.

Найбільш поширеними при бурінні свердловин є долота типу PDC та шарошкові долота. У шарошкових долотах складно забезпечити захист підшипникових опор від проникнення промивної рідини з абразивними частинками зруйнованої породи. Ненадійна герметизація опор призводить до передчасного спрацювання контактних поверхонь підшипників, заклинювання шарошок і необхідності заміни такого долота з ще роботоздатними породоруйнівними елементами. Тому все ширшого застосування набувають долота типу PDC різально-сколюючої дії з вставними твердосплавними (алмазними) елементами, які є спадкоємцями лопатевих і коронкових доліт з природними алмазами, і не мають підшипникових опор.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різальна частина PDC-доліт характеризується профілем, кількістю і розміщенням різців. Для доліт вказаного типу, рекомендовано три типи різальної частини: плоска (або малий конус, де величина кута між твірною і площиною вибою на більше 20 градусів), обернено-конусна (або подвійний конус) та еліптичний конус. Форма профілю даних породоруйнівних інструментів відіграє важливу роль для таких характеристик конструкції, як стабільність, механічна швидкість буріння та здатність до спрямування. Його вибір залежить від проектних умов застосування долота при бурінні свердловин. Зокрема, різальна частина з видовженою конусною поверхнею (еліптична), забезпечує вищу стабільність роботи конструкції, а плоска форма використовується, при необхідності зміни напряму буріння стовбура свердловини [3].

Для вивчення сучасних тенденцій в конструюванні доліт PDC-типу було проаналізовано патенти, а також інформацію, представлену на сайтах провідних фірм-виробників породоруйнівних інструментів. Аналіз конструкції доліт показав:

1. Розробці конструкцій доліт та їх балансуванню приділяється значна увага. Наприклад, у Пат. США 8631883B2 від 21.01.2014 пропонується проектувати долота таким чином, щоби напрям і магнітуда сили реакції вибою для кожної лопаті долота були приблизно однаковими. Також, з метою стабілізації роботи інструменту, його озброюють різцями (або групами різців), встановленими з додатними, від'ємними та нульовими кутами для того, щоб об'єм породи, що зрізається кожною групою цих різців був однаковий (Пат. США 5314033 від 24.05.1994, Пат. США 5649604 від 22.07.1997, Пат. США 6443249B2 від 3.09.2002). В Пат. США 5732784 від 31.05.1998 пропонується оснащувати долота двома основними сполученими лопатями за аналогією до свердла, решта лопатей при цьому є значно менших розмірів. В Пат. США 6298930B1 від 9.10.2001 з метою уникнення дисбалансу запропоновано контролювати глибину різання і об'єм зруйнованої одним різцем породи. Шляхом розміщення центра мас долота специфічним чином автори Пат. США 6308790B1 від 30.10.2001 пропонують контролювати відхилення долота від вертикальної осі, і тим самим задавати траєкторію його руху. Теж саме пропонується і авторами Пат. США 6464024B2 від 15.10.2002 та Пат. США 6659207B2 від 9.12.2003 для біцентричних доліт.

2. Нерівномірне зношування різців доліт залишається актуальною проблемою. Конструктивними рішеннями його зменшення є такі. В Пат. США 8544568B2 від 1.10.2013 з метою зменшення шляху різання кожного різця, вводяться додаткові лопаті доліт меншого розміру з розміщеними на них зубцями. Автори Пат. США 560702 від 4.03.1997 та Пат. США 8181723B2 від 22.5.2012 пропонують оснащувати лопатеві долота різцями різних діаметрів, (почергово меншого і більшого), розміщеними на одній лопаті. В Пат. США 7703559B2 від 27.04.2010 та Пат. США 8011456B2 від 6.09.2011 пропонується конструкція різців, які обертаються навколо своїх осей з метою забезпечення рівномірного спрацювання їх алмазно-твердосплавних пластин.

3. З метою контролю об'єму гірської породи, зруйнованої одним різцем пропонується наступне. В конструкції долота передбачається наявність елементів, які призначені для "ламання" частинок породи, за аналогією до стружколабочів токарних різців (Пат. США 6.328.117 від 11.12.2001). Рекомендується використовувати ці долота для буріння пластичних порід. Для збільшення поверхні, на якій розміщені різці, лопаті долота виконують криволінійної форми із певним радіусом кривини (Пат. США 5443565 від 22.09.2000); цим забезпечується більша

поверхня контактування, збільшується зусилля різання шару породи, що зрізається за один оберт долота. Також пропонується оснащувати долота різцями більших розмірів, що розміщені на калібруючій поверхні долота – Пат. США 6349780В1 від 26.02.2002. Контрольована глибина різання конкретного різця забезпечується шляхом певної величини його «виступу», запропоновано в патентах США: 6460631В1 від 8.10.2002, 6779613В2 від 24.8.2004, 6935441В2 від 30.08.2005 та 8448726В2 від 28.05.13. Автори патентів США: 70969878В2 від 29.08.06, 7594554В2 від 29.09.09 та 7896106В2 від 1.03.11 пропонують також оснащувати основні різці додатковим рядом так званих «підтримуючих» різців меншого діаметру.

4. З метою кращого калібрування стінок свердловини, калібруючу частинудолотавиконують більшої довжини, що забезпечує збільшення кількості ріжучих елементів для калібрування (Пат. США 6.006.845 від 28.12.1999, Пат. США 5467836 від 21.11.1998, Пат. США 6253863В1 від 3.07.2001).

Результати проведеного аналізу конструкцій доліт свідчать, що дослідники основну увагу приділяють формі профілю долота. Однак, питання розміщення різців на лопатях долота для забезпечення їх рівномірного спрацювання, та однакової навантаженості різців, залишаються недостатньо вивченим, тобто не обґрунтовано за якими математичними залежностями їх доцільно розмішувати на лопатях долота.

**Постановка завдань.** При проектуванні PDC-доліт однією із проблем є розроблення конструкторських рішень, які б дозволили забезпечити рівномірне зношування всіх ріжучих елементів долота. Результати проведеного обстеження бурових доліт свідчать про їх нерівномірне спрацювання. На рис. 1 представлено фото зношеного долота, яке застосовували при бурінні свердловин в аргілітах і кам'яній солі (родовища Новоукраїнське, Чутове та Розпашна). Із фото видно, що найбільш зношеними є різці, що розміщені якнайдалі від осі долота. Тому проблема вибору схеми закономірності розміщення зубців на лопатях долота є актуальною.

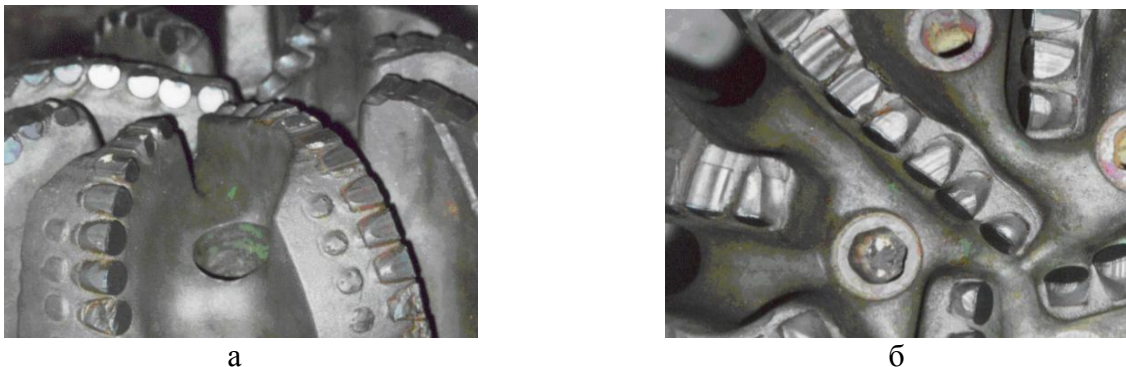


Рис. 1. Характер зношування різців долота 11 5/8 DS 66Н виробництва Reed-Hycalog: а – вигляд збоку; б – вигляд зверху

Мета роботи – удосконалення теоретичних підходів до конструкторсько-технологічного забезпечення виготовлення PDC-долота для підвищення експлуатаційних показників, а саме обґрунтування схеми розміщення різців на лопатях долота із умови забезпечення їх рівномірного спрацювання.

**Викладення основного матеріалу.** Традиційно для розміщення різців на лопатях долота використовують, переважно, послідовну схему їх розміщення (рис. 2) [3].

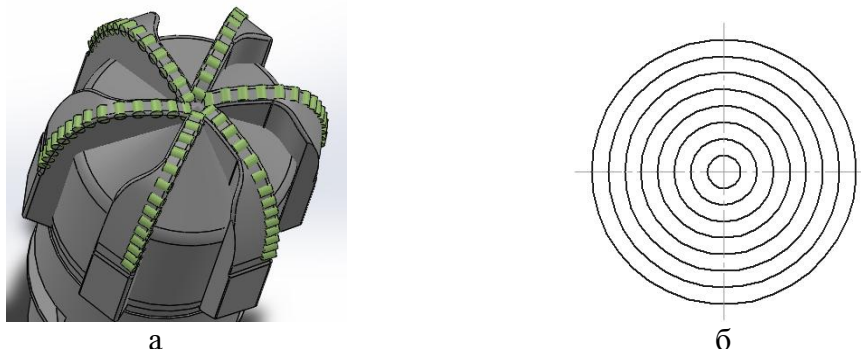


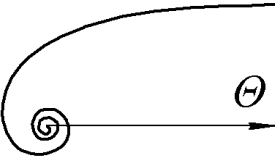
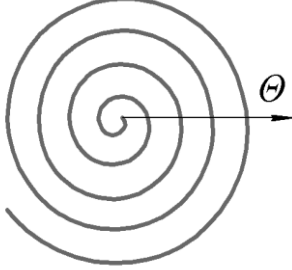
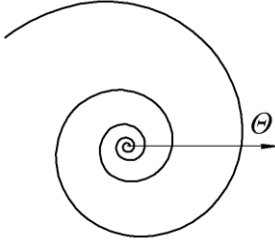
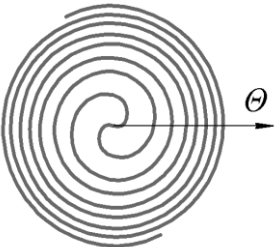
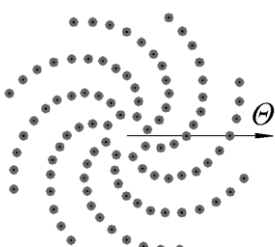
Рис. 2. Шестилопатеве долото із традиційною схемою розміщення різців (а) та уявні сліди переміщення різців при обертанні долота в свердловині (б)

Для забезпечення рівномірного спрацювання різців, доцільно розміщувати їх за криволінійними залежностями, при яких забезпечувалася різна величина віддалі між різцями, які встановлені на одній лопаті. Оскільки різальні вставні елементи найбільше спрацьовуються із віддаленням їх від осі обертання долота, то їх необхідно розташовувати таким чином, щоб крок між різцями зменшувався до периферії і не накладались їхні сліди для повного перекриття зон руйнування породи.

В таблиці 1 представлено рівняння і вид різних видів кривих, які використали для моделювання схеми розміщення різців на долоті.

Таблиця 1

**Рівняння і види кривих у полярній системі координат, які використали для моделювання схеми розміщення різців**

<p>1. Гіперболічна спіраль <math>r(\theta) = \frac{a}{\theta}</math></p> 	<p>2. Архімедова спіраль <math>r(\theta) = a + b\theta</math></p> 	<p>3. Логарифмічна спіраль <math>r(\theta) = ae^{b\theta}</math></p> 
<p>4. Спіраль Ферма <math>r(\theta) = \pm a\sqrt{\theta}</math></p> 	<p>5. Спіраль Вогеля <math>r = c \cdot \sqrt{n}</math>, <math>\theta = 137,5n</math></p> 	<p>Позначення у формулах: <math>\theta</math> – полярний кут, <math>r</math> – радіус-вектор, <math>a, b, c</math> – параметри, <math>n</math> – індекс простої квітки.</p>

Вивчивши і дослідивши особливості ряду математичних залежностей для спіралей (гіперболічна, Архімедова спіраль, логарифмічна спіраль, спіраль Ферма і спіраль Вогеля) встановили, що при проектуванні нових конструкцій бурових доліт типу РДС найдоцільніше використовувати логарифмічну спіраль, спіраль Вогеля або спіраль Ферма, оскільки таке розміщення різців забезпечує різну величину віддалі між різцями, які встановлені на одній лопаті. Крім цього спрощується програмування верстатів з числовим програмним керуванням для обробки отворів, які служать для встановлення різців на лопатях долота.

При використанні зазначених вище спіралей необхідно визначити коефіцієнти моделей, тобто коефіцієнти, що показують наскільки має бути зменшена віддаль між різцями, які встановлені на одній лопаті долота. Для визначення цього коефіцієнта моделювали рух долота у процесі поглиблення свердловини як черв'ячне зачеплення (рис. 3). При цьому одиничний різець буде переміщуватися по гвинтовій лінії під дією осьового навантаження та крутного моменту. В цьому випадку спостерігався наступний перерозподіл сил, що діють на різець: навантаження  $P_z$ , нормальна реакція поверхні  $F_{нов}$ , сила тертя  $F_{тр} = f \cdot F_{нов}$ , сила реакції породи  $R$  буде відхилена на кут тертя  $\varphi$  від сили  $F_{нов}$ .

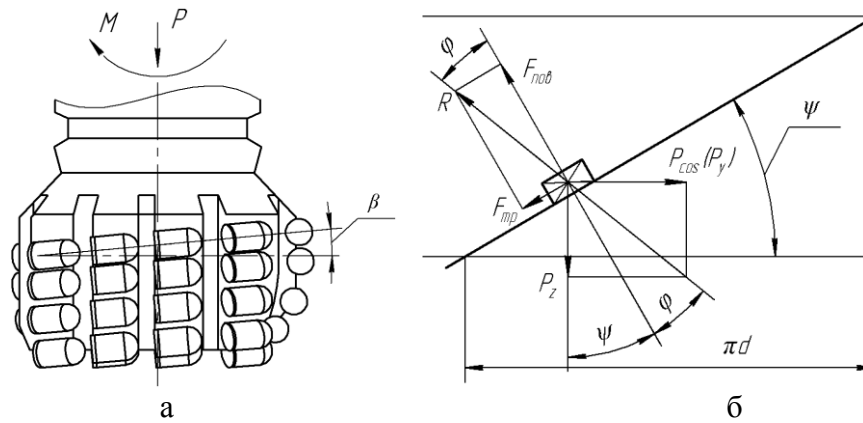


Рис. 3—Загальний вигляд долота (а) та схема визначенням кута  $\beta$  із умови самогальмування долота (б)

$P \cdot \cos(P_y) = P \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \beta)$ , де кут  $\beta$  – кут підйому гвинтової лінії, тобто утворений розгорткою гвинтової лінії по середньому діаметру розташування різців на поверхні долота та площиною, перпендикулярною до осі цього долота.

Таким чином, кут  $\psi = \beta$  визначається із умови самогальмування долота і буде становити  $\beta > \operatorname{arctg}(f / P_y)$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя між гірською породою та ріжучою частиною різця.

Для визначення величини зменшення віддалі між різцями, які розміщені на одній лопаті, використали наступне співвідношення для спіралі Ферма:

$$\alpha = \operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{R_i}{R_{i+1}}, \text{ де } R_i \text{ та } R_{i+1} - \text{радіуси встановлення } i\text{-го та } i+1 \text{ різців відповідно.}$$

Залежності, представлені в таблиці 1, доцільно використовувати при розробці системи автоматизованого проектування бурових доліт типу PDC з гвинтоподібними лопатями. Подібні конструкції доліт виготовляються ТЗОВ "Інтербур", м. Івано-Франківськ.

Розміщення твердосплавних різців на лопатях долота згідно запропонованої схеми забезпечує руйнування породи різанням та різанням-сколюванням по всій поверхні вибою, що запобігає утворенню міжзубцевих виступів у гірській породі.

Для ріжучої частини різців застосовують різноманітні матеріали. Сьогодні освоєно промисловий випуск АТП (УкрНІІМ), пластин Стратапакс, PDC (Дженерал Електрик) і пластин із синтетичних алмазів типу АВС, АСПК, Такмена та інших, не тільки у вигляді штабиків діаметром 4 мм і висотою 4 мм, але і пластин круглої циліндричної форми 13,5 мм з товщиною алмазного шару 0,8-2,0 мм і висотою 4-4,5 мм. Ефективність роботи різців з синтетичними полікристалічними алмазами підвищується не тільки за рахунок алмазного матеріалу з найкращим ударним і абразивним опором, але також і за рахунок кріплення алмазного шару до твердосплавних поверхні. Ребриста поверхня забезпечує механічне зачеплення між алмазної пластиною і карбідвольфрамовою підкладкою і являє собою велику площу поверхні для дифузії кобальту. Удосконалення конструкції АТП в частині ударної жорсткості внесли свій внесок в підвищення абразивного опору за рахунок зниження ледь виявленого мікросколювання алмазних пластин.

Для забезпечення ріжучої здатності бурових доліт також здійснюють локальне наплавлення робочих поверхонь, наприклад, з використанням карбідних матеріалів або безкарбідних матеріалів, які утворюються із суміші, що забезпечує протікання реакцій самопоширюючогося високотемпературного синтезу надтвердих тугоплавких сполук титану ( $TiB_2$  та  $TiC$ ), які формуються при електродуговому напавленні у вигляді дисперсних включень, які рівномірно розподіляються у сталевій матриці. Вміст надтвердих сполук становить близько 50% за об'ємом, що дозволяє забезпечити ефективну протидію зношуванню за умов динамічних навантажень [7].

Запропонована схема розміщення різців на долоті забезпечує однакове силове навантаження цих різців, і відповідно, сприяє рівномірному спрацюванню цих різців в процесі руйнування породи. Збільшення шляху різання з віддаленням до периферії долота компенсується зменшенням ширини зони руйнування гірської породи кожним різцем долота та зниженням його навантаження.

**Висновки.** Показники відпрацювань бурових доліт, в першу чергу, залежать від якості їх виготовлення та технічних характеристик.

Розроблено математичну модель для оптимізації схеми розміщення породоруйнівних різців з метою повного перекриття ними зони руйнування гірської породи, забезпечивши їх рівномірне навантаження та уникнення накладання траєкторій руху різців долота.

При автоматизованому проектуванні різальної частини доліт типу PDC з метою раціонального розміщення породоруйнівних елементів на лопатях доцільно використовувати логарифмічну спіраль або спіраль Вогеля. Для доліт з криволінійними лопатями доцільно використовувати модель Вогеля.

#### Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605 р. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>.
2. Левчук К. Г. Вплив механічних властивостей матеріалу на динаміку прихоплених бурильних труб [Текст] / К. Г. Левчук, В. М. Мойсишин, І. В. Цідило // *Металлофізика и новейшие технологии*. – 2016. – Т. 38. – № 12. – С. 1655-1668.
3. Кунцяк Я.В. Удосконалення конструкцій породоруйнівного інструменту, оснащених полікристалічними алмазними різцями / Я.В. Кунцяк // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2012. – №1 (42). – С. 57-67.
4. Шуляр І. О. Розрахунки з'єднань із натягом у шарошках, оснащених композиційними зубцями зі сталевим хвостовиком / І. О. Шуляр, І. П. Шацький, В. А. Корнута, Л. Я. Роп'як // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2013. – № 1. – С. 126-133.
5. Пригоровська Т.О. Probabilistic estimate of PCD drill bit wear rate / [Т.О.Пригоровська, С.С.Чаплінський] // *Науковий вісник НГУ: геотехнічна і гірнична механіка, машинобудування*. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2014. – № 5. С. –184-189.
6. Войтенко П.І. Використання математичних моделей спіралей з логарифмічним кроком для раціонального розміщення вставних твердосплавних зубків на лопатях бурових доліт типу PDC / П.І. Войтенко, В.В. Врюкало // *Матеріали 22 Міжнародної конференції «Известия академической науки», 2017р, 22 - 30 марта 2017 г.* Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/22\\_APSN\\_2017/Tecnic/3\\_197811.doc.htm](http://www.rusnauka.com/22_APSN_2017/Tecnic/3_197811.doc.htm).
7. Кустов В.В. Дослідження зносостійкості наплавлених зубків шарошкових доліт методом планування експерименту / В.В. Кустов, П.М.Присяжнюк, О.М. Богаченко // *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. –2017. – № 2 (80).– С. 35-39.

#### Рецензент:

**В.Г. Панчук**, докт.техн.наук.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018



УДК 620.18: 621.669.15: 621.762

**О.Ю. Повстяной<sup>1</sup>, А.А. Дороговцев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет<sup>2</sup>Інститут математики НАН України**МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗАСИПКИ ПОРОШКІВ З УРАХУВАННЯМ  
ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ НА БАЗІ МОДЕЛЕЙ ВИПАДКОВОЇ УПАКОВКИ  
(ДВОМІРНИЙ ВИПАДОК)**

*Розглянуто двомірний випадок математичного моделювання засипки металевих порошків у довільний бункер з врахування фізичних характеристик матеріалу.*

*Ключові слова:* пористі проникні матеріали, упаковка, моделювання.

**А.Ю. Повстяной, А.А. Дороговцев****МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАСИПКИ ПОРОШКОВ С  
УЧЕТОМ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА НА БАЗЕ МОДЕЛЕЙ СЛУЧАЙНОЙ УПАКОВКИ  
(ДВУХМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ)**

*Рассмотрен двухмерный случай математического моделирования засыпки металлического порошка в произвольный бункер с учетом физических характеристик материала.*

*Ключевые слова:* пористые проникаемые материалы, упаковка, моделирование.

**O.Yu. Povstyanoy, A.A. Dorogovtsev****MODEL STUDIES OF POWDERS POURING FORMATION TAKING INTO ACCOUNT THE  
PROPERTIES OF THE MATERIAL ON THE BASIS OF RANDOM PACKAGING MODELS  
(TWO-DIMENSIONAL CASE)**

*A two-dimensional case of mathematical modeling of filling of metal powders in arbitrary bunker taking into account physical characteristics is considered.*

*Keywords:* porous penetrating materials, packaging, modeling.

**Постановка проблеми.** Стійкими сучасними тенденціями промислового розвитку є зростання вимог до якості усіх видів виробів. Отримати нові пористі проникні матеріали (ППМ) з гарантованими властивостями можливо за допомогою традиційної технології порошкової металургії, при цьому необхідно прогнозувати та контролювати параметри їх структури в процесі виготовлення, до яких відносяться: гранулометричний склад шихти, форма часток, щільність формованої заготовки, якість контактів, схема пресування, пористість, густина та їх розподіл по об'єму. Однак, методи порошкової металургії не завжди забезпечують однорідність властивостей всередині матеріалів, і не дають можливість отримувати структурні характеристики матеріалів на якісному рівні. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури порошкових матеріалів в процесі їх виготовлення можливо за допомогою прогнозування з використанням сучасних засобів моделювання [1-3].

Прогнозування закономірностей формування структури та властивостей матеріалів залежать, насамперед, від геометричних факторів часток порошку. Крім того, аналіз сучасних технологічних процесів порошкової металургії показує, що наявність кореляційних зв'язків між складовими, будовою та властивостями забезпечується всіма операціями технологічного процесу, де початковим етапом є заповнення прес-форм порошком, який визначає не тільки розміри, форму, густину, продуктивність, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту. Тому, важливе місце тут займають модельні експерименти прогнозування залежності властивостей матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числово-аналітичних методів за допомогою 3D моделювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналіз структурно-неоднорідних матеріалів проводили наукові колективи під керівництвом Р.М. Кадушнікова, І.Г. Каменина, Ю.Н. Крючкова, В.Д. Рудя, М.Б. Штерна. Особливість цих робіт полягає в тому, що моделюються структурні характеристики матеріалів, які виготовлені із часток регулярної та нерегулярної форм. Результати моделювання перевірялися на натурних експериментах при виготовленні карбідосталей, які довели високу ефективність моделювання. Отримані результати якісно відтворюють процес заповнення прес-форми [4-7].



У роботах К.К. Кужидловського, М.М. Лобура, О.М. Матвійкова, Т.В. Семенова розглядаються інформаційні методи розрахунків фізико-хімічних характеристик порошкових матеріалів [8-10]. Особливість цих робіт полягає в тому, що проводиться аналіз лише хімічного складу або агрегатного стану початкового матеріалу, а також спостерігається відновлення оксидів, електроліз матеріалів, термічна дисоціація з'єднань.

У закордонній літературних джерелах велика частина роботи по створенню геометрії в значній мірі зосереджена на моделюванні волокна та самої границі геометрії в композиційних матеріалах [11, 12].

**Невирішені частини проблеми.** Методи моделювання невизначеності геометрії впливають на міцність складових компонентів, які знаходяться на початковій стадії заповнення [13-15], але моделювання випадкового розміщення порошку на стадії засипки у бункер з урахуванням фізичних параметрів складових повністю не досліджена.

Розробка методології моделювання розрахунку реальної засипки у форму ППМ, яка представляє більш реалістичний рівень гетерогенності, і є відправною точкою для виявлення фізичної основи поведінки порошку на стадії засипки для більшості випадків, які в даний час визначаються як емпірично, так і характеризується реальними експериментами. В ідеалі, отримані таким чином теоретичні результати, може змінити інженерний погляд на властивості майбутніх ППМ.

Тому метою нашого дослідження і є розробка методології розрахунку моделі випадкових пор у ППМ на стадії засипки матеріалу у бункер з урахуванням фізичної основи складових компонентів для двомірного випадку.

**Основні результати дослідження.** Для отримання фільтруючих ППМ з високою проникливістю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, в той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик.

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному об'ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

Аналізуючи більшість вітчизняних та зарубіжних моделей консолідації порошків, авторами запропонована нова методика розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок (двомірний випадок).

Нехай, область  $G \in R^3$  заповнена дрібними металевими кульками (рис.1.)

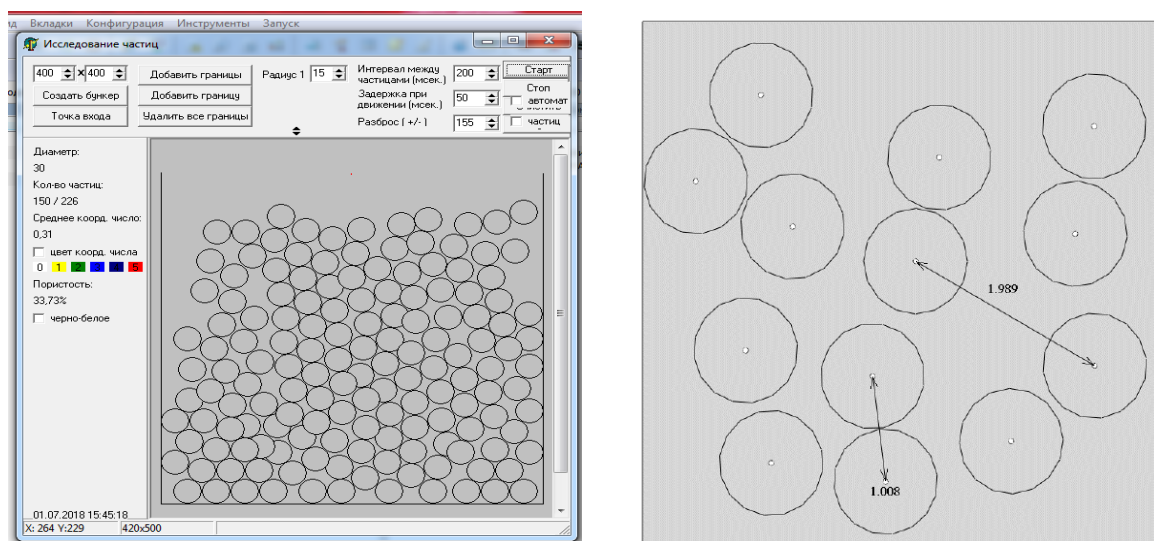


Рис. 1. Варіант заповнення бункеру кульками відповідного розміру

Необхідно встановити інтегральні характеристики отриманого матеріалу такі, як, наприклад, діелектричн апроникність. Для вирішення даної задачі використовують натупний підхід. Вважаємо, що в результаті заповнення області  $G$  порошинками виникли стаціонарні, ізотропні випадкові поля  $\{\xi_{ij}(u), u \in R^3\}$ , що описують діелектричну проникність сукупності.

Якщо до границь області прикласти електричний потенціал  $\phi$ , то потенціал  $U$  всередині області є рішенням задачі Діріхле:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \xi_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0 \\ U / \partial G = \varphi \end{cases}, \quad (1)$$

Оскільки коефіцієнти  $\xi_{ij}$  мають складну природу, то пряме рішення задачі неможливе. Тому, пропонується використовувати метод усереднення. Припускаємо, що  $\forall i, j \in Z \xi_{ij}$  є ергодичним, а область  $G$  достатньо велика для проявлення цієї властивості. Тобто очікується, що замість рівняння (1) можна буде записати:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \bar{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0 \\ U / \partial G = \varphi \end{cases}, \quad (2)$$

з деяким "усередненим" значенням  $\bar{\xi}_{ij}$ .

У рамках даного підходу були розглянуті наступні простіші випадки:

1) Одновимірний простір, тобто  $G \in R$ . Замість випадкового поля  $\xi(u), u \in R$  розглядалася періодична функція  $p: R \rightarrow R$ .

2) Багатовимірний простір, з тією ж самою періодичною функцією  $p: R^d \rightarrow R$ , де  $d > 2$ .

*Одновимірний випадок.*

Нехай  $G = [-1; 1]$ , в такому випадку система рівнянь (1) переписується наступним чином:

$$\begin{cases} x_\varepsilon''(u) = p_\varepsilon(u)x_\varepsilon(u) \\ x_\varepsilon(-1) = x_\varepsilon(1) = 1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$p_\varepsilon(x) = p\left(\frac{x}{\varepsilon}\right)$$

де  $p_\varepsilon(x) = p\left(\frac{x}{\varepsilon}\right)$  а  $p: R \rightarrow R$  – періодична функція з періодом 1.

Рішення даної системи можна записати через ймовірносне представлення:

$$x(u) = M_u \exp\left\{-\int_0^\tau p_\varepsilon(\varpi(s)) ds\right\},$$

де  $\{w(s), s \in [0, +\infty]\}$  – вінерівський процес, а  $\tau = \inf\{s : w_u(s) \in \{-1; 1\}\}$  момент виходу вінерівського процесу з області  $G$ .

Так як міра відвідування вінеровського процесу заданого на  $R$  є абсолютно неперервною відносно міри Лебега [16-17], тоді має місце наступна рівність:

$$\int_0^\tau p_\varepsilon(\varpi(s)) ds = \int_{-1}^1 p_\varepsilon(u) l_\tau(u) d,$$

де  $l_\tau(u) = \int_0^\tau \delta_u(\varpi(s)) ds$  локальний час вінерівського процесу в точці  $u$ .

Відомо, що  $l_\tau(u)$  – неперервна функція, тоді для подальших перетворень використаємо наступну теорему.

**Теорема 1.** Для будь-якої неперервної функції  $f: G \rightarrow R$  та періодичної функції  $p: R \rightarrow R$ , з періодом 1, виконується збіжність:

$$\int_{-1}^1 p_\varepsilon(u) f(u) du \rightarrow \int_0^1 p(u) du \int_{-1}^1 f(y) dy, \varepsilon \rightarrow 0 +$$

Доведення. Нехай  $\varepsilon = \frac{1}{n}, n \in \mathbb{N}$  та виконаємо заміну змінних  $x=un$ :

$$\int_{-1}^1 p_\varepsilon(u) f(u) du = \frac{1}{n} \int_{-n}^n p(x) f\left(\frac{x}{n}\right) dx = \frac{1}{n} \sum_{i=-n}^{n-1} \int_i^{i+1} p(x) f\left(\frac{x}{n}\right) dx$$

Для доведення необхідної збіжності проведемо наступні перетворення:

$$\left| \frac{1}{n} \sum_{i=-n}^{n-1} \int_i^{i+1} p(x) f\left(\frac{x}{n}\right) dx - \int_0^1 p(u) du \int_{-1}^1 f(y) dy \right| = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=-n}^{n-1} \int_i^{i+1} p(x) f\left(\frac{x}{n}\right) dx - \right.$$

$$\left. \frac{1}{n} \int_{-n}^n f\left(\frac{y}{n}\right) dy \int_0^1 p(u) du \right| = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=-n}^{n-1} \int_i^{i+1} p(x) f\left(\frac{x}{n}\right) dx - \frac{1}{n} p(x) dx \int_i^{i+1} f\left(\frac{y}{n}\right) dy \leq \right.$$

$$\left. \frac{1}{n} \left| \sum_{i=-n}^{n-1} \int_i^{i+1} \int_i^{i+1} p(x) \left( f\left(\frac{x}{n}\right) - f\left(\frac{y}{n}\right) \right) dy dx \right| \leq \right.$$

$$\left. \frac{1}{n} \sum_{i=-n}^{n-1} \left| \max_{\left| x-y \right| \leq \frac{1}{n}} \left( f\left(\frac{x}{n}\right) - f\left(\frac{y}{n}\right) \right) \int_i^{i+1} p(x) dx \right| = 2 \int_0^1 p(x) dx \cdot \left| \max_{\left| x-y \right| \leq \frac{1}{n}} \left( f\left(\frac{x}{n}\right) - f\left(\frac{y}{n}\right) \right) \right|$$

Функція  $f$  - неперервна на відрізку  $[-1, 1]$ , тобто вона є рівномірно неперервною на цьому ж відрізку, тоді згідно визначення:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 \forall x_1, x_2 \in [-1, 1] (|x_1 - x_2| < \delta_\varepsilon) \Rightarrow (|f(x_1) - f(x_2)| < \varepsilon)$$

$$\text{Значить } \forall \varepsilon \geq 0 \exists N_0 \in \mathbb{N} \forall n \leq N_0 : \left| \max_{\left| x-y \right| \leq \frac{1}{n}} \left( f\left(\frac{x}{n}\right) - f\left(\frac{y}{n}\right) \right) \right| < \varepsilon$$

Тоді,  $\forall \varepsilon \geq 0 \exists N_0 \in \mathbb{N} \forall n \leq N_0 :$

$$\left| \int_{-1}^1 p_\varepsilon(u) f(u) du - \int_0^1 p(u) du \int_{-1}^1 f(y) dy \right| \leq 2 \int_0^1 |p(x)| dx \cdot \left| \max_{\left| x-y \right| \leq \frac{1}{n}} \left( f\left(\frac{x}{n}\right) - f\left(\frac{y}{n}\right) \right) \right| <$$

$$\varepsilon \int_0^1 |p(u)| du$$

Тобто виконується необхідна збіжність.

Згідно доведеної теореми 1:

$$\int_0^\tau p_\varepsilon(\varpi(s)) ds \rightarrow \int_0^1 p(u) du \int_{-1}^1 l_\tau(y) dy, \varepsilon \rightarrow 0 +$$

При цьому,

$$\int_0^1 p(u) du \int_{-1}^1 l_\tau(y) dy = \int_0^1 p(u) du \int_0^\tau dy = \tau \int_0^1 p(u) du$$

А це значить, що виконується збіжність математичних сподівань:

$$M_u \exp \left\{ - \int_0^\tau p_\varepsilon(\varpi(s)) ds \right\} \rightarrow M_u \exp \left\{ - \tau \int_0^1 p(u) du \right\} \varepsilon \rightarrow 0 +$$

Тобто й збіжність рішень систем рівнянь, наведених в наступній теоремі.

**Теорема 2.** Нехай  $x_\varepsilon$  – рішення рівняння (3). Тоді має місце збіжність:

$$x_\varepsilon \rightarrow x, \text{ при } \varepsilon \rightarrow 0+,$$

де  $x$  – рішення задачі виду:

$$\begin{cases} x''(u) = \int_0^1 p(s) ds x(u) \\ x(-1) = x(1) = 1 \end{cases}$$

*Випадкове поле.*

**Теорема 3.** Нехай  $\{\xi_{ij}\}$  – однорідні ізотропні випадкові поля, задані на  $R^d (d > 3)$ . Якщо виконуються наступні умови:

$$1) \forall i, j \in Z \exists A_1, A_2 \in R, \text{ такі що } \forall x \in R^d, \lambda_1, \lambda_2 \in R: A_1 \|\lambda\|^2 \leq \xi_{ij}(x) \lambda_1 \lambda_2 \leq A_2 \|\lambda\|^2,$$

$$\text{де } \|\lambda\|^2 = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2};$$

2)  $\xi_{ij}$  – задовольняє степеневій умові рівномірно сильного перемішування.

При цьому  $u_\varepsilon$  – рішення задачі:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \bar{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} u(x) = 0 \\ u / \partial G = g \end{cases}, \quad (5)$$

де  $G$  – обмежена область з гладкою границею,

$g$  – деяка функція.

$u$  – рішення "усередненої" задачі:

$$\begin{cases} \sum_{i,j=1}^3 \bar{\xi}_{i,j} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} U = 0 \\ U / \partial G = \varphi \end{cases}, \quad (6)$$

Тоді:

$$M \sup \{ |u_\varepsilon(x) - u(x)| : x \in G \} = O(\varepsilon^\kappa), \quad \kappa > 0.$$

**Висновок.** Практика розрахунку нових пористих матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному об'ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

#### Література.

1. Шибряев Б.Ф. Пористые проницаемые порошковые материалы // Порошковая металлургия. – М., 1982. – С. 140–151.

2. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы: Справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 332 с.
3. Повстяной А.Ю. Эколого-экономическая эффективность использования отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения / Повстяной А.Ю., Рудь В.Д. // Международный журнал «Устойчивое развитие». - №19. – Варна, Болгария, сентябрь 2014. – С.89-94.
4. Кадушников Р.М. Геометрическое моделирование структуры материалов // Порошковая металлургия. – 1989. – 140с.
5. Каменин И.Г. Имитационное моделирование случайной неоднородной структуры порошков // Порошковая металлургия. – 1997. – 302 с.
6. Крючков Ю.Н. Оценка структурного совершенства пористых материалов // Порошковая металлургия. – 1996. – 220с.
7. Рудь В.Д. Имитационная модель засипки частиц порошков и ее использование при разработке технологии приготовления шихты карбидосталей // Моделирование в материаловедении. – 2006. – 320с.
8. Кужидловський К.К. Інформаційно-розрахунковий метод для визначення характеристик композитних матеріалів / К.К. Кужидловський, М.М. Лобур // Порошковая металлургия. – 2010. – № 6. – С. 23–30.
9. Матвійкова О.М. Численное моделирование процесов пресування порошкових изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы пресування на распределение плотности / О.М. Матвійкова, М.Б. Штерн, О.В. Михайлов // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11. – С. 29-36.
10. Семенова Т.В. Мезомеханический анализ гранулированных материалов при контактном нагружении / Т.В. Семенова, С.В. Шилько, В.А. Ковтун // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – № 2. – С. 189 – 205.
11. Young C, Mc Millan AJ, Ravey E, Verdicchio J, Quinn J, McIlhagger A, Buchanan S “The hybrid approach of a 3D textile composite finite element modeling technique at meso-scale level” 18th ICCM, South Korea, 2011.
12. Potter E, Pinho ST, Robinson P, Iannucci L, McMillan AJ “Mesh generation and geometrical modeling of 3D woven composites with variable tow cross-sections” Computational Materials Science 2012 51 103–111.
13. Matthies HG, “Stochastic finite elements: Computational approaches to stochastic partial differential equations”, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 88(11), 849-873, 2008.
14. Moens D, Vandepitte D, “A survey of non-probabilistic uncertainty treatment in finite element analysis”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 194(12-16), 1527-1566, 2005.
15. Ainsworth M, Oden JT, “A posteriori error estimation in finite element analysis”, Wiley Blackwell, New York, 2000.
16. P. Billingsley. Probability and Measure. Wiley, New York, 1995. (3rd ed.)
17. Владимиров В.С. Уравнения математической физики / Владимиров В.С., Жаринов В.В. // 2-е изд., стереотип. учебник для вузов. – М.: Физматлит. – 2004. – 400 с.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК: 621.22.011

**А.В. Ратушный, Д.Р. Васильченко, А.А. Дрофа**  
Сумский Государственный Университет  
**КОНЦЕПЦИЯ КАПИЛЛЯРНОГО НАСОСА**

*В статье рассматриваются теоретические основы создания капиллярного насоса на основе анализа физиологических особенностей растений. Раскрываются соответствующие предпосылки использования капиллярности в качестве насосного эффекта. Предлагается многоступенчатая схема насоса, которую можно было бы реализовать методом 3d-прототипирования как единое целое с трубопроводом.*

*Ключевые слова:* капиллярность, насосный эффект, многоступенчатая схема

**О.В. Ратушний, Д.Р. Васильченко, А.О. Дрофа**  
**КОНЦЕПЦІЯ КАПІЛЛЯРНОГО НАСОСА**

*У статті розглядаються теоретичні основи створення капілярного насоса на основі аналізу фізіологічних особливостей рослин. Розкриваються відповідні передумови використання капілярності в якості насосного ефекту. Пропонується багатоступенева схема насоса, яку можна було б реалізувати методом 3d-прототипування як єдине ціле з трубопроводом.*

*Ключові слова:* капілярність, насосний ефект, багатоступенева схема

**A. Ratushnyi, D. Vasilchenko, A. Drofa**  
**CONCEPT OF CAPILLARY PUMP**

*The article reviews theoretical foundations of creating a capillary pump based on an analysis of the corresponding physiological characteristics of plants. The article reveals the relevant preconditions for using capillarity as a pumping effect. The article proposes a multistage pump scheme, which could be realized by 3d-prototyping as a single unit with the pipeline.*

*Keywords:* capillarity, pumping effect, multistage scheme

**Вступление.** Примерно с 2010 г. в мире происходит интенсивное становление VI технологического уклада, который характеризуется активным развитием нанотехнологий и технологий использования возобновляемых источников энергии. Таким образом, уже сегодня необходимо предполагать кардинальную и неизбежную в будущем трансформацию всех сфер бытия человеческого общества и прежде всего промышленности. Эту трансформацию можно характеризовать массовым отказом от использования технических систем, работающих на принципах, сформулированных в предыдущих технологических укладах и так или иначе потребляющих энергию традиционных невозобновляемых источников в связи с неизбежным исчерпанием последних уже в XXI веке [1,2]. На наш взгляд, осознание этого факта требует от нас уже сегодня смелых комплексных междисциплинарных поисков новых концепций и принципов работы для технических систем будущего. Особенно это касается систем, позволяющих транспортировать жидкости (насосов) и, в первую очередь воду, как важнейшего жизненного ресурса человека. Отметим, что для насосов актуальность подобных поисков явно проявляется на основе анализа теории развития технических систем [3].

**Постановка проблемы.** Исходя из этого, имеем актуальный вопрос, имеющий направленность в будущее: будет ли иметь место потребность в насосах традиционных конструкций, теоретические основы функционирования которых были заложены еще в самых первых технологических укладах (конец XVIII - начало XIX века) при VI и будущих? Концептуально считая ответ на этот вопрос положительным, можем сделать предположение, что перед разработчиками технических систем, передающих энергию жидкости уже сегодня стоит актуальная перспективная проблема поиска новых путей передачи энергии жидкости (а зачастую воде) на микроуровне отдельных частиц. Отметим, что изучение и внедрение принципов, которые эффективно использует сама Природа, полностью соответствует философии нового VI технологического уклада и перехода к технологиям «зеленой» энергетики [4].

Одним из подобных способов является капиллярный эффект, позволяющий древесным растениям поднимать воду из почвы на значительную высоту. Разработка капиллярного насоса в виде системы (пучков) капилляров, которые располагаются в обычном трубопроводе, позволят поднимать и транспортировать воду в фактически «безнасосном» режиме, то есть при отсутствии насосного агрегата традиционной конструкции. Экономически и технологически обоснованная эффективность такой «трубо-капиллярной» системы позволит, на наш взгляд, изготавливать их как одно целое на 3d-принтере.

**Цели и задачи исследования.** Цель исследования можно сформулировать следующим образом: разработать концепцию создания капиллярного насоса.

Задачи исследования:

- проанализировать физиологические основы использования капиллярного эффекта у растений;

- предложить схему капиллярного насоса, которую можно было бы реализовать методом 3D-прототипирования как единое целое с трубопроводом.

**Методология исследования.** В качестве методологии данного исследования использовались общенаучные методы – генетический, гипотетико-дедуктивный, индукции, аналогии, научная интерпретация [5].

**Изложение основного материала.** Рассмотрим подробно эффект поднятия жидкости в тонких трубках (капиллярах), отметим также, что капиллярность, таким образом, сама по сути обладает насосным эффектом. Необходимое условие капиллярного подъема – жидкость должна смачивать материал трубки, т.е. краевой угол должен быть острым ( $\Theta < 90^\circ$ ). При этом условии поверхность жидкости в трубке имеет вогнутую форму, т.е. образуется вогнутый мениск (рис. 1).

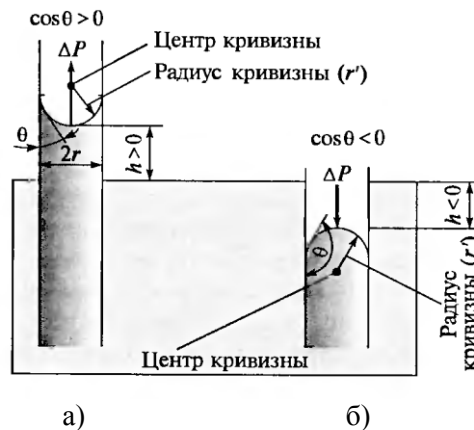


Рис. 1. Иллюстрация эффекта капиллярности для смачиваемой (а) и несмачиваемой (б) поверхности трубок

Давление в вогнутом мениске ( $p_r$ ) меньше, чем давление  $p_0$ , под плоской поверхностью в широком сосуде на величину капиллярного давления  $p_c$ , т.е. перепад давления составляет  $\Delta P = p_0 - p_r = + p_c$ . Положительная разность давлений в мениске и под плоской поверхностью ( $\Delta P > 0$ ) и является причиной капиллярного подъема смачивающей жидкости.

Для расчета капиллярного давления нужно знать форму мениска, которая определяется поверхностным натяжением жидкости и действием силы тяжести. В достаточно тонких капиллярах, где  $d \ll 2a$  ( $a$  – капиллярная длина) влияние силы тяжести мало. Поэтому можно считать, что мениск имеет форму сферического сегмента.

Высота капиллярного подъема  $H$  обратно пропорциональна диаметру трубки  $d$ . То есть чем уже капиллярная трубка, тем больше высота подъема жидкости. Например, вода в стеклянном капилляре диаметром  $d = 1$  мм поднимается примерно на 1,5 см; при  $d = 1$  мкм высота подъема составляет уже  $H = 15$  м.

В целом для одного капилляра

$$H = \frac{4\sigma \cos \Theta}{\rho_{ж} g d} \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что произведение высоты капиллярного подъема на радиус (полурадиус) трубки представляет для данной жидкости постоянную величину:  $Hr = a^2 \cos \Theta$ . Отношение

$$a^2 = \frac{2\sigma}{\rho_{ж} g} \quad (2)$$

называют капиллярной постоянной жидкости ( $[a^2] = \text{м}^2$ ), а ее значение зависит только от физических свойств жидкости.

Величину  $a$  (м) называют капиллярной длиной. Для воды капиллярная длина составляет  $a = 3,85$  мм. Данная величина определяет границу капиллярных явлений, которые играют

существенную роль в области размеров  $d \ll 2a$ . Напротив, для больших объектов доминирует влияние силы тяжести, поэтому капиллярные явления отступают на второй план.

Важное значение, особенно при рассмотрении возможности использования капиллярности в качестве насосного эффекта, имеют кинетические закономерности капиллярного течения. Рассмотрим самый простой случай – течение смачивающей жидкости по горизонтальному капилляру диаметром  $d$ .

Исходя из закона Пуазейля, принимая во внимание, что режим течения жидкости в тонких капиллярах будет ламинарным, скорость течения в горизонтальном капилляре описывается уравнением

$$g = \frac{d\sigma \cos \Theta}{8\mu x} \quad (3)$$

где  $x$  – расстояние от начала трубки.

Таким образом, по мере удаления от входа (увеличения расстояния) в капилляре скорость перемещения мениска (расход) убывает [6,7].

Выразив  $\sigma$  через  $2a$ , используя выражение (2) запишем (3) в виде

$$g = \frac{a^2 d \rho_{ж} g \cos \Theta}{16\mu x} \quad (4)$$

Исходя из того, что  $Q = v \cdot S$  и для капилляра круглого поперечного сечения  $S = \pi d^2/4$  подача через единичный капилляр будет

$$Q_{1к} = \frac{a^2 d^3 \rho_{ж} g \pi \cos \Theta}{64\mu x} \quad (5)$$

Обозначив  $a^2 d^3 \rho_{ж} g \pi = b$  и представив параметр  $x$  – расстояние от начала капилляра в качестве его длины  $l$ , подставим данные обозначения в (5) и получим выражение для подачи единичного капилляра определенной длины:

$$Q_{1к} = \frac{bd^3 \cos \Theta}{64\mu x} \quad (6)$$

При этом напор единичного капилляра

$$H_{1к} = \frac{2a^2 \cos \Theta}{d} \quad (7)$$

Составим зависимость  $H = f(Q)$ , выразив из (6)  $\cos \Theta$  и подставив его в (7):

$$\cos \Theta = \frac{64Q_{1к} \mu l}{bd^3}; H_{1к} = \frac{2a^2 64Q_{1к} \mu l}{bd^4} = \frac{128Q_{1к} \mu l}{\rho_{ж} g \pi d^4} \quad (8)$$

Перейдем от параметров одиночного капилляра к напору и подаче пучка, содержащего  $N$  капилляров:  $H = NH_{1к}$ ,  $Q = NQ_{1к}$ . Данный пучок длиной  $l$  можно рассматривать как ступень капиллярного насоса.

Таким образом (8) можно записать следующим образом:

$$H = N \frac{128Q \mu l}{N \rho_{ж} g \pi d^4} = \frac{128Q \mu l}{\rho_{ж} g \pi d^4} \quad (9)$$

Обозначив  $\frac{\mu}{\rho_{ж} g \pi} = c$  – параметр, зависящий только от вида жидкости запишем (9) в виде:

$$H = 128c \frac{Ql}{d^4} \quad (10)$$

Таким образом, видим, что зависимость  $H = f(Q)$  – характеристика капиллярного насоса линейна (рис. 2).



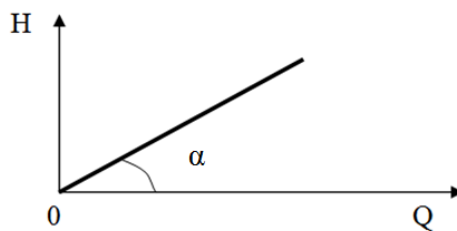


Рис. 2. Характеристика капілярного насоса

При этом угол  $\alpha$  будет зависеть от параметров перекачиваемой жидкости и геометрических параметров капилляров. Отметим, что исходя из (10), чем выше подача капиллярного насоса, тем выше его напор. Таким образом, систему капиллярной ступени необходимо создавать максимально приближенной к идеальной форме – пучку трубок круглого поперечного сечения, сделанных из однородного изотропного материала. Это задача уже для химиков и материаловедов.

Анализируя зависимости (5) и (7) относительно максимизации параметров напора и подачи, приходим к выводу, что оптимальной конструкцией многоступенчатого капиллярного насоса будет являться труба, в которую подобно системе дроссельных шайб вставлены диски, представляющие собой пучки капилляров, разнесенные друг от друга на определённую длину (рис. 3). Такие диски, находясь внутри горизонтальных и вертикальных трубопроводов, могут обеспечивать подвод нужного количества воды на необходимое расстояние фактически в «безнасосном» (учитывая, естественно, традиционное понимание этого термина) режиме. В таком контексте можно ставить задачу на более отдаленную перспективу, заключающуюся в освоении производства «моноблочной» системы «труба-капиллярные диски» из композитных материалов и пластмасс.

Заметим, что рассматривая на сегодняшний день уже упоминавшийся как наиболее перспективный уровень оптимизации энергопотребления насосным оборудованием, а именно «насосный агрегат в составе сети», невозможно не уделить внимание самим трубопроводам, технологиям их производства и материалам. Еще в середине 1980-х годов президент АН УССР Б. Е. Патон обращал внимание на значительную материалоёмкость и соответствующие технологические проблемы массового изготовления труб (особенно большого диаметра) из металлов. Академик уже тогда указывал на особую важность повсеместного перехода к производству труб из неметаллических материалов, что обеспечило бы в целом существенный позитивный экономический эффект [8]. Как видим, проблемы чисто насосостроения, при взгляде с более общих системно-структурных иерархических уровней, затрагивают многие отрасли промышленности, что особенно актуально в связи с вызовами, обусловленными переходом к новому технологическому укладу.

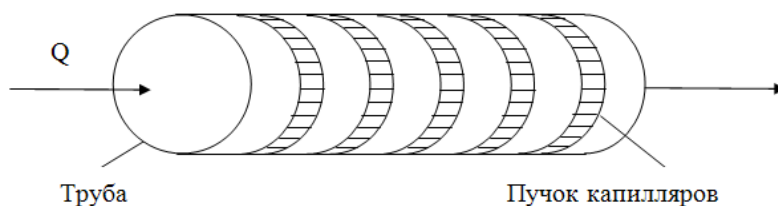


Рис. 3. Концепция конструкции капиллярного насоса

В целом можно отметить наличие значительного потенциала «насосного эффекта» явлений капиллярности, осмоса (электроосмоса) и электрокинетики [9] и особенно при их сочетании. Подобный вывод подсказывает нам сама природа на примере жизнедеятельности прежде всего древесных растений, которые благодаря сочетанию эффектов осмоса и капиллярности, поднимают жидкость из почвы на порой весьма значительную высоту. Рассмотрим подробнее с точки зрения понимания насосного эффекта данные особенности жизнедеятельности растений.

Вода в растении формирует непрерывную (неразрывную) водную систему, идущую от почвы к поглощающей поверхности корня и далее через него и стебель (ксилему) к испаряющей поверхности листьев [10]. Данная система может быть представлена как цепь сопротивлений, размещенных последовательно и параллельно (рис. 4).



Рис. 4. Модель установившегося тока воды по растению

По аналогии с законом Ома, поток воды ( $I_v$ ) в гидравлической цепи представляют как частное от деления суммарной разности водных потенциалов на концах системы ( $\Delta\Psi$ ) и величины общего гидравлического сопротивления растения ( $R$ ),

$$I_v = \frac{\Delta\Psi}{R} \quad (11)$$

Испарение (транспирация) воды с поверхности листьев определяет направление её движения во всей системе почва-корень-стебель-лист-атмосфера и генерирует соответствующее поглощение воды корнями. Таким образом, транспирация фактически обладает насосным эффектом.

Снижение водного потенциала листьев при транспирации заставляет воду двигаться из ксилемы к испаряющим клеткам листьев. Это в свою очередь снижает давление в ксилеме до значений, меньше атмосферного. Таким образом, вдоль транспирирующего растения устанавливается соответствующий градиент давления. Это, в свою очередь, приводит к усилению поглощения воды корнем из почвы. Отметим, что разность водных потенциалов атмосферы и почвы достаточна для подъёма воды у самых больших деревьев.

В целом, водный потенциал определяется выражением

$$\Psi = \frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w} \quad (12)$$

где  $\bar{V}_w$  – парциальный молярный объём воды, м<sup>3</sup>/моль;

$\mu_w^0$  – стандартный химический потенциал воды, Дж/моль;

$\mu_w$  – химический потенциал воды при изменяющемся давлении, Дж/моль.

При этом  $\Psi$  выражается в единицах давления.

Величина  $\mu_w - \mu_w^0$  определяет способность воды, находящейся при некотором давлении производить работу по сравнению с подобной способностью чистой воды, находящейся при атмосферном давлении.

Известно, что

$$\frac{\mu_w - \mu_w^0}{V_w} = \frac{RT}{V_w} \ln a_w \quad (13)$$

где  $a_w$  – активность воды.

При этом

$$a_w = \gamma_w x_w \quad (14)$$

где  $\gamma_w$  – безразмерный коэффициент активности, характеризующий отклонение системы от идеального состояния при наличии в ней растворённых веществ;

$x_w$  – концентрация воды в системе (в мольных долях).

Рассматривая транспорт чисто воды, принимают, что значение  $\gamma_w$  близко к единице.

Вообще химический потенциал воды тем выше, чем больше её активность (концентрация). Растворённые в воде вещества снижают активность воды, так как уменьшают её мольную долю в системе и, соответственно, концентрационную составляющую.

Относительно  $\Psi_{\text{атм}}$  допускают, что парциальное давление паров воды определяет химическую активность паров воды в воздухе. То есть

$$a_w = \frac{p_{wV}}{p_{wV}^0} = \frac{ОВлВ}{100} \quad (15)$$

где  $p_{wV}$  – наблюдаемое парциальное давление паров воды в воздухе;

$p_{wV}^0$  – давление насыщенных паров, находящихся в равновесии с чистой водой при той же температуре;

$ОВлВ$  – относительная влажность воздуха.

В итоге для водного потенциала атмосферы получим следующее выражение:

$$\Psi_{\text{атм}} = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{ОВлВ}{100} \quad (16)$$

Отметим, что исходя из того, что объём воды слабо изменяется с изменением давления, можем для неё принять  $\bar{V}_w = 18 \text{ см}^3/\text{моль}$ .

Условием поглощения воды растением является более высокий водный потенциал почвы, чем водный потенциал корня. Почва это многофазная система, состоящая из четырех главных компонентов:

- твердых минеральных частиц;
- образующих коллоиды сложных органических соединений, получивших название гумуса;
- почвенного раствора;
- смеси газов, близкой по составу воздуху.

Первые две составляющие образуют почвенный скелет и формируют пористую структуру почвы, два других заполняют пустоты, или поры, внутри него.

Величина водного потенциала почвы определяется выражением

$$\Psi_{\text{поч}} = P - \pi_{\text{поч}} - \tau_{\text{поч}}, \quad (17)$$

где  $P$ ,  $\pi_{\text{поч}}$ ,  $\tau_{\text{поч}}$  – гидростатическое, осмотическое и матричное давление в почве соответственно.

Давление  $P$  оказывает заметное влияние на  $\Psi_{\text{поч}}$  только при глубоком залегании почвенных горизонтов.  $\pi_{\text{поч}}$  отражает влияние на  $\Psi_{\text{поч}}$  осмотических сил. Этот компонент водного потенциала определяется, в основном, набуханием коллоидных частиц и в меньшей степени – концентрацией осмотически активных частиц в почвенном растворе.  $\tau_{\text{поч}}$  отражает влияние поверхностных явлений в капиллярах почвы на границах раздела фаз вода – твердое тело – газ. Отметим, что значение  $\Psi_{\text{поч}} = 0$  – это максимально возможное значение водного потенциала почвы. Все указанные взаимодействия воды с почвенной структурой приводят к снижению ее водного потенциала, поэтому даже в насыщенной водой почве его величина имеет отрицательное значение.

Таковы основные предпосылки транспорта жидкости в целом по растению. При этом можно отметить, что основной вклад в  $\Delta\Psi$ , а значит и в  $I_v$  стебля, как объективно основной интересующей нас части растения, вносит градиент давления  $\Delta P$  (Лапласово давление) между жидкой и газовой фазой в капилляре. Осмотическая составляющая при этом не очень велика. Она играет заметную роль в процессе поглощения воды из почвы корнем.

Таким образом, капиллярный насос с учетом опыта изучения основных особенностей транспорта воды в растениях можно представить следующей схемой (рис. 5).

В данном случае объёмный поток воды через капилляр будет определяться выражением  $I_v = \frac{\Delta P}{R}$ . Сопоставляя данное выражение с приведенным ранее ( $I_v = \frac{\Delta\Psi}{R}$ )? можно сказать, что

Лапласово давление определяет потенциал стебля. При этом разность потенциалов  $\Delta\Psi$  (рис. 1) между атмосферой и стеблем будет представлена выражением

$$\Delta\Psi = \Delta P - \frac{RT}{V_w} \ln \frac{ОВлВ}{100} + \Psi_{\text{поч}} \quad (18)$$

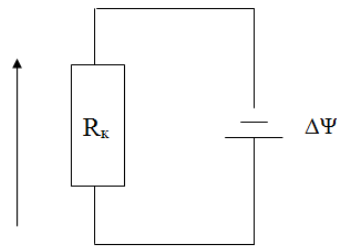


Рис. 5. Схема капиллярной насосной системы

Данная зависимость показывает, что насосный эффект капилляра древесного организма определяется особенностями строения его внутренних проводящих слоёв, параметрами атмосферы и почвы. Соответственно, для правильного и полного понимания особенностей работы описанного выше капиллярного насоса необходимо учитывать структуру и состав перекачиваемой жидкости (водного раствора), а также характеристики внешней атмосферной среды. Можем констатировать, что это объективные требования при рассмотрении насосного эффекта на микроуровне исходя из характеристики грядущего VI технологического уклада. Кроме того представляется интересным и перспективным исследование капиллярного эффекта с точки зрения теории гидравлических цепей.

**Выводы.** Живая природа неоднократно подсказывала человечеству простые и эффективные способы решения тех или иных технических и технологических проблем. Проблемы и вызовы грядущего столетия фактически не оставляют нам выбора, кроме всестороннего междисциплинарного познания природы и применения этих знаний в конкретных областях техники. Учитывая, сколь значительное место занимает современное насосное оборудование в структуре потребления энергии, какие тенденции к дальнейшему развитию имеет насос как система, исследования принципов передачи энергии на микроуровне, а особенно такие, которые реализуются самой природой, представляются абсолютно верной и своевременной тенденцией [12]. Конкретной реализацией подобных изысканий служит концепция создания капиллярного насоса, изготовление прототипов которого и всестороннее исследование особенностей его работы авторы планируют осуществить в самое ближайшее время.

#### 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. Ковальов, І. О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії України: навч. посіб. / І. О. Ковальов, О. В. Ратушний. — Суми : СумДУ, 2016. — 201 с.
3. Евтушенко А. А. Законы развития технических систем применительно к насосостроению / А. А. Евтушенко // Тр. 8-й Международ. науч.-техн. конф. "Насосы-96". — Сумы : ВВП "Мрія - 1" ЛТД, 1996. — Т. 1. — С. 68-75.
4. Клочков, В. В. Управление развитием «зеленых» технологий: экономические аспекты: монография / В. В. Клочков, С. В. Ратнер // Ин-т проблем упр-ния им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук. — М.: ИПУ РАН, 2013. — 292 с.
5. Лебедев, С.А. Методология научного познания: монография / С.А. Лебедев. — М.: Проспект. — 2017. — 256 с.
6. Сумм, Б. Д. Основы коллоидной химии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Б. Д. Сумм. — 2-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2007. — 240 с.
7. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер — М.: Наука, 1985, — 398 с.
8. Патон, Б. Е. Наука. Техника. Прогресс / Б. Е. Патон. — М: Наука, 1987. - 415 с.
9. Духин, С. С. Электрофорез / С. С. Духин, Б. В. Дерягин — М: Наука, 1976.
10. Физиология растений / под ред. И. П. Ермакова — М: Академия, 2005.
11. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев — Москва : Наука, 1985. — 279 с.
12. Евтушенко, А. А. Развитие теории рабочего процесса, практики конструирования и применения динамических насосов : монография / А. А. Евтушенко. — Сумы : СумГУ, 2013. — 515 с.

#### Рецензент:

**Ковалёв И.А.** к.т.н, профессор, заведующий кафедрой Прикладной гидроаэромеханики СумГУ

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК 667.64:678.026

**А.В. Сапронова***Херсонська державна морська академія***ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСНИХ ДОБАВОК ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ**

*Методом ІЧ-спектрального аналізу досліджено поверхню дисперсної прокатної залізної окалини, яка характеризується наявністю з'єднань Mg-O, Mn-O, S, Ca-O, Fe-O, Fe-O<sub>2</sub>, Si-O<sub>2</sub>, Si-O-Si. Проведено дослідження впливу вмісту дисперсних часток на адгезійні і фізико-механічні властивості композитних матеріалів. Вміст добавки змінювали у межах q = 10...80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Введення дисперсної добавки у епоксидний зв'язувач за вмісту q = 40 мас.ч. дозволяє підвищити адгезійну міцність у 1,8 рази, фізико-механічні властивості у 1,1 рази. Для дослідження структури шитих полімерів використано оптичну мікроскопію. На основі аналізу фрактограм зламу матеріалів виявлено однорідну структуру зламу за оптимального вмісту наповнювача, що дає можливість стверджувати про формування термодинамічно і кінетично врівноваженої полімерної системи.*

*Ключові слова:* дисперсний наповнювач, композит, ІЧ-спектральний аналіз, адгезія, фізико-механічні властивості, структура зламу, оптична мікроскопія

**А.В. Сапронова***Херсонская государственная морская академия***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИОННЫХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Методом ИК-спектрального анализа исследовано поверхность дисперсной прокатной железной окалины, которая характеризуется наличием соединений Mg-O, Mn-O, S, Ca-O, Fe-O, Fe-O<sub>2</sub>, Si-O<sub>2</sub>, Si-O-Si. Проведено исследование влияния содержания дисперсных частиц на адгезионные и физико-механические свойства композитных материалов. Содержание добавки меняли в пределах q = 10...80 мас.ч. на 100 мас.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20 и 10 мас.ч. отвердителя ПЭПА. Введение дисперсной добавки в эпоксидное связующее при содержании q = 40 мас.ч. позволяет повысить адгезионную прочность в 1,8 раза, физико-механические свойства в 1,1 раза. Для исследования структуры шитых полимеров использовано оптическую микроскопию. На основе анализа фрактограм излома материалов выявлено однородную структуру излома при оптимальном содержании наполнителя, что позволяет утверждать о формировании термодинамически и кинетически уравновешенной полимерной системы.*

*Ключевые слова:* дисперсный наполнитель, композит, ИК-спектральный анализ, адгезия, физико-механические свойства, структура излома, оптическая микроскопия

**A.V. Sapronova***Kherson State Maritime Academy***USE OF DISPERSIVE ADDITIVES TO INCREASE THE ADHESION AND PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER PROTECTIVE COATINGS**

*The surface of dispersed rolling iron scale, which is characterized by the presence of compounds Mg-O, Mn-O, S, Ca-O, Fe-O, Fe-O<sub>2</sub>, Si-O<sub>2</sub>, Si-O-Si, is studied by IR spectroscopic analysis. The influence of the content of dispersed particles on the adhesion and physicomachanical properties of composite materials was studied. The content of the additive was changed within the range q = 10...80 parts by weight. per 100 parts by weight. epoxy oligomer ED-20 and 10 parts by weight. hardener PEPA. The introduction of the dispersed additive into the epoxy binder at a content of q = 40 parts by weight. allows to increase the adhesive strength by 1.8 times, physical and mechanical properties 1.1 times. Optical microscopy was used to study the structure of cross-linked polymers. On the basis of the fractogram analysis of material fracture, a homogeneous structure of the fracture was revealed at the optimum filler content, which allows one to assert the formation of a thermodynamically and kinetically balanced polymer system.*

*Key words:* disperse filler, composite, IR spectral analysis, adhesion, physical and mechanical properties, fracture structure, optical microscopy

**Постановка проблеми.** Для забезпечення екологічної стабільності промисловості і довкілля провідних країн світу, приділяють значної уваги утилізації відходів від промислового виробництва. Враховуючи об'єми виробництва прокатної сталі постає питання утилізації прокатної залізної окалини (ПЗО). ПЗО утворюється на поверхні прокату і представляє собою суміш різних фаз, причому склад і структура будуть визначатися режимом теплового оброблення металу. Таким чином ПЗО різного розміру і складу є цікавими з наукової і практичної точки зору як наповнювачі для формування епоксидних композитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведені дослідження [1, 2] впливу оксидів металів дозволяють констатувати про їх ефективне використання при формуванні епоксидних

композитів. Авторами показано [1-3], що введення часток оксидів металів за оптимального вмісту забезпечує підвищення властивостей, зокрема температури склування. Враховуючи вище наведене, вагомим є проведення комплексних досліджень впливу добавок, які є відходами від промисловості, що містять у своєму складі оксиди металів на властивості епоксидних композитів для формування захисних покриттів. Враховуючи економічні аспекти (зниження вартості композиції за рахунок збільшення об'єму композиції) та результати дослідження [4-6] актуальним є використання часток прокатної залізної окалини за оптимального вмісту.

**Мета роботи** – дослідження впливу наповнювача, що є відходом промислового виробництва прокатної сталі, на властивості епоксидних композитів.

**Методика дослідження.** Основним компонентом для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується комплексом покращених властивостей порівняно з іншими відомими реактопластами, а саме: високою адгезійною міцністю до металевої основи, можливістю затверджування при низьких температурах, малою усадкою та ін.

Для зшивання епоксидних композицій використовували твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78), який дозволяє зшивати матеріали при кімнатних температурах.

Як наповнювач використовували відходи від виробництва, а саме частки прокатної залізної окалини.

ПЗО характеризується наступним складом, %:  $\text{SiO}_2$  – 0,803;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,36;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 32,57;  $\text{FeO}$  – 64,85;  $\text{MgO}$  – 0,03;  $\text{MnO}$  – 0,44;  $\text{CaO}$  – 0,21;  $\text{S}$  – 0,031. Дисперсність часток становить  $d = 60 \dots 63$  мкм.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: адгезійна міцність при відриві і зсуві, залишкові напруження, руйнівні напруження та модуль пружності при згинанні, ударну в'язкість, структуру композитних матеріалів методом оптичної мікроскопії.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівне напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склесних зразків згідно ГОСТ 14760-69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759-69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань сталевих зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  Н/с. Діаметр робочої частини сталевих зразків при відриві становив  $d = 25$  мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [7]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,5$  мм формували на сталевій основі. Параметри основи: загальна довжина  $l = 100$  мм; робоча довжина  $l_0 = 80$  мм, товщина  $\delta = 0,3$  мм.

Руйнівне напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно ГОСТу 4648-71 і ГОСТу 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина  $l = 120 \pm 2$  мм, ширина  $b = 15 \pm 0,5$  мм, висота  $h = 10 \pm 0,5$  мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі  $T = 298 \pm 2$  К і відносній вологості  $d = 50 \pm 5$  %. Використовували зразки розміром  $l \times b \times h = (63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$  мм. Відстань між опорами  $l = 40 \pm 0,5$  мм.

Відхилення значень при дослідженні показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження хімічних зв'язків у наповнювачі використовували ІЧ-спектральний аналіз. ІЧ-спектри реєстрували на спектрофотометрі марки «IRAffinity-1» (Японія) у ділянці хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 2400$   $\text{cm}^{-1}$  однопроменевим методом у відбитому світлі. Розгортку спектру за хвильовими числами  $\lambda^{-1} = \nu$  здійснювали на діаграмі в межах 225 мм у діапазоні вибраних частот. Хвильові числа, інтенсивність пропускання, напівширину і площу смуги поглинання визначали за допомогою комп'ютерної програми IRsolution. Похибка при визначенні хвильового числа  $\nu = \pm 0,01$   $\text{cm}^{-1}$ , а при визначенні точності розташування піку  $\nu = \pm 0,125$   $\text{cm}^{-1}$ . Фотометрична точність становила  $\pm 0,2$  % при програмному управлінні щільною і тривалістю інтегрування  $t = 10$  с. Крок інтегрування  $\Delta\lambda = 4$   $\text{cm}^{-1}$ .

Дослідження структури (топології) КМ проводили на металографічному мікроскопі моделі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення від  $\times 100$  до  $\times 1600$  разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

**Експериментальні результати.** Для визначення хімічної активності часток ПЗО доцільним є проведення ІЧ-спектрального аналізу.

Згідно ІЧ-спектрального аналізу часток наповнювача виявлено смугу поглинання ( $S = 15,7\%$ ) при хвильовому числі  $\nu = 545,85 \text{ см}^{-1}$  свідчить про наявність з'єднань Mg-O, Mn-O, S, та мінеральних включень. Смуга поглинання ( $S = 16,1\%$ ) при хвильовому числі  $\nu = 634,58 \text{ см}^{-1}$  характеризує з'єднання Ca-O [8, 9]. Діапазон хвильових чисел  $\Delta\nu = 750,31 \dots 927,76 \text{ см}^{-1}$  характеризує наявність з'єднань Fe-O, Fe-O<sub>2</sub>. Смуга поглинання ( $S = 16,8\%$ ) при хвильовому числі  $\nu = 1047,35 \text{ см}^{-1}$  характеризує наявність сполук Si-O<sub>2</sub>, Si-O-Si [8, 9].

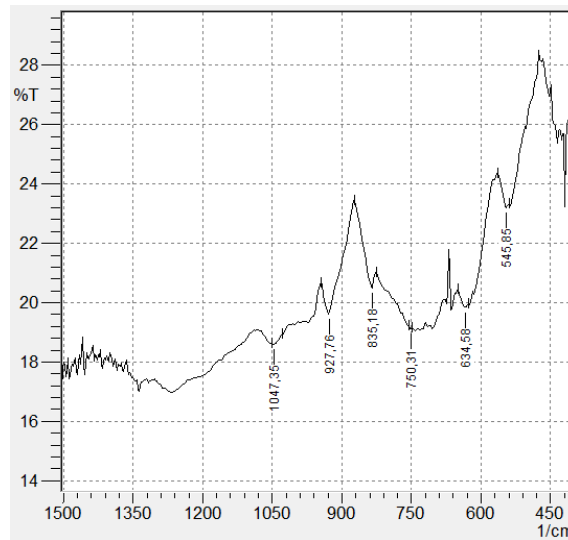


Рис. 1. Спектр наповнювача ПЗО у ділянці хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 1350 \text{ см}^{-1}$

Отже методом ІЧ-спектрального аналізу визначали хімічну активність часток ПЗО, тобто наявність активних груп на їх поверхні.

Попередньо досліджували вплив вмісту ПЗО на адгезійну міцність при відриві ( $\sigma_a$ ), зсуві ( $\tau$ ) і залишкові напруження ( $\sigma_3$ ) у КМ. Експериментально встановлено (рис. 2), що введення у епоксидний олігомер часток ПЗО за вмісту  $q = 10 \text{ мас.ч.}$  приводить до зростання адгезійної міцності при відриві КМ з 24,4 МПа (для епоксидної матриці) до 28,0 МПа (рис. 2, крива 1).

Надалі збільшення кількості добавки ( $q = 20 \dots 60 \text{ мас.ч.}$ ) у епоксидному зв'язувачі приводить до зростання адгезійної міцності при відриві  $\sigma_a = 30,0 \dots 36,5 \text{ МПа}$ , що свідчить про його активність відносно епоксидного олігомеру ЕД-20. При цьому максимум на кривій залежності адгезійної міцності від вмісту часток ПЗО встановлено при введенні наповнювача за вмісту  $q = 80 \text{ мас.ч.}$  Такі композити характеризуються адгезійною міцністю, яка становить  $\sigma_a = 40,0 \text{ МПа}$ . Вважали, що підвищення адгезійної міцності при відриві пов'язано із донорно-акцепторною взаємодією атомів кисню оксидів металу з поверхнею основи.

При дослідженні впливу часток ПЗО на адгезійну міцність при зсуві спостерігали аналогічну залежність за вмісту часток кількістю  $q = 10 \dots 40 \text{ мас.ч.}$  (рис. 2, крива 2), тобто при введенні у зв'язувач дисперсних часток спостерігали підвищення показників адгезійної міцності ( $\tau = 9,2 \dots 9,4 \text{ МПа}$ ). Введення часток ПЗО за вмісту  $q = 60 \dots 80 \text{ мас.ч.}$  призводить до зниження показників адгезійної міцності при зсуві  $\tau = 9,2 \dots 9,0 \text{ МПа}$ . Отримані результати дослідження добре узгоджуються із працями [4-6, 10, 11] та свідчать про різний механізм, величину впливу нормальних і тангенційних (дотичних) напружень при руйнуванні адгезійного з'єднання.

Аналіз праць [5-11] свідчить, що при використанні композитів для захисних покриттів вагомим є значення залишкових напружень, поза як  $\sigma_3$  характеризує довговічність розроблених матеріалів. При великих значеннях залишкових напружень можливе утворення тріщин у об'ємі матеріалу, що згодом, під впливом зовнішніх і внутрішніх фізико-хімічних процесів зумовлює руйнування полімеру (викришування, сколи, відшарування). Експериментально встановлено, що при введенні часток ПЗО за вмісту  $q = 10 \dots 40 \text{ мас.ч.}$  значення залишкових напружень змінюються не суттєво  $\sigma_3 = 1,4 \dots 1,5 \text{ МПа}$ . Зростання залишкових напружень спостерігали при введенні ПЗО за вмісту  $q = 60 \dots 80 \text{ мас.ч.}$  Значення залишкових напружень матеріалів становить –  $\sigma_3 = 2,0 \dots 3,2 \text{ МПа}$ .



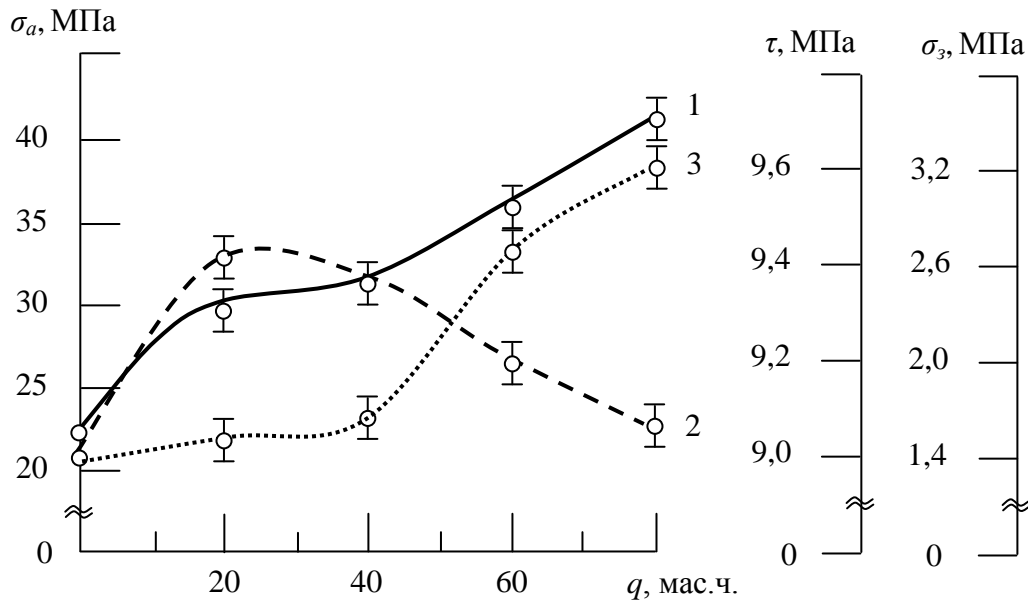


Рис. 2. Залежність адгезійної міцності ( $\sigma_a$ ,  $\tau$ ) і залишкових напружень ( $\sigma_3$ ) КМ від вмісту наповнювача ПЗО: 1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ ); 3 – залишкові напруження

Отже, при використанні розроблених адгезивів необхідно враховувати умови експлуатації розроблених матеріалів. При експлуатації матеріалів в умовах впливу нормальних ( $\sigma_a$ ) і дотичних ( $\tau$ ) напружень актуальним є використання композицій, що містять у своєму складі  $q = 40$  мас.ч. прокатної залізної окалини, позаяк адгезійна міцність таких матеріалів становить: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 30,0 \dots 32,0$  МПа, адгезійна міцність при зсуві –  $\tau = 9,3 \dots 9,4$  МПа.

Водночас, при використанні полімерних матеріалів в умовах мінімального впливу дотичних напружень актуальним є використання композицій із вмістом прокатної залізної окалини  $q = 80$  мас.ч., позаяк значення адгезійної міцності при відриві становить –  $\sigma_a = 40,0$  МПа.

У процесі експлуатації захисного покриття вагомим є не лише показники адгезійної міцності, а й фізико-механічні властивості. Тому надалі досліджували фізико-механічні властивості КМ, наповнених частками ПЗО. Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач наповнювача ПЗО за вмісту  $q = 10$  мас.ч. приводить до підвищення показників руйнівних напружень при згинанні КМ відносно матриці на  $\Delta\sigma_{3z} = 10 \dots 12$  МПа (рис. 3, крива 1). Це опосередковано свідчить про взаємодію аміногруп твердника з атомами кисню оксидів металів внаслідок чого зростає густина просторової сітки полімеру, відповідно зростає механічна міцність матеріалу. При збільшенні вмісту часток ПЗО зростає і густина просторової сітки полімеру, а отже і ступінь зшивання полімеру. Підтвердженням наведених положень є зростання руйнівних напружень при згинанні з  $\sigma_{3z} = 48,0$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_{3z} = 70$  МПа при введенні оптимального вмісту ( $q = 20$  мас.ч.) часток ПЗО.

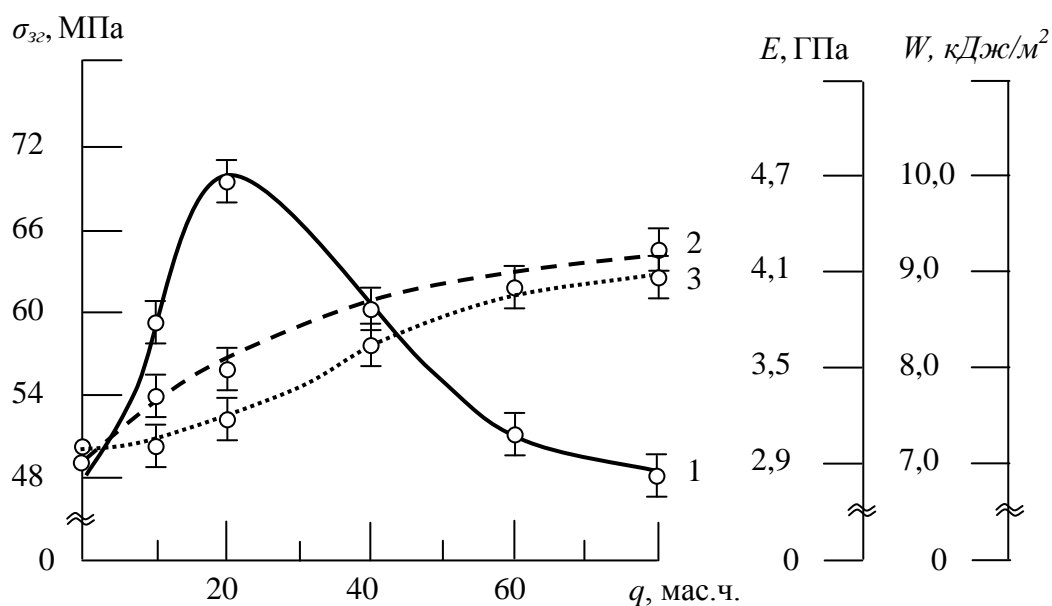
Подальше введення часток ПЗО за вмісту  $q = 40 \dots 80$  мас.ч. призводить до зниження руйнівних напружень при згинанні  $\sigma_{3z} = 60,0 \dots 48,0$  МПа. Вважали, поясненням є зростання жорсткості полімерів за рахунок вповільнення сегментальної рухливості міжвузлових молекулярних ланцюгів зумовленої зростанням густини полімеру до критичного значення.

Надалі аналізували залежність модуля пружності при згинанні від вмісту ПЗО (рис. 3, крива 2). Встановлено, що динаміка зростання модуля пружності аналогічна руйнівним напруженням при згинанні. Однак, максимальне значення модуля пружності  $E = 4,2$  ГПа спостерігали при введенні ПЗО за вмісту  $q = 80$  мас.ч.

Додатково аналізували ударну в'язкість епоксикомпозитів, наповнених ПЗО (рис. 3, крива 3). Введення у епоксидний зв'язувач наповнювача ПЗО за вмісту  $q = 10$  мас.ч. не суттєво впливає на показники ударної в'язкості, позаяк їх значення становить –  $W = 7,3$  кДж/м<sup>2</sup>, що є на рівні із значенням ударної в'язкості епоксидної матриці. Експериментально встановлено, що при введенні ПЗО за вмісту  $q = 20 \dots 60$  мас.ч. ударна в'язкість зростає відносно вихідної матриці ( $W = 7,3$  кДж/м<sup>2</sup>) і становить  $W = 7,5 \dots 8,9$  кДж/м<sup>2</sup>. Максимум на кривій залежності ударної в'язкості від вмісту ПЗО (рис. 3, крива 3) встановлено при введенні часток за вмісту



$q = 80$  мас.ч., що додатково узгоджується із результатами модуля пружності при згинанні і свідчить про достовірність отриманих результатів дослідження.



**Рис. 3. Залежність руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ), модуля пружності при згинанні ( $E$ ) і ударної в'язкості ( $W$ ) КМ від вмісту наповнювача ПЗО: 1 – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ); 2 – модуль пружності при згинанні ( $E$ ); 3 – ударна в'язкість ( $W$ )**

На завершальному етапі методом оптичної мікроскопії досліджували поверхню зламу епоксидної матриці і композитів, наповнених частками ПЗО (рис. 4). На основі аналізу фрактограм зламу епоксидної матриці (рис. 4, а) встановлено характер поверхні руйнування, що має розгалужені лінії сколювання з вираженими заглибленнями. Дані матеріали характеризують напружений стан системи та опосередковано свідчать про можливі внутрішні фізико-хімічні процеси руйнування полімеру.

Аналіз поверхні зламу КМ із вмістом часток ПЗО у кількості  $q = 10$  мас.ч. (рис. 4, б) дозволяє стверджувати, що при такому наповненні формуються матеріали із рівномірним розподілом часток за об'ємом, що зумовлює формування однорідної структури зламу.

При дослідженні поверхні зламу КМ із вмістом часток ПЗО у кількості  $q = 20 \dots 40$  мас.ч. (рис. 4, в) спостерігали подібну топологію. Це свідчить про формування термодинамічно і кінетично врівноважених полімерних систем за вмісту  $q = 10 \dots 40$  мас.ч. дисперсної складової. Дані положення добре узгоджуються із результатами фізико-механічних властивостей КМ (рис. 3.)

Аналіз поверхні зламу КМ із вмістом  $q = 60 \dots 80$  мас.ч. часток ПЗО дозволив виявити дефекти у вигляді широких магістральних тріщин розгалуженого характеру, а також повітряних включень. Поява даних дефектів пов'язана із зростанням в'язкості полімерної системи, що є сприятливою умовою для формування агломератів за рахунок неповного змочування часток ПЗО полімером. Відповідно, такі матеріали відзначаються хоча і високими показниками модуля пружності і ударної в'язкості, але й значним напруженим станом, що негативно впливає на покриття у процесі експлуатації.

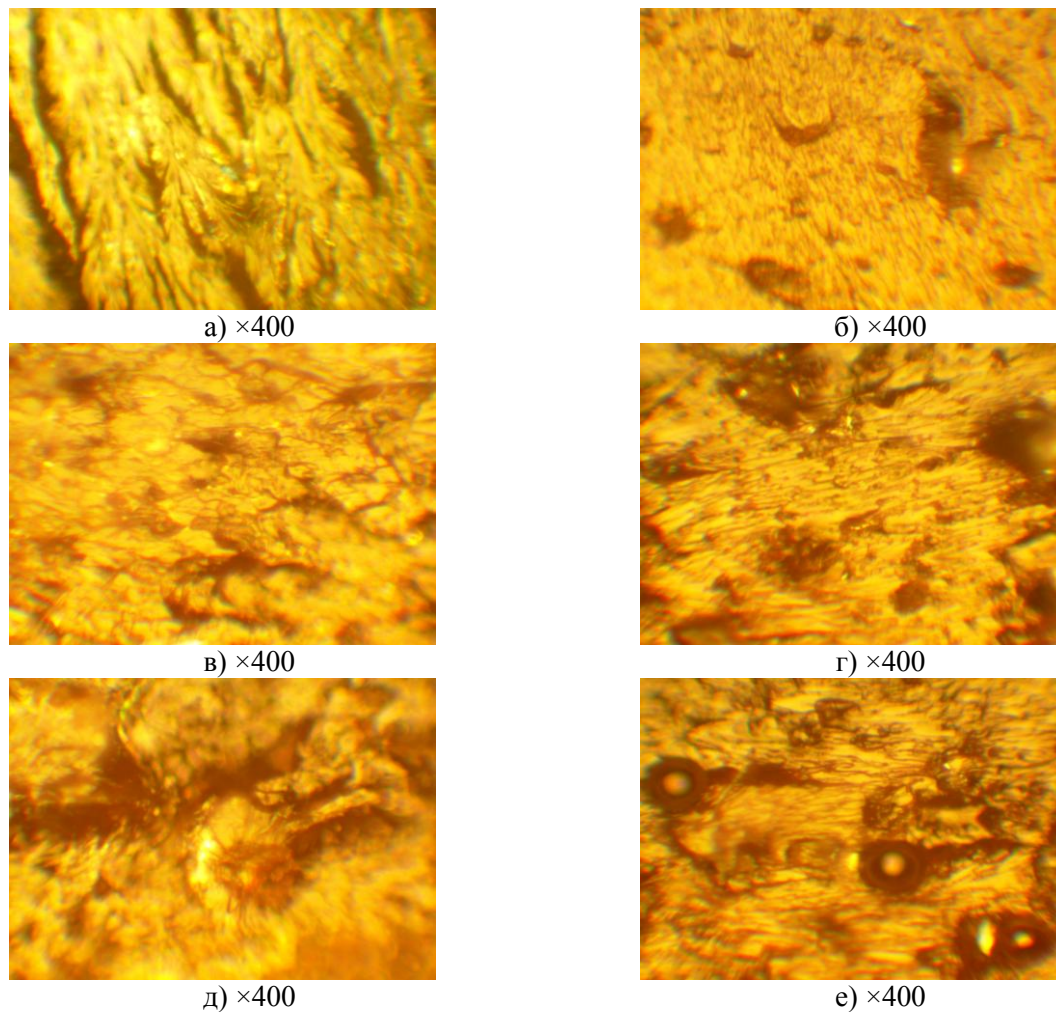


Рис. 4. Фрактограми зламу КМ, наповнених частками ПЗО: а) матриця; б) 10 мас.ч.; в) 20 мас.ч.; г) 40 мас.ч.; д) 60 мас.ч.; е) 80 мас.ч.

**Висновки.** На основі наведених результатів дослідження можна констатувати, що використання прокатної залізної окалини є досить ефективним, позаяк спостерігали поліпшення показників адгезійної міцності композитних матеріалів та їх фізико-механічних властивостей за умови введення оптимального вмісту добавки.

У роботі встановлено наступне.

1. Проведено ІЧ-спектральний аналіз часток прокатної залізної окалини, який дозволив виявити на їх поверхні значну кількість активних груп у діапазоні хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 1350 \text{ см}^{-1}$  (Mg-O, Mn-O, S, Ca-O, Fe-O, Fe-O<sub>2</sub>, Si-O<sub>2</sub>, Si-O-Si). Такі групи активізують перебіг процесів полімеризації за рахунок взаємодії з боковими групами та сегментами зв'язувача, що забезпечує формування полімерів із високими показниками механічної міцності.

2. Встановлено оптимальний вміст часток прокатної залізної окалини у епоксидній матриці з поліпшеними адгезійними властивостями. Максимальні показники адгезійної міцності КМ при відриві ( $\sigma_a = 40,0 \text{ МПа}$ ) спостерігали за вмісту наповнювача  $q = 80 \text{ мас.ч.}$  Водночас максимальні показники адгезійної міцності при зсуві ( $\tau = 9,4 \text{ МПа}$ ) спостерігали у КМ за вмісту часток прокатної залізної окалини  $q = 20 \text{ мас.ч.}$  Для формування покриття різного функціонального призначення, а саме з максимальними значеннями  $\sigma_a$  і  $\tau$  доцільно використовувати КМ із вмістом часток прокатної залізної окалини –  $q = 40 \text{ мас.ч.}$  Такий матеріал характеризується наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 32,0 \text{ МПа}$ , при зсуві –  $\tau = 9,4 \text{ МПа}$ , залишкові напруження –  $\sigma_3 = 1,5 \text{ МПа}$ .

3. Доведено, що для формування композитів з поліпшеними фізико-механічними властивостями у комплексі необхідно у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) вводити наповнювач прокатну залізну окалину за вмісту  $q = 40 \text{ мас.ч.}$  У такому випадку формується

матеріал з наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 60,0$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 4,1$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 8,3$  кДж/м<sup>2</sup>.

4. Результати, отримані методом оптичної мікроскопії, добре узгоджуються з випробуваннями фізико-механічних властивостей матеріалів. При цьому аналіз фрактограм зламу дозволив виявити структурні особливості композитів та визначити оптимальний вміст дисперсних наповнювачів для формування покриттів, які експлуатуються в умовах впливу механічних навантажень.

### Література

1. Штомпель В.І. Мікрогетерогенна структура композитів на основі епоксидної смоли та оксиду Fe (III) або Al (III) / В.І.Штомпель, В.Л.Демченко, В.О.Віленський, Ю.Ю.Керча // Полімерний журнал. – 2008. – Т30№3. – С. 233-238.
2. Віленський В.О. Вплив природи дисперсних наповнювачів на структуру, теплофізичні властивості та електропровідність композитів на основі епоксидної смоли / В.О.Віленський В.Л.Демченко // Полімерний журнал. – 2008. – Т30№2. – С. 133-140.
3. Амелін М.Ю. Відновлення деталей транспорту полімерними композитами з мікродисперсними частками, що є відходами виробництва // М.Ю.Амелін, О.О.Сапронов, О.В.Ходаковський, Н.М.Букетова // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ. – Випуск 60. – 2017. – С. 22-30.
4. Сапронов О.О. Використання дисперсних добавок для підвищення теплофізичних властивостей полімерних захисних покриттів / О.О.Сапронов, О.В.Лещенко // Вісник ХНТУ – 2018. – №1(64). – Р. 57-61.
5. Сапронов О.О. Використання в'яжучих енергоресурсів для підвищення адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксидних композитів. Сапронов О.О., Букетова Н.М // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ. – Випуск 53. – 2016. – С. 154-161.
6. Букетова Н.М. Особливості впливу дисперсного конвертерного шламу на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидних композитів / Н.М. Букетова // Науковий вісник ХДМА. – 2015. – № 2 (13). – С. 153-162.
7. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
8. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 536 с.
9. Сафулин Р.С. Неорганические композиционные материалы. – М.: Химия, 1983. – 304с.
10. Buketov. A. V. Mechanical Characteristics of Epoxy Nanocomposite Coatings with Ultradisperse Diamond Particles / A. V. Buketov, N. A. Dolgov, A. A. Saprionov, V. D. Nigalatii, N. V. Babich // [Strength of Materials](#). – Vol. 49, No 3. – 2017. – P.473-480.
11. Buketov A. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Saprionov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S. Panin // Transport – 2016. – Vol. – 31(3). – P. 333-342.

Стаття надійшла до редакції 14.06.2018

УДК 667.64:678.026

**Д.П. Стухляк**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**ВПЛИВ МОДИФІКАТОРА 2,4-ДІАМІНОТОЛУЕНУ НА АДГЕЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ**

Показано, що одним з основних засобів регулювання структури та властивостей полімерних композитів є їх фізична модифікація. Обґрунтовано, що додатково поліпшити властивості епоксидних композитів можна введенням у зв'язувач на попередній стадії формування модифікаторів за гомеопатичного вмісту. У цьому плані перспективним є використання як модифікатора 2,4-діамінотолуену, що містить амініні групи. Останнє передбачає взаємодію з твердником ПЕПА і у подальшому створення комплексних сполук з епоксидним олігомером.

У роботі досліджено вплив модифікатора 2,4-діамінотолуену на адгезійні властивості епоксидної матриці. У результаті аналізу отриманих даних встановлено оптимальну концентрацію модифікатора, за якої забезпечують максимальні показники адгезійної міцності матриці при відриві від сталевій основі зі сталі Ст.3 і зсуві. Доведено, що модифікатор, взаємодіючи з епоксидним олігомером у процесі формування композиту, активує процеси взаємодії на межі поділу фаз «адгезив – субстрат». Це забезпечує отримання матеріалу не лише з поліпшеними показниками адгезійної міцності, але й з незначними залишковими напруженнями.

**Ключові слова:** матриця, епоксидний композит, модифікатор, адгезійні властивості, міцність, основа, залишкові напруження.

**Д.П. Стухляк**

Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРА 2,4-ДИАМИНОТОЛУЭНА НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Показано, что одним из основных методов регулирования структуры и свойств полимерных композитов является их физическая модификация. Обосновано, что дополнительно улучшить свойства эпоксидных композитов возможно введением в связующее на предыдущей стадии формирования модификаторов при гомеопатическом содержании. В этом плане перспективным является использование в качестве модификатора 2,4-диаминотолуэна, содержащего аминные группы. Последнее предполагает взаимодействие с отвердителем ПЕПА и, в дальнейшем, создание комплексных соединений с эпоксидным олигомером.

В работе было исследовано влияние модификатора 2,4-диаминотолуэна на адгезионные свойства эпоксидной матрицы. В результате анализа полученных данных установлено оптимальную концентрацию модификатора, при которой обеспечивают максимальные показатели адгезионной прочности матрицы при отрыве от стальной основы из стали Ст 3 и сдвиге.

Доказано, что модификатор, взаимодействуя с эпоксидным олигомером в процессе формирования композита, активизирует процессы взаимодействия на границе раздела фаз «адгезив - субстрат». Это обеспечивает получение материала не только с улучшенными показателями адгезионной прочности, но и с незначительными остаточными напряжениями.

**Ключевые слова:** матрица, эпоксидный композит, модификатор, адгезионные свойства, прочность, основа, остаточные напряжения.

**D.P. Stukhlyak**

Ternopil National Technical University named after Ivan Puluy

**2,4-DIAMINOTOLUENE MODIFIER EFFECT ON ADHESIVE PROPERTIES AND PROTECTIVE POLYMER COATINGS RESIDUAL STRESSES**

It is shown that one of the main method of regulating the structure and properties of polymer composites is their physical modification. It is proved that it is possible to improve the properties of epoxy composites by entering homeopathic dose of bonding additive into the binder during the previous stage of modifiers formation. From this perspective the usage of 2,4-diaminotoluene modifier containing amine groups is promising. It involves interaction with the PEPA hardener and the future development of complex compounds with an epoxy oligomer.

2,4-diaminotoluene modifier effect on the adhesion properties of the epoxy matrix is investigated in this article. As a result of obtained data analysis the most suitable concentration of the modifier is determined that provides maximum adhesion strength of the matrix when it is separated from the steel base of grade St 3 and the shift.

It is substantiated that the modifier activates the interaction processes at the boulder line of the «adhesive-substrate» phases by interacting with the epoxy oligomer during the polymer formation. It leads to material formation with improved adhesion strength criteria, but also with low residual stresses characteristics.

**Key words:** matrix, epoxy composite, modifier, adhesion properties, strength, basis, residual stresses.

**Постановка проблеми.** На сьогодні актуальним є питання підвищення надійності експлуатації деталей механізмів та машин. Важливим у цьому плані є поліпшення корозійної тривкості та зносостійкості устаткування, що досягають нанесенням захисних покриттів різного функційного призначення. Перспективним є використання багаточарових полімерних

композитних покриттів (КП) робочих поверхонь, що експлуатуються при різних умовах. Слід зауважити, що багатошарові функційні покриття, як правило, містять функціональний шар, який сприймає навантаження факторів зовнішнього середовища, проміжний шар, що виконує демпферні функції, і адгезійний шар, який безпосередньо забезпечує міцність з'єднання адгезиву з основою. Виходячи з наведеного вище можна констатувати, що одним з важливих критеріїв, які визначають довговічність захисних покриттів, є показники їх адгезійної міцності до металевої основи. Останні у свою чергу залежать від вмісту та активності до взаємодії його компонентів. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є розроблення адгезійного шару при створенні захисних композитних покриттів різного функційного призначення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Авторами [1-4] показано, що перспективним при формуванні полімерних КП є використання у вигляді основи епоксидних діанових смол. Останні містять епоксидні та гідроксильні групи, що, взаємодіючи із металевим субстратом при зшиванні матеріалу, забезпечують високі показники адгезійної міцності покриття до металевої основи. Виходячи з різних природних умов експлуатації устаткування, вважають [5, 6], що епоксидні композити доцільно зшивати твердником холодного затверджування поліетиленполіаміном (ПЕПА). Вводячи у епоксидні смоли ПЕПА за визначених концентрацій у промислових умовах отримують композити з високим вмістом гель-фракції (92...94 %), що, у свою чергу, дозволяє отримати матеріали і захисні покриття на їх основі з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Доведено, що додаткового поліпшення властивостей епоксидних композитів досягали введенням у зв'язувач, на попередній стадії формування композитів, модифікаторів за геомеопатичного вмісту. У цьому плані перспективним є використання як модифікатора 2,4-діамінотолуену, що містить аміні групи. Останнє передбачає взаємодію з твердником ПЕПА і у подальшому створення комплексних сполук з епоксидним олігомером. Тому дослідження впливу модифікатора 2,4-діамінотолуену на властивості епоксидних композитів є цікавим з наукової і практичної точки зору.

**Мета роботи** – дослідити вплив модифікатора 2,4-діамінотолуену на адгезійні властивості та залишкові напруження захисних епоксикомпозитних покриттів.

**Матеріали та методика дослідження.** Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних композитних матеріалів (КМ) вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Структурна формула і модель епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 наведена на рис.1 [5]. Як модифікатор використано 2,4-діамінотолуен (ДАТ). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна формула модифікатора:  $C_7H_{10}N_2$ . Молекулярна маса 2,4-діамінотолуену – 122.1677. Температура плавлення – 98 °С. Дана речовина із серії діамінів феніленового ряду. Модифікатор розчинний у полярних органічних розчинниках – метанол, етанол, ацетон, етилацетат, малорозчинний у воді. Використовується як синтон для синтезу акридинових барвників. Структурну формулу модифікатора наведено на рис. 2.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів:  $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ . Структурну формулу і модель фрагменту твердника ПЕПА наведено на рис. 3. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

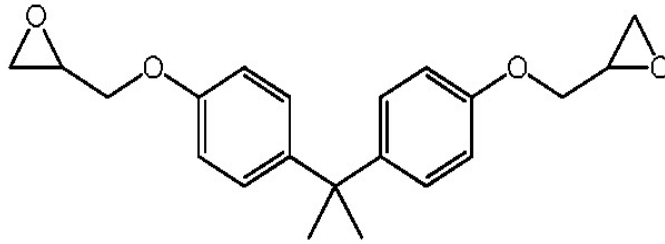


Рис. 1. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [5].

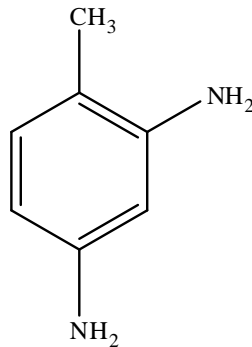


Рис. 2. Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора 2,4-діамінотолуену (ДАТ)

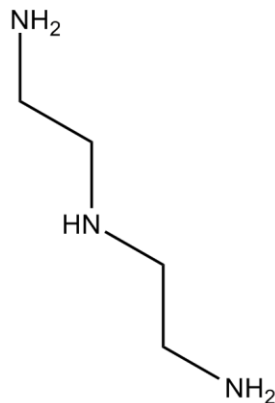


Рис. 3. Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [5].

Таблиця 1

Характеристики	Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача		
	Епоксидний олігомер ЕД-20	Модифікатор ДАТ	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	122	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	—	—
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	—	—
Середня функціональність за епоксидними групами, $f_n$	2,0	—	—
Вміст азоту, %	—	22,93	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	—	68,82	—
Вміст водню, %	—	8,25	—
В'язкість, $\eta$ , Па·с	13...20	—	0,9
Густина, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,16	—	1,05

Епоксидні композити і покриття на їх основі формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури  $T = 353 \pm 2$  К і витримка при даній температурі впродовж часу  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу  $\tau = 1 \pm 0,1$  хв;

ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу  $\tau = 60 \pm 5$  хв; введення твердника і суміщення компонентів композиції впродовж часу  $\tau = 5 \pm 0,1$  хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К, нагрівання зі швидкістю  $v = 3$  К/хв до температури  $T = 393 \pm 2$  К, витримання впродовж часу  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  год, повільне охолодження до температури  $T = 293 \pm 2$  К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу  $\tau = 24$  год на повітрі за температури  $T = 293 \pm 2$  К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Адгезійну міцність матриці до металеві основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склесних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив  $d = 25$  мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [5]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3 \dots 0,8$  мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина  $l = 100$  мм, робоча довжина  $l_0 = 80$  мм, товщина  $\delta = 0,3$  мм. Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На попередньому етапі експериментально досліджено властивості вихідної епоксидної матриці. Встановлено (рис. 4), що показники її адгезійної міцності при відриві і зсуві, а також залишкових напружень становлять відповідно  $\sigma_a = 24,8$  МПа,  $\tau = 8,5$  МПа,  $\sigma_s = 1,4$  МПа.

На першому етапі досліджували залежність адгезійної міцності епоксидних КМ від вмісту модифікатору 2,4-діамінотолуену (ДАТ). Доведено (рис. 4, крива 1), що при введенні ДАТ за незначного вмісту  $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч. адгезійна міцність КМ порівняно з вихідною матрицею монотонно зростає від  $\sigma_a = 24,8$  МПа до  $\sigma_a = 34,7 \dots 36,2$  МПа. Максимум на кривій залежності адгезійної міцності при відриві від вмісту модифікатора спостерігали при введенні добавки у композит у кількості  $q = 1,0$  мас.ч. Такий композит відрізняється наступними показниками адгезійної міцності при відриві  $\sigma_a = 39,1$  МПа. Надалі збільшення кількості модифікатора у полімері призводить до формування композитів, які характеризуються дещо меншими показниками адгезійної міцності  $\sigma_a = 30,2 \dots 31,8$  МПа. Отримані результати можна пояснити наступним.

Вище було показано, що модифікатор 2,4-діамінотолуен містить метильні ( $-\text{CH}_3$ ) і амінні ( $-\text{NH}_2$ ) бокові групи, які прикріплені до бензольного кільця. При введенні добавки за незначного вмісту ( $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч.), на наш погляд, відбувається взаємодія даних бокових груп з молекулами твердника, у результаті чого відбувається полімеризація модифікатора. З іншого боку водночас відбуваються процеси зшивання металічних і амінних груп модифікатора з гідроксильними та епоксидними групами епоксидного олігомера за допомогою твердника, що дозволяє отримати тривимірну сітку полімера з підвищеним вмістом гель-фракції. В результаті підвищуються показники адгезійних властивостей (при відриві) модифікованої матриці порівняно з вихідною.

Водночас зазначимо, що у модифікованій матриці присутня і золь-фракція, вміст якої залежить від кількості непрореагованих при полімеризації активних груп компонентів системи. Тому є очевидним, що мінімум золь-фракції, на наш погляд, існує у КМ із вмістом модифікатора у кількості  $q = 1,0$  мас.ч., позаяк на кривій залежності «адгезійна міцність при відриві – вміст модифікатора» показники  $\sigma_a$  є найвищими ( $\sigma_a = 39,1$  МПа). Можна констатувати, що такий вміст модифікатора у епоксидному полімері є критичним, а кількість хімічних зв'язків на одиницю об'єму матриці – максимальною. Надалі збільшення вмісту модифікатора призводить до перенасичення системи активними групами добавки, що, у свою чергу, зумовлює збільшення вмісту золь-фракції у КМ. А це безумовно погіршує адгезійні характеристики модифікованих полімерних композитів.

Дещо інші результати спостерігали при дослідження адгезійної міцності при зсуві від вмісту модифікатора. Встановлено (рис. 4, крива 2), що введення добавки за вмісту ( $q = 0,25 \dots 0,50$  мас.ч.) призводить до зменшення порівняно з вихідною матрицею адгезійної міцності при зсуві від  $\tau = 8,5$  МПа до  $\tau = 7,5 \dots 7,7$  МПа. Далі при введенні у епоксидний олігомер модифікатора у



кількості  $q = 1,0 \dots 1,5$  мас.ч. забезпечує збільшення адгезійної міцності при зсуві КМ до  $\tau = 8,6 \dots 8,9$  МПа. Збільшення вмісту ДАТ понад критичного вмісту (до  $q = 2,0$  мас.ч.) не приводить до поліпшення адгезійних властивостей досліджуваних КМ (значення знаходяться у межах похибки експерименту). Отримані результати можна пояснити тим, що тангенціальні напруження є визначальними для показників адгезійної міцності при зсуві досліджуваних КМ. Навпаки, при відриві зразків визначальними є нормальні напруження, а тангенціальні – незначні. Виходячи з цього можна стверджувати про інший механізм руйнування зразків при зсуві, порівняно з відривом. Однак, спостерігали кореляцію розміщення максимуму на кривих залежностей «адгезійна міцність при відриві – вміст модифікатора» та «адгезійна міцність при зсуві – вміст модифікатора», що дозволило встановити критичний вміст добавки у КМ. Доведено (рис. 4, крива 1, крива 2), що за вмісту модифікатора 2,4-діамінотолуену у кількості  $q = 1,0$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 39,1$  МПа; адгезійна міцність при зсуві –  $\tau = 8,6$  МПа. Спостерігали підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності при відриві у 1,6 разів, при цьому показники адгезійної міцності при зсуві практично не змінюються.

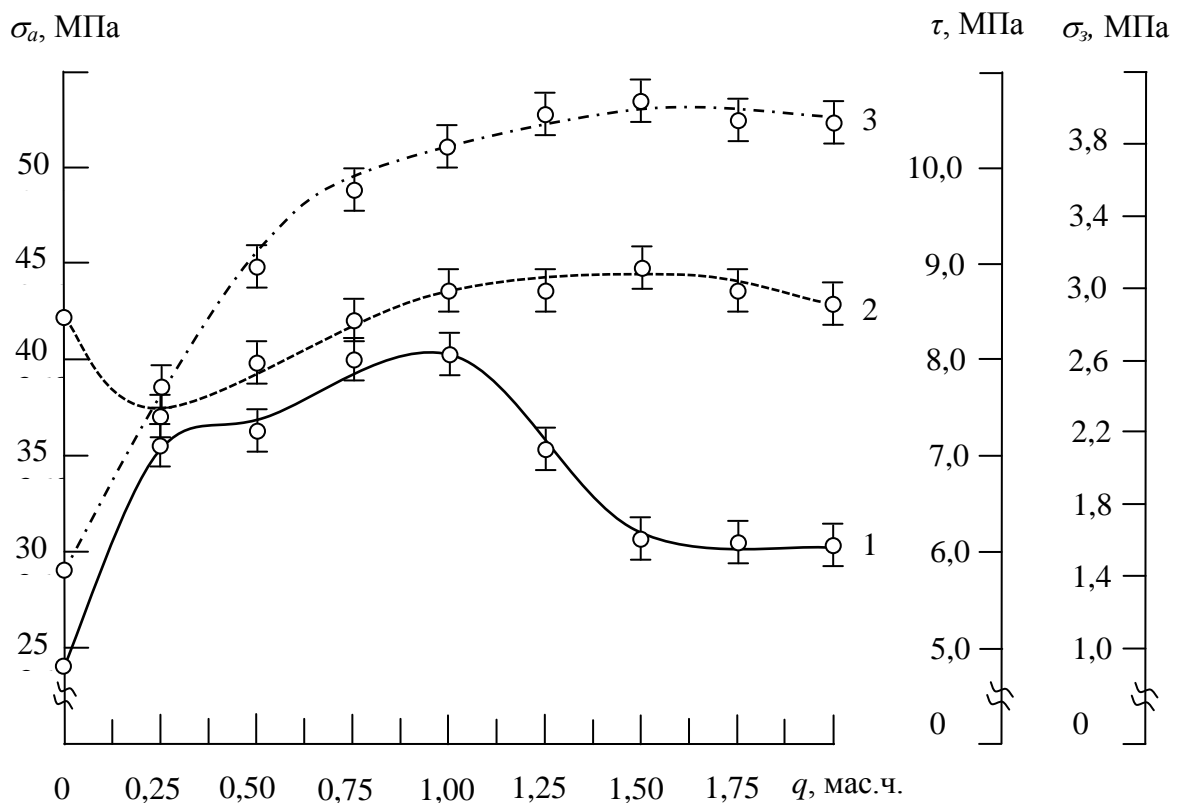


Рис. 4. Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора ДАТ: 1 – адгезійна міцність при відриві ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезійна міцність при зсуві ( $\tau$ ); 3 – залишкові напруження ( $\sigma_3$ ). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Відомо [1, 2], що одним з важливих показників надійності експлуатації виробів є показники залишкових напружень у захисних покриттях. Останні визначають не лише довговічність покриттів у звичайних умовах експлуатації, але і є важливими для прогнозування ресурсу роботи устаткування при критичних динамічних навантаженнях. Тому вважали за необхідність дослідити залежність залишкових напружень у епоксидних КМ від вмісту модифікатора ДАТ.

Експериментально встановлено (рис. 4), що залишкові напруження у вихідній епоксидній матриці становлять  $\sigma_3 = 1,4$  МПа. Доведено (рис. 4, крива 3), що введення модифікатора приводить до монотонного збільшення величини залишкових напружень у модифікованих КМ. Максимум ( $\sigma_3 = 3,7 \dots 3,9$  МПа) на кривій залежності «залишкові напруження – вміст модифікатора» спостерігали у діапазоні концентрацій добавки, який становить  $q = 1,0 \dots 1,5$  мас.ч. Надалі збільшення кількості модифікатора практично не приводить до зміни залишкових напружень



(значення знаходяться у межах похибки експерименту). Очевидно, що у присутності модифікатора збільшується кількість хімічних зв'язків як на межі поділу фаз «модифікована матриця – металева основа», так і у об'ємі адгезиву. Це приводить до формування термодинамічно і кінетично невірної структури композитів, що передбачає зростання залишкових напружень. Порівняльний аналіз результатів дослідження (рис. 4) доводить, що для матеріалів з високими показниками адгезійної міцності спостерігали підвищені значення залишкових напружень, а це свідчить про достовірність результатів проведених експериментальних досліджень.

**Висновки.** У роботі встановлено оптимальний вміст модифікатора 2,4-діамінотолуену для формування модифікованого епоксидного захисного покриття з покращеними адгезійними характеристиками і незначними залишковими напруженнями. Доведено, що при введенні модифікатора 2,4-діамінотолуену у кількості  $q = 1,0$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 39,1$  МПа; адгезійна міцність при зсуві –  $\tau = 8,6$  МПа. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності при відриві у 1,6 разів, при цьому показники адгезійної міцності при зсуві практично не змінюються. Водночас слід зазначити, що введення модифікатора у кількості  $q = 1,0$  мас.ч. зумовлює підвищення залишкових напружень у покриттях від  $\sigma_3 = 1,4$  МПа (для вихідної епоксидної матриці) до  $\sigma_3 = 3,7$  МПа. Отриманий матеріал доцільно використовувати у вигляді матриці для формування покриттів різного функціонального призначення.

### Література

1. Стухляк П.Д. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, С.В. Панин, П.О. Марущак, К.М. Мороз, М.А. Полтаранин, Т. Вухерер, Л.А. Корниенко, Б.А. Люкшин // Физическая мезомеханика. - 2014. - Т. 17. - № 2. - С. 65-83.
2. Лидин Р.А. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Химия, 2000. – 480 с.
3. Sapronov O. Investigation of Pm-75 Carbon Black Addition on the Properties of Protective Polymer Coatings // O.Sapronov, P.Maruschak, N.Buketova, O.Leschenko, S.Panin / Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures, 2016, AIP Conf. Proc. 1783, 020194-1–020194-4; doi: 10.1063/1.4966488.
4. Buketov A.V. Impact toughness of nanocomposite materials filled with fullerene C60 particles / A.V. Buketov, A.A. Sapronov, N.N. Buketova, M.V. Brailo, P.O. Marushak, S.V. Panin, M.Yu. Amelin // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. – Vol. 9(2). – 2018. – P.141–161.
5. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.І. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості: монографія. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
6. Сапронов А.А. Исследование процесса термической деструкции в эпоксикомпозитах, наполненных фуллереном C60 / А.А. Сапронов, Н.Н. Букетова // Научно-технический журнал. Наноиндустрия. – Випуск 2(72). – 2017. – С. 90-99.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018

УДК 629.4.014

**В.А. Газетдінов***Черкаський державний технологічний університет***ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПІДБОРУ ІНВЕНТАРЯ ДЛЯ НАСТІЛЬНОГО ТЕНІСУ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ЗА КРИТЕРІЯМИ ВІДПОВІДНОСТІ**

У статті досліджується питання оптимізації пошукових процесів та актуальність використання штучних нейронних мереж. Проводиться аналіз останніх публікацій в обраній темі та розглядаються переваги штучних нейронних мереж над традиційними видами знаходження рішень. Встановлено, що сучасні нейромережі є узагальненням штучних нейронів, з'єднаних між собою шарів. Окреслюються перспективи використання комп'ютерних технологій з метою автоматизації процесів підбору інвентарю для гри в настільний теніс. Наявні комп'ютерні програми носять комерційний характер, даючи змогу, програмістам розробляти власні функції суматора, на основі підпрограм, які кодуються на високому рівні. Описана задача вибору накладок та основ із врахуванням стилю гри гравця, як фундаментальне завдання для результативної гри.

Зосереджується увага на виникненні задач оптимізації в науці, техніці та шляхів вирішення завдяки правильно побудованому алгоритму оптимізації, який полягає у відшукуванні розв'язків які будуть максимізувати або мінімізувати шукану функцію і крім цього задовольняти початкову систему сформульованих обмежень. Побудована математична модель описаних процесів для реалізації алгоритму проведення оцінки критеріїв відповідності шуканих елементів та числа нейронів. Сформульована теорема А. Н. Горбаня, яка дає можливість побудувати пошукову систему за критеріями відповідності, використовуючи штучні нейронні мережі. Показана, у вигляді схеми, узагальнена модель нейрона, яка активно використовується при побудові математичної моделі. На початкових етапах математичного моделювання нейронних мереж, як правило, вводили до розгляду граничні функції, на даний час, вдало використовується сігмоїдальна функція. При побудові пошукової нейромережевої системи, в ролі передатних функцій використовуються сігмоїда, синус, гіперболічний тангенс та ін., дані функції всіх нейронів у мережі є фіксованими, а ваги є змінними параметрами, залежно від поставленої задачі. Досліджено основні етапи побудови нейронних мереж, які дозволяють знаходити великого класу оптимізаційних задач, а саме зосереджена увага на практичному використанні при підборі інвентарю для гри в настільний теніс.

**Ключові слова:** нейронна мережа, процес оптимізації, вектор, функція, пошукова система, алгоритм, параметри пошуку.

**Рис.: 1 Літ.: 6**

**V.A. Tazetdinov****OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF SELECTION OF EQUIPMENT FOR TABLE TENNIS BASED ON THE CONSTRUCTION OF NEURAL NETWORKS BY THE CRITERIA OF CONFORMITY**

The article deals with the problem of optimization of search processes and the urgency of the use of artificial neural networks. An analysis of recent publications in the chosen topic is under consideration and the advantages of artificial neural networks over traditional types of solutions are considered. It is established that modern neural networks are a generalization of artificial neurons, interconnected layers. The perspectives of using computer technologies for the purpose of automation of inventory selection processes for table tennis are outlined. Available computer programs are commercial in nature, enabling programmers to develop their own add-on functions, based on subprograms that are coded at a high level. The task of selecting the overlays and bases, taking into account the player's play style as a fundamental task for a productive game, is described.

The focus is on the emergence of optimization problems in science, technology and solutions through a well-built algorithm of optimization, which consists in finding solutions that will maximize or minimize the desired function and, in addition, satisfy the initial system of formulated constraints. The mathematical model of the described processes for the implementation of the algorithm for evaluating the criteria for the matching of the desired elements and the number of neurons is constructed. The theorem of A. N. Gorbani was formulated, which makes it possible to construct a search engine according to the criteria of conformity using artificial neural networks. It is shown, in the form of a scheme, a generalized model of the neuron, in the initial stages of the simulation of neural networks, as a rule, introduced the boundary functions into consideration, at present, the sigmoidal function is successfully used. When constructing a search engine neural network system, the role of transfer functions is used for sigmoid, sinus, hyperbolic tangent, etc., the data of the functions of all neurons in the network are fixed, and weights are variable parameters depending on the task. The main stages of the construction of neural networks are investigated, which allow finding a solution to a large class of optimization problems, namely the focus on practical use in selecting equipment for playing table tennis.

**Keywords:** neural network, optimization process, vector, function, search system, algorithm, search parameters.

**В.А. Газетдинов****ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОДБОРУ ІНВЕНТАРЯ ДЛЯ НАСТОЛЬНОГО ТЕНІСУ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ НЕЙРОННИХ СЕТЕЙ ПО КРИТЕРИЮ СООТВЕТСТВИЯ**

В статье исследуется вопрос оптимизации поисковых процессов и актуальность использования искусственных нейронных сетей. Проводится анализ последних публикаций в выбранной теме и рассматриваются преимущества искусственных нейронных сетей над традиционными видами нахождения решений. Установлено, что современные нейросети являются обобщением искусственных нейронов, соединенных

между собой слов. Определяются перспективы использования компьютерных технологий с целью автоматизации процессов подбора инвентаря для игры в настольный теннис. Имеющиеся компьютерные программы носят коммерческий характер, позволяя программистам разрабатывать собственные функции сумматора, на основе подпрограмм, которые кодируются на высоком уровне. Описанная задача выбора накладок и оснований с учетом стиля игры игрока, как фундаментальная задача для результативной игры.

Сосредотачивается внимание на возникновении задач оптимизации в науке, технике и путей решения благодаря правильно построенному алгоритму оптимизации, который заключается в отыскании решений которые будут максимизировать или минимизировать искомую функцию и кроме этого удовлетворяют начальную систему сформулированных ограничений. Построена математическая модель описанных процессов для реализации алгоритма проведения оценки критериев соответствия искомым элементам и числа нейронов. Сформулированная теорема А. Н. Горбана, которая дает возможность построить поисковую систему по критериям соответствия, используя искусственные нейронные сети. Показана в виде схемы, обобщенная модель нейрона, которая активно используется при построении математической модели. На начальных этапах математического моделирования нейронных сетей, как правило, вводили к рассмотрению предельные функции, в настоящее время, удачно используется сигмоидальная функция. При построении поисковой нейросетевой системы, в роли передаточных функций используются сигмоида, синус, гиперболический тангенс и др., Данные функции всех нейронов в сети фиксированы, а веса являются переменными параметрами, в зависимости от поставленной задачи. Исследованы основные этапы построения нейронных сетей, которые позволяют находить решения большого класса оптимизационных задач, а именно сосредоточено внимание на практическом использовании при подборе инвентаря для игры в настольный теннис.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, процесс оптимизации, вектор, функция, поисковая система, алгоритм, параметры поиска.

**Вступ.** Сучасний розвиток спортивної науки нерозривно пов'язаний із використанням новітніх комп'ютеризованих систем. Значна кількість експериментальних методів із залученням ІТ технологій присутня в такій грі як настільний теніс. Необхідною передумовою для високого рівня підготовки у вказаній грі є успішний вибір накладки та основи, кожна з якої володіє окремими властивостями, які в тій чи іншій мірі можуть вплинути на гру, крім цього виникає потреба вдалого поєднання спортивного інвентарю з ігровим стилем гравця [4]. З точки зору новітніх наукових результатів, встановлено, що ігрова діяльність є невід'ємною ланкою цілісної системи, яка забезпечує задоволення основних потреб людини, реалізація якої, на практиці, має великий стимулюючий вплив.

Настільний теніс, який за своєю потребою для того щоб забезпечити результативну гру на високому рівні не вимагає особливо складної організації та затрат матеріально-технічного забезпечення, має колосальну популярність в світі, про що можна з впевненістю стверджувати виходячи із статистичних даних адже рекордне число країн-учасниць чемпіонату світу з настільного тенісу складається з 141 країни – з них 80 чоловічих і 61 жіноча команди. Характерними рисами тенісиста є: аналітичне мислення, швидкість реакції, вдало розвинута координація рухів, стійкість, витривалість, м'язова сила організму. У гравців простежується автоматизм у виконанні прийомів – один з цінних якостей рухової діяльності спортсмена. Автоматизація ігрових процесів дає змогу переключити його свідомість на оцінку обстановки та швидкому, а головне правильному прийняттю рішення, що є дуже важливим під час дії у складних умовах захисту. Оскільки гра в настільний теніс здійснює досить сильне фізичне навантаження на організм гравця.

Ю. П. Байгулов разом із А. Н. Романіним навели статистичні дані провівши аналіз гри гравця в теніс встановили, що гравець захисного стилю на 10-15 ударів витрачає 4-12 сек. і здійснює 65-70 різноманітних за видом та способом (біг, крок, стрибок, скачок, ривок, випад) переміщень в середньому не менше 0,7 м кожне. Що становить близько 50 м при розігруванні одного очка, близько 800 – 1000 м за партію та біля 2500- 5000 м за зустріч [4].

Численна кількість проблем пов'язана із врахуванням відповідних властивостей, критеріїв для вибору шуканих елементів в науці, медицині, спорті і тд., можна сформулювати в клас оптимізаційних задач [1]. Процес оптимізації полягає у відшуканні рішення, яке повинно задовольняти систему заданих в умові обмежень та максимізувати або мінімізувати шукану (цільову) функцію.

Якщо проводити порівняння між традиційними методами розрахунку та нейронними мережами то останні мають переваги в окремих досліджуваних множинах. Для того щоб мати змогу застосовувати нейромережі, необхідно щоб розробник забезпечив виконання наступних вимог: множину даних, яка буде містити інформативні матеріали, що описують поставлену задачу, пояснення та розуміння вихідної природи досліджуваного питання та засобів дослідження, булеан множини (потужність), можливість вибору функції суматора, передатної функції [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених зосереджені на поєднанні технічних, спортивних напрямів для автоматизації роботи та отримання високоякісних результатів. Відомі тренери з настільного тенісу Р. В. Барчукова, В. М. Богущас, О. В. Матицін стверджують, що, на сьогодні, значних результатів у гри, підвищення технічної майстерності можна досягти за рахунок оптимізації підбору інвентарю для гри, використання комп'ютерних технологій [4].

Нова ера проведення обчислювальних процесів вимагає знань, умінь та навичок набагато досконаліших за підходи в традиційних обчисленнях та оптимізаційних процесах [3]. На початкових етапах обчислення розглядалися лише апаратними, але завдяки своїй професійній майстерності інженери втілили їх в роботу. На наступному етапі розвитку обчислювальних процесів важливу роль відіграли програмісти, інформаційні фахівці обробки даних у великих кількостях. На сьогодні можна із впевненістю стверджувати, що це поява нейронних архітекторів. Де сучасний спеціаліст повинен поєднати в собі всі уміння та навички попередників та мати високу кваліфікацію та якість своєї роботи, і крім цього логічно мислити, мати емпіричне уміння та інтуїтивні здібності.

Таким чином, виникає необхідність до побудови нейронної оптимальної мережі. Це пояснюється тим, що нейронні мережі дають змогу сконструювати високопрофесійний програмний та математичний продукт для сучасних комп'ютерів для проведення розрахунків на високому рівні [6].

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Дослідити актуальність використання нейронних мереж та основні етапи оптимізації під час пошуку спортивного інвентарю для гри в настільний теніс.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під штучною нейронною мережею варто розуміти певну математичну модель або пристрій оснований на паралельних обчисленнях, які являють собою систему замкнених та залежних між собою зв'язків тривіальних процесорів чи штучних нейронів. Характеризуючи математичну модель штучних нейронних мереж можна відмітити, що вона є частинним випадком дискримінантного аналізу, а отже процесори які використовуються в роботі є простими на відміну від процесорів, які використовуються в персональних комп'ютерах. Це пояснюється тим, що нейромережеві процесори оперують тільки із сигналами, які періодично отримують та періодично передають наступним процесорам. Незважаючи на простоту роботи процесорів, відмітимо, що завдяки об'єднанню в масштабну мережу із управлінською взаємодією, такі прості, в локальному розумінні, процесори мають змогу розв'язувати досить складні завдання [5].

На практиці штучну нейронну мережу асоціюють із зв'язаним між собою набором штучних нейронів. У більшості випадків передатні функції є фіксованими для всіх нейронів розташованими в мережі, під параметрами меж розглядаються ваги, які при потребі можуть змінюватися. Вводячи до розгляду на входи мережі певні набори чисел ми матимемо якийсь набір чисел тільки вже відповідно на виходах мережі. Іншими словами роботу нейромережі можна описати, як процес перетворення вхідного вектора із наперед вказаними вагами мережі у вихідний вектор.

Варто звернути увагу на те, що нейронні мережі, в звичайному для нас розумінні, не програмуються, вони навчаються. Значною перевагою нейронних мереж над звичними для нас алгоритмами є те, що при побудові штучних нейронних мереж присутній етап навчання мережі. Головна мета навчання мережі зосереджена на відшуканні коефіцієнтів зв'язків між нейронами. Під час навчання нейрона, є можливість з'ясувати існуючі зв'язки між вхідними та вихідними даними та проводити здійснювати узагальнення. Якщо навчання пройде успішно, то нейронна мережа запропонує правильний результат спираючись на дані, які не були представлені у початковій навчальній вибірці. Більшість практичних задач можна звести до задачі, яка розв'язується за допомогою штучних нейронних мереж. Головна мета полягає у вдалому навчанні мережі, тобто поясненні завдання, які від неї вимагаються до виконання.

Розглянемо алгоритм проведення оцінки за критеріями відповідності елементів. Для цього характеристики елементів представимо у вигляді вектора

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

який представляє усереднений образ

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n). \quad (2)$$

Фундаментальною теоремою для побудови пошукової системи за вказаними критеріями на основі нейронних мереж слугує теорема А. Н. Горбаня [5]: для довільної кількості пар вхідних-вихідних векторів довільної розмірності

$$(X^k, Y^k), k = \overline{1, K}$$

нейронна мережа характеризується послідовними зв'язками, з сигмоїдальними функціями,  $f(s) = 1/(1 + e^{-as})$ , а також скінченним числом нейронів, де для вхідного вектора  $X^k$  формується у відповідність вихідний вектор  $Y^k$ .

Якщо необхідно дослідити багатовимірні функції великої кількості змінних видається за доцільне використати двошарову однорідну нейронну мережу для успішної реалізації пошукової системи за критеріями відповідності. Крім цього необхідно провести оцінку числа нейронів, які розташовуються у прихованих шарах. Для цього необхідно розглянути число синаптичних ваг  $\delta_w$  межах досліджуваної багатошарової мережі

$$\frac{\delta_y + \delta_p}{1 + \log_2(\delta_p)} \leq \delta_w \leq \delta_y \left( \frac{\delta_p}{\delta_x} \right) \cdot (\delta_x + \delta_y + 1) + \delta_y,$$

де  $\delta_x, \delta_y$  – розглядаються як розмірність вхідного, вихідного сигналу,  $\delta_w$  – число елементів початкової вибірки.

Після проведення оцінки числа ваг, варто провести оцінку числа нейронів у прихованих шарах

$$\delta = \frac{\delta_w}{\delta_x + \delta_y}.$$

Кінцевим етапом створення мережі для пошуку за певними критеріями відповідності елементів, а в нашому випадку вдалому підборі інвентарю для гри в настільний теніс, вважається процес створення вагових коефіцієнтів для кожного окремого нейрона, на кожному з шарів новоствореної мережі. Узагальнена модель нейрона зображується у вигляді на рис. 1 [2]:

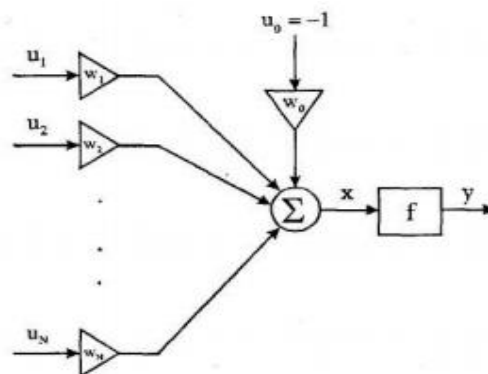


Рис. 1 Узагальнена модель нейрона

$u_1, \dots, u_N$  – вхідні сигнали досліджуваного нейрона, які надходять від інших нейронів;  $w_1, \dots, w_N$  – синаптичні ваги;  $y$  – вихідний сигнал нейрона. Легко бачити, що нейрон можна описати своїми вагами та передатними функціями.

Провівши детальний аналіз наукових праць в галузі інформаційних технологій, можна з впевненістю стверджувати, що практичне використання нейромережевих пошукових систем є невід'ємною складовою сучасного розвитку більшої частини наукових спрямувань, так як забезпечує оптимальні результати при вирішенні важливих завдань, зокрема при виборі інвентарю для гри в настільний теніс [6]. Наукові доробки тренерів педагогів акцентують увагу на тому, що вдало підібраний інвентар забезпечить високу техніко-тактичну підготовку та точність рухів гравців.

**Висновки.** Нейромережеві системи утворюють новий високотехнологічний напрям в розвитку більшості галузей науки та мають фундаментальне значення в практичному використанні. Розглянуто основні етапи проведення традиційних обчислень та доцільності переходу до оптимізаційних методів з метою успішного вибору інвентарю для гри в настільний теніс. Досліджено процес побудови штучних нейронних мереж та основні етапи проведення критеріїв оцінок для шуканих параметрів задач із використанням сигмоїдальної передатної

функції, наведено у вигляді схеми узагальнену модель нейрона. Встановлено, що штучні нейромережеві пошукові системи складаються з базового блоку – штучного нейрона. Описана фундаментальна теорема А. Н. Горбаня для побудови пошукових нейромережевих систем з використанням критеріїв відповідності. Практичне значення теореми полягає в перетворенні вхідного вектора у вихідний із обов'язковим врахуванням ваг мережі. Спосіб з'єднання між нейронами має вагомий вплив на результативну роботу мережі.

Сучасні пакети комп'ютерних програм дають змогу користувачеві вносити зміни у роботу нейромережевих систем завдяки корегуванню параметрів зв'язків, залежно від умови задачі. Існує велика різноманітність підходів у роботі інженерів - програмістів для побудови ефективних нейромереж. Таким чином, стає зрозуміло, що будь-яку задачу різної природи виникнення можна розв'язати із використанням штучних нейромережевих систем. Перспективи подальших досліджень процесів оптимізації при виборі інвентарю для гри в теніс полягає у розвитку теорії штучних нейронних мереж та практичній реалізації існуючих методів та основних підходів використання нейронних архітекторів.

### Література

1. Барчукова Г.В. Системи искусственного интеллекта / Г.В. Барчукова, В. М. Богушас, О.В. Матыцин; под ред. Г.В. Барчуковой. - М.:Издательскийцентр «Академия», 2012. – 528 с.
2. Горбань А. Н. Обучение нейронных сетей / А. Н. Горбань. – Москва : СП «ПараГраф», 2016. –160 с.
3. Кравец П.И. Метод оптимизации весовых коэффициентов нейронных сетей с помощью генетического алгоритма при реализации на программируемых логических интегральных схемах / П.И. Кравец, В.Н. Шимкович // «Электронное моделирование». – 2013. – №3. – С. 65-75.
4. Ландик В.І. Методология спортивной подготовки:Настольный Теннис / В.І.Ландик, Ю.Т. Похолечук, Г.Н. Арзютов– Донецк: Норд Прес, 2017. – 592 с.
5. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов / В.А.Терехов, Д.В.Ефимов , И.Ю. Тюкин. – М: Высшая школа. 2014. – 183с.
6. Petr I. Kravets, Tatyana I. Lukina, Valeriy A. Zhrebko, Vladimir N. Shimkovich. Methods of Hardware and Software Realization of Adaptive Neural Network PID Controller on FPGA-Chip. // Journal of Automation and Information Sciences. New York, USA, 2017, Vol. 43 / Issue 4, P. 70-77.

Стаття надійшла до редакції 20.06.2018

УДК: 621.9.048.669.268

В.Б. Тарельник<sup>1</sup>, О.П. Гапонова<sup>2</sup>, А.В. Радионов<sup>3</sup>Сумський національний аграрний університет<sup>1</sup>Сумський державний університет<sup>2</sup>ООО «НПВП «Феррогродинамика»<sup>3</sup>**ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*В работе рассмотрены особенности формирования электроэрозионных покрытий стальных деталей алюминием (алитирование), серой (сульфидирование) и углеродом (цементация), которые могут применяться с целью повышения твердости, износостойкости, предотвращения схватывания при трении и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии поверхностей деталей. При электроэрозионном легировании графитовым электродом стальных деталей с энергией разряда  $W_p = 0,52 - 6,8$  Дж и производительностью 1,0 - 3,0 см<sup>2</sup>/мин на поверхность детали, подлежащую алитированию, наносят консистентное вещество, содержащее серу и алюминиевую пудру, после чего, не дожидаясь высыхания консистентного вещества, проводят процесс легирования, причем, применяют консистентное вещество с содержанием алюминиевой пудры не более 56%. Проведен металлографический и дюрOMETрический анализ поверхностных слоев углеродистых сталей после одновременного алитирования, сульфидирования и цементации методом ЭЭЛ. Показано, что структура слоя состоит из трех участков: «белого» слоя, диффузной зоны и основного металла. С увеличением энергии разряда снижаются такие качественные параметры поверхностного слоя, как толщина, микротвердость и сплошность «белого» слоя, шероховатость поверхности увеличивается.*

*Ключевые слова:* электроэрозионное легирование, поверхностный слой, алитирование, сульфидирование, цементация, микротвердость, микроструктура.

В.Б. Тарельник, О.П. Гапонова, О.В. Радіонов

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІНТЕГРОВАНІХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ**

*У роботі розглянуті особливості формування електроерозійних покриттів сталевих деталей алюмінієм (алітування), сіркою (сульфідуювання) і вуглецем (цементация), які можуть застосовуватися з метою підвищення твердості, зносостійкості, запобігання схоплюванню при терті і для поліпшення опору атмосферній корозії поверхонь деталей. При електроерозійному легуванні графітовим електродом сталевих деталей з енергією розряду  $W_p = 0,52 - 6,8$  Дж і продуктивністю 1,0 - 3,0 см<sup>2</sup> / хв на поверхню деталі, що підлягає алітуванню, наносять консистентну речовину, що містить сірку і алюмінієву пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес легування, причому, застосовують консистентну речовину з вмістом алюмінієвої пудри не більше 56%. Проведений металогіфічний і дюрOMETричний аналіз поверхневих шарів вуглецевих сталей після одночасного алітування, сульфідуювання і цементацияї методом ЕЕЛ. Показано, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду знижуються такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, микротвердість і суцільність «білого» шару, шорсткість поверхні збільшується.*

*Ключові слова:* електроерозійне легування, поверхневий шар, алітування, сульфідуювання, цементация, микротвердість, микроструктура.

V.B. Tarelnyk, O.P. Gaponova, A.V. Radionov

**INCREASING THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL SAFETY IN USING INTEGRATED METHODS OF INCREASING THE QUALITY OF STEEL PARTS**

*The features of the formation electroerosion coatings of steel parts by aluminum (aluminizing), sulfur (sulphiding) and carbon (cementation), which can be used to increase hardness, wear resistance, prevent frictional friction and improve the resistance of atmospheric corrosion of the surfaces of parts are considered. During electroerosion alloying with a graphite electrode of steel parts with a discharge energy of  $W_p = 0.52 - 6.8$  J and a productivity of 1.0 - 3.0 cm<sup>2</sup> / min, a consistent substance containing sulfur and aluminum powder is applied to the surface of the part to be aluminized, after which, without waiting for the drying of the consistency substance, the alloying process is carried out, moreover, a consistent substance with an aluminum powder content of not more than 56% is used. Metallographic and durometric analysis of surface layers of carbon steels after simultaneous aluminizing, sulphiding and cementation by the EEL method was carried out. It is shown that the structure of the layer consists of three sections: "white" layer, diffuse zone and base metal. With an increase in the discharge energy, such qualitative parameters of the surface layer as the thickness, microhardness and continuity of the "white" layer decrease, the surface roughness increases.*

*Key words:* electroerosion alloying, surface layer, aluminizing, sulphiding, cementation, microhardness, microstructure.

**Постановка проблеми.**

Химико-термическая обработка (ХТО), на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных методов упрочнения поверхности деталей для повышения их долговечности. Процессы ХТО в зависимости от насыщающего элемента делят на однокомпонентные, в которых насыщение проводится одним компонентом, например, углеродом (цементация), азотом

(азотирование), алюминием (алитирование) и др., и многокомпонентные, при котором металл насыщают одновременно несколькими элементами, например, углеродом и азотом (нитроцементация), бором и алюминием (бороалитирование) и др.

Несмотря на то, что в результате ХТО значительно повышается качество поверхностных слоев деталей машин, метод имеет и ряд недостатков. Это объемный нагрев детали, приводящий к изменению ее структуры и начальных геометрических параметров (поводки и коробления); громоздкое и дорогостоящее технологическое оснащение; длительность процесса, использование энергоемкого оборудования и др. Кроме этого отдельные операции ХТО небезопасны для окружающей среды. Так, основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей и необходимость в связи с этим принятия специальных мер по охране труда.

В последние годы, для повышения качества поверхностных слоев деталей машин, все большую значимость приобретает метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) – процесс перенесения материала на поверхность изделия искровым электрическим разрядом. Его специфическими особенностями, которые привлекают технологов, являются: экологическая безопасность, локальность действия, малая затрата энергии, отсутствие объемного нагрева материала, прочное соединение нанесенного материала с основой, простота автоматизации, возможность сочетания операций. Используя различные электродные материалы методом ЭЭЛ можно проводить процессы, альтернативные ХТО, но со значительно меньшими затратами. Так, используя графитовый электрод и насыщая поверхность детали углеродом можно осуществлять процесс цементации, ЭЭЛ алюминиевым электродом – процесс алитирования и др.

Таким образом, проблема разработки энергоэффективных, энергосберегающих и при этом экологически чистых технологий формирования поверхностных слоев деталей, альтернативных химико-термической обработке, в достаточной степени сохраняющих ее достоинства и лишенных недостатков является весьма актуальной.

#### **Анализ последних исследований и публикаций.**

В [1] описан способ сульфидирования, который представляет собой термохимический процесс обработки изделий, изготовленных из сплавов на основе железа, для обогащения поверхностных слоев серой. Эффект сульфидирования сводится к созданию на поверхности детали пленки сульфидов. Сульфиды повышают поверхностную активность металлов и сплавов, а также обеспечивают смачивание поверхностно активными веществами и улучшают сопротивление схватыванию. Сульфидная пленка, имеющая меньшую прочность, чем основной металл, легко разрушается при трении и отделяется от основания без пластического его деформирования, предотвращая схватывание поверхностей трения. Пленка сульфида железа (FeS) повышает износостойкость трущихся поверхностей и улучшает их прирабатываемость. Ферросульфидное покрытие обладает довольно высокой пористостью и впитывает большое количество смазки, сообщая материалу свойство самосмазывания.

В работе [2] предложен способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ), который имеет ряд достоинств, основными из которых являются: достижение 100% сплошности упрочненного поверхностного слоя; повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов; возможность осуществления легирования в строго указанных местах без необходимости в одновременной защите остальной поверхности детали; отсутствие объемного нагрева детали, а, следовательно, поводок и короблений; простота применения технологии; гибкая привязка к имеющемуся оборудованию; процесс упрочнения не требует специальной подготовки и высокой квалификации рабочего и т.д. При ЦЭЭЛ стальных деталей толщина упрочненного слоя зависит от энергии разряда и времени легирования (производительности процесса). С увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. Однако при этом возрастает и шероховатость поверхности.

Известен также способ ЦЭЭЛ [3], в котором с целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, с сохранением высокого качества поверхностного слоя (отсутствие микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, высокая сплошность покрытия и др.), расширения области применения процесса ЭЭЛ, предлагается после ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом) производить легирование этим же электродом, но поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда.

С целью повышения твердости, износостойкости и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии стальных деталей нередко применяется способ алитирования [4], который включает нанесение алюминиевого слоя на стальную поверхность (обычно напылением), обмазку



и отжиг. Распыл частиц алюминия должен быть крупным, что ускоряет диффузию алюминия в поверхностный слой металла при отжиге. Обмазку наносят на поверхность сплошным слоем в два три приема и строго соблюдают режим термодиффузионной обработки, сохраняющей слой обмазки. После нанесения алюминиевого покрытия и обмазки проводят термодиффузионное насыщение поверхностного слоя – деталь подвергают отжигу. Начальная температура 600-650°C, затем ведется быстрый нагрев до 900-950°C с выдержкой 2,5-3,5 ч, после чего деталь медленно охлаждают вместе с печью до температуры 500-550°C, а затем на воздухе. Толщина наносимого покрытия расплавленным алюминием зависит от температуры эксплуатации детали: для температуры 700-800°C толщина покрытия составляет 0,2-0,3 мм, а для температуры 900-1000°C - 0,5-0,7 мм. После металлизации алюминием деталь покрывают 10-20% раствором хлористого алюминия, затем обмазывают жидким стеклом, посыпают кварцевым песком и просушивают при температуре 100°C. Просушенную деталь вновь обмазывают жидким стеклом и снова сушат. При температуре 600-700°C деталь загружают в печь и нагревают до температуры 1200-1250°C с выдержкой 14-40 мин, после чего медленно охлаждают сначала в печи до температуры 800°C, а затем на воздухе. Наряду с положительными результатами, выше описанная технология имеет ряд недостатков: высокая себестоимость и трудоемкость процесса; необходимость контроля на всех этапах технологии; нагревание всей детали, и соответственно, структурные изменения металла; поводки и коробления; длительность процесса более 8 часов; большой расход электроэнергии; отрицательное воздействие на экологию и др.

В соответствии с работой [5], электроискровым осаждением титана на алюминий и алюминия на титан созданы покрытия, содержащие интерметаллиды системы Ti-Al. Применяя методы электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов, изучены структура и состав покрытий. Установлено, что независимо от длительности и частоты разрядных импульсов, формируемый в аргоне поверхностный слой, в основном, содержит интерметаллид  $\alpha$ -TiAl<sub>3</sub>. Фазы  $\gamma$ -TiAl и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al могут быть получены при осаждении алюминия на титан с последующим нанесением второго слоя титана. При формировании электроискровых покрытий в воздухе дополнительно образуются оксид алюминия и нитрид титана. Данная технология также выполняется в защитной среде, например, аргона и применяется только для деталей из титана.

Авторы работы [6] предлагают способ алитирования электроэрозионным легированием (ЭЭЛ) алюминиевым электродом стальных деталей при энергии разряда  $W_p = 0,52 - 6,8$  Дж и производительности 1,0 – 3,0 см<sup>2</sup>/мин. Способ обеспечивает формирование так называемого белого (алитированного) слоя толщиной 70 – 130 мкм, микротвердостью 5000 – 7500 МПа, шероховатостью (Ra) 6-9 мкм и сплошностью 95 – 100%. Следует отметить, что при данном способе обработки максимальная микротвердость поверхностного слоя получена при наибольшей энергии разряда  $W_p = 6,8$  Дж и равна 5000 – 7500 МПа, соответственно, на подложках из стали 20 и 40, что не всегда достаточно для защиты от разрушения поверхностей стальных деталей, подвергаемых воздействию различных видов износа (абразивного, кавитации, фреттинг коррозии и др.). Кроме того, при сухом (без смазки) контакте алитированной таким способом поверхности детали возможно схватывание, заедание, микросваривание и вырыв отдельных участков поверхности.

В работе [7] рассмотрен способ сульфоцементации электроэрозионным легированием графитовым электродом стальной поверхности изделия, при котором непосредственно перед легированием графитовым электродом на стальную поверхность наносят консистентное вещество, содержащее серу. При этом одновременно протекает два процесса цементация и сульфидирование. Основным недостатком данного способа является: невозможность обеспечения защиты детали от окисления при высоких температурах (700 – 900 °C и выше), так же, как и от атмосферной коррозии и морской воды.

Анализ литературы показал, что возникает необходимость в решении задачи, направленной на создание нового способа получения комплексных C-S-Al-покрытий стальных деталей методом электроэрозионного легирования графитовым электродом, лишённого указанных выше недостатков и обеспечивающего повышение твердости и износостойкости деталей, предотвращающего схватывание при трении и улучшающего сопротивление атмосферной коррозии.

**Постановка заданий.** Таким образом, целью работы является разработка нового способа обработки стальных деталей методом электроэрозионного легирования – получение комплексных C-S-Al-покрытий, обеспечивающего повышение твердости и износостойкости деталей,

предотвращающего схватывание их при трении и улучшающего сопротивление атмосферной коррозии.

**Методика исследований.** С целью определения влияния энергетических параметров оборудования ЭЭЛ на качественные параметры покрытий, изготавливали образцы из стали 20 и 40 размером 15x15x8 мм, на которые наносили консистентное вещество в виде серной мази с содержанием серы 33,3%. Перед нанесением в серную мазь добавляли алюминиевую пудру марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95). Максимальное количество пудры составляло 56%. Дальнейшее увеличение количества пудры приводило к снижению адгезии с поверхностью, подлежащей алитированию. После этого, не дожидаясь высыхания консистентного вещества, производили ЭЭЛ графитовым электродом марки ЭГ-4 на установке модели «Элитрон – 52А» с применением различных режимов. Кроме этого на образцах стали 20 проводили поэтапное снижение энергии разряда с  $W_p = 6,8$  до 2,6 и 0,52 Дж.

Каждому режиму ЭЭЛ соответствовала своя энергия разряда и производительность – площадь сформированного покрытия в единицу времени (табл. 1).

Таблица 1.

**Зависимость производительности ЭЭЛ от энергии разряда**

Энергия разряда ( $W_p$ ), Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Производительность, $см^2/мин$	1,0-1,3	1,3-1,5	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

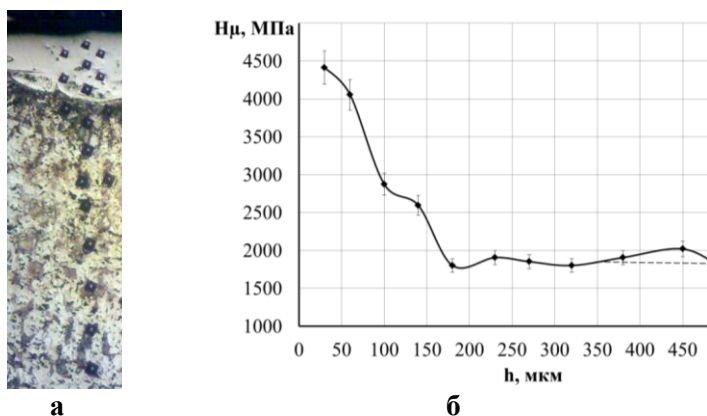
Следует отметить, что снижение производительности ЭЭЛ влечет за собой снижение качественных параметров поверхностного слоя, то есть, появление прижогов, а главное, разрушение сформированного слоя, что особенно сказывается на более «грубых» режимах при энергии разряда  $W_p > 1$  Дж. Увеличение производительности приводит к снижению сплошности покрытия.

Металлографический анализ покрытий выполняли с помощью оптического микроскопа МИМ-7, дюраметрические исследования проводили на приборе ПМТ-3. Шероховатость поверхности после ЭЭЛ определяли на профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм.

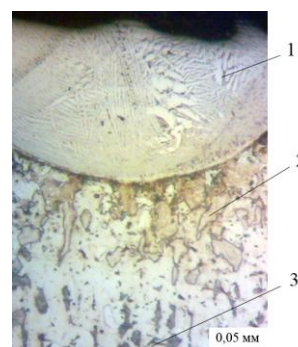
Для исследования распределения серы по глубине слоя проводился локальный микрорентгеноспектральный анализ, для этого использовался оснащенный рентгеноспектральным микроанализатором электронный микроскоп ISIS 300 Oxford Instruments.

**Изложение основного материала.** В результате предыдущих исследований нами предложен новый способ, состоящий в одновременном насыщении стали углеродом, серой и алюминием, методом ЭЭЛ поверхностей стальных деталей, который может быть применен с целью повышения их твердости, износостойкости, предотвращения схватывания при трении и для улучшения сопротивления атмосферной коррозии. Перед ЭЭЛ алюминиевым электродом стальных деталей с энергией разряда  $W_p = 0,52 - 6,8$  Дж и производительности 1,0 - 3,0  $см^2/мин$  на поверхность детали, подлежащую алитированию, наносят консистентное вещество, содержащее серу и алюминиевую пудру, после чего, не дожидаясь высыхания консистентного вещества, проводят процесс алитирования методом ЭЭЛ алюминиевым электродом, причем, применяют консистентное вещество с содержанием алюминиевой пудры не более 56 % [8]. Там же для практического применения рекомендуются режимы (энергия разряда  $W_p = 2,6-6,8$  Дж и производительность 2,0-3,0  $см^2/мин$ ), которые обеспечивают формирование «белого» слоя толщиной 110-240 мкм, микротвердость 4200-5400 МПа, шероховатость (Ra) 3,7-7,3 мкм и сплошность 100%.

На рис. 1 показана микроструктура сформированного поверхностного слоя на образце из стали 20, покрытого консистентным веществом, содержащим 33,3% серы и 56% алюминиевой пудры при ЭЭЛ алюминиевым электродом с энергией разряда  $W_p = 6,8$  Дж (а) и распределение микротвердости по мере углубления с поверхности (б).



**Рис. 1.** Микроструктуры (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое (б) образца стали 20 после ЭЭЛ алюминием.



**Рис. 2.** Микроструктура образца 2-й серии стали 20: 1, 2, 3 – зоны в области кратера

Характерной особенностью структуры, сформированной поверхности, является массивный «белый» слой, толщина которого на отдельных участках составляет от 160 до 200 мкм (рис. 1, а). Микротвердость на поверхности составляет порядка 5000 МПа. По мере углубления микротвердость плавно снижается и на глубине 170 мкм переходит в микротвердость основы (1700 МПа).

Замена легирующего электрода (алюминия) на графит влечет за собой значительные изменения микроструктуры, сплошности и микротвердости поверхностного слоя.

Микроструктурный анализ показал, что в поверхностном слое наблюдается образование отдельных лунок, глубиной до 150 мкм.

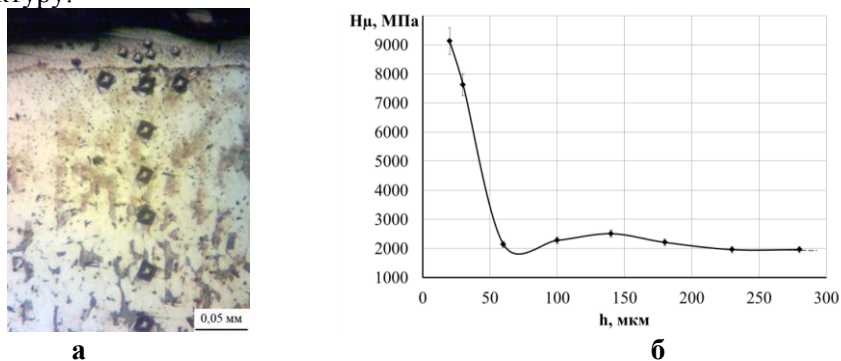
Как показано в работе [9] при прохождении электроискрового разряда в металле образуется лунка – кратер, глубина и диаметр которой зависят от параметров электроискрового воздействия. Искровой разряд сопровождается выделением тепла, скорость нарастания температуры составляет  $10^5$  °С/сек, что характерно только для взрывных процессов [10].

По данным работы [11], около 25% объема металла электроэрозионных кратеров приобретает температуру кипения, мгновенные давления на поверхности достигают сотен тысяч атмосфер.

На образце стали 20 в области кратера различается три зоны (рис. 2).

Первая зона – оплавления, плохо травится, металл этой зоны при ЭЭЛ находился в жидком состоянии. Она состоит из столбчатых кристаллов, большая скорость кристаллизации определила анизотропию роста кристаллов, т.е. преимущественный рост главных осей дендритов, ориентированных в направлении отвода тепла. Толщина слоя столбчатых кристаллов на боковой поверхности растет от дна к выходу лунки [12].

Вторая – переходная зона прилегает к первой, состоит из зерен сложной формы – зона термического влияния. Третья – зона исходного металла прилегает к первым двум, имеет исходную структуру.



**Рис. 3.** Микроструктура (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое (б) образца стали 20 после ЭЭЛ графитом

При ЭЭЛ стали 20 графитом, по сравнению с обработкой алюминием, с энергией разряда  $W_p = 6,8$  Дж/см<sup>2</sup> сплошность «белого» слоя, как и его толщина снижаются, соответственно до 50 % и

60 мкм. В свою очередь микротвердость на поверхности повышается до 9000 МПа (рис. 3 и табл. 2).

В табл. 2 приведены качественные параметры поверхностных слоев стали 20 и стали 40 при сульфоцементоалитировании методом ЭЭЛ с энергией разряда 0,52; 2,60 и 6,80 Дж.

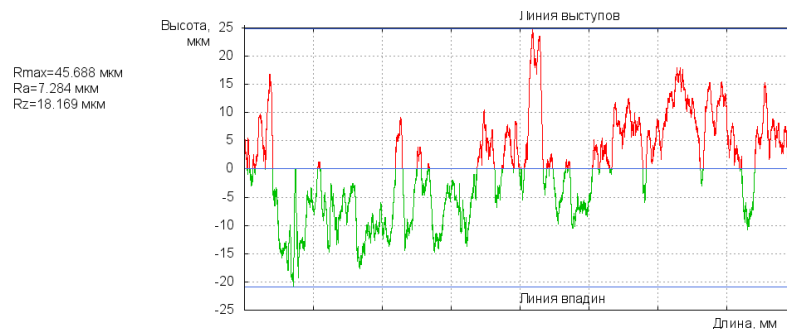
Таблица 2.

**Качественные параметры поверхностных слоев стали 20 и стали 40 при сульфоцементоалитировании методом ЭЭЛ**

Энергия разряда, Дж	Толщина белого слоя, мкм	Микротвердость белого слоя, МПа	Шероховатость, мкм			Сплошность белого слоя, %
			Ra	Rz	Rmax	
Сталь 20						
0,52	150	9300±50	2,1	3,9	8,9	90
2,60	110	9200±70	4,2	8,7	30,2	80
6,8	до 60	9000±50	8,5	10,2	62,4	50
Поэтапно 6,8 и 2,6	до 60	9000±50	4,3	8,4	32,3	70
Поэтапно 6,8; 2,6 и 0,52	до 60	9000±50	2,6	4,4	11,5	80
Сталь 40						
0,52	до 180	9500±50	1,9	3,8	8,7	90
2,60	до 130	9300±50	3,9	8,5	15,3	80
6,8	до 80	9100±50	7,8	11,3	58,1	60

В работе [13] показано, что при электроискровой обработке сплавов на основе железа возникает значительное уменьшение размеров блоков субструктуры, увеличение плотности дефектов и возрастание микроискажений в зоне термического влияния. Такие изменения в микроструктуре и субструктуре стали приводит к заметному повышению микротвердости «белого слоя» (рис. 3). Определенную роль в повышении твердости могут играть элементы атмосферы (азот, кислород), которые, переходя под действием электрических разрядов в активное состояние, могут взаимодействовать с поверхностными слоями и упрочнять материал.

Следует отметить, что при одновременном насыщении стали углеродом, серой и алюминием, методом ЭЭЛ с меньшей энергией разряда приводит к снижению величины шероховатости поверхности и повышению сплошности покрытия (см. табл. 2).



**Рис. 4. Профилограмма поверхностного слоя образца из стали 20 при ЭЭЛ графитовым электродом**

На рис. 4 представлена профилограмма участка сульфоалитированной поверхности образца стали 20 при ЭЭЛ графитовым электродом с энергией разряда  $W_p = 6,8$  Дж.

Таблица 3.

**Содержание серы в поверхностном слое стали 20 при одновременном насыщении стали углеродом, серой и алюминием методом ЭЭЛ**

Глубина измерения, мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Наличие серы, %	0,21	0,15	0,12	0,09	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03

Наличие в консистентном веществе серы способствует процессу сульфидирования. В табл. 3 представлено изменение содержания серы по мере углубления от поверхности при сульфоалитировании стали 20 методом ЭЭЛ с энергией разряда 6,80 Дж.

**Выводы.** 1. Рассмотрены возможности применения экологически чистого процесса одновременного насыщения углеродом, серой и алюминием стальных поверхностных слоев деталей машин методом электроэрозионного легирования.

2. Проведен металлографический и дюрометрический анализ особенностей поверхностных слоев углеродистых сталей после одновременного насыщения стали углеродом, серой и алюминием методом ЭЭЛ. Показано, что структура слоя состоит из трех участков: «белого» слоя, диффузной зоны и основного металла. С увеличением энергии разряда снижается толщина, микротвердость и сплошность «белого» слоя, а шероховатость поверхности возрастает.

3. Наличие в консистентном веществе серы способствует процессу сульфидирования. Содержание серы по мере углубления с поверхности при сульфидировании стали 20 методом ЭЭЛ графитовым электродом с энергией разряда 6,80 Дж снижается и на глубине 160 мкм соответствует ее количеству в основе.

4. Сравнительный анализ влияния подложки на качественные параметры поверхностного слоя электроэрозионных покрытий показал, что при замене стали 20 на сталь 40 увеличивается толщина «белого» слоя и переходной зоны, т.е. глубина зоны повышенной твердости, а также величина ее микротвердости. Шероховатость поверхности и сплошность «белого» слоя изменяются незначительно.

5. Одновременное насыщение стали углеродом, серой и алюминием методом ЭЭЛ с меньшей энергией разряда снижает величину шероховатости поверхности и повышает сплошность покрытия.

#### Список используемой литературы:

1. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В. Д. Зозуля, Е. Л. Шведков, Д. Я. Ровинский, Э. Д. Браун. – Киев: Наук. думка, 1990. – 264 с.
2. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием. Пат. 2337796. Российская Федерация. МПК В 23Н 9/00 / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В.; Заявлено 05.10.2006; Опубликовано 10.04.2008, Бюл. № 31. с.3.
3. Патент Российской Федерации на изобретение № 2468899. МПК В 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием /Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., М.П. Братушак/ Оpubл. 10.12. 2012, Бюл. № 34
4. Елизаветин М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э.А. Сателъ. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
5. Пячин С. А. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана / С. А. Пячин, А. А. Бурков, В. С. Комарова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. - № 6. – С. 16–24.
6. Патент України на корисну модель UA 119316 U МПК (2017.01) C23C 10/48 (2006.01) B23H 9/00. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей / Тарельник В.Б. Марцинковський В.С. Білоус А.В. Гапонова О.П. Коноплянченко Є. В. Антошевський Б. Кундера Ч. Жуков О.М. – № u201701845; заявл. 27.02.2017; опубл. 25.09.2017. – Бюл. № 18/2017
7. Патент України на корисну модель UA 119318 U МПК (2017.01) B23H 1/00 B23H 9/00 C23C 8/60 (2006.01). Спосіб сульфодентации сталевих деталей / Тарельник В.Б. Марцинковський В.С. Білоус А.В. Гапонова О.П. Коноплянченко Є.В. Антошевський Б. Кундера Ч. Жуков О.М. – № u201701847; заявл. 27.02.2017; опубл. 25.09.2017. – Бюл. № 18/2017.
8. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova // Journal of Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 5, Issue 1. – P. 16-20.
9. Химухин, С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 127 с.
10. Ставицкая Н. Б. Исследование форм и размеров лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами / Н. Б. Ставицкая, Б. И. Ставицкий // Электронная обработка материалов. – 1980. - № 1. – С. 9-13.
11. Палатник Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий // ДАН СССР. – 1953. – № 89. – С.455-458.
12. Иерусалимская А.Н. Структурные изменения вещества при воздействии световых импульсов ОКГ / А. Н. Иерусалимская, В. И. Самойлов, П.И Уляков // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 4. – С. 26-34.
13. Химухин С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография / С. Н. Химухин, Хосен Ри, Э. Х. Ри. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 127 с.

#### Рецензенти:

**Залога В.О.**, завідуючий кафедрою «Технологія машинобудування, верстати та інструменти», доктор технічних наук, професор, Сумський державний університет

**Пермяков О.А.**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Стаття надійшла до реакції 14.06.2018

УДК 517.45

В.М. Тимошук, П.І. Гінайло, С.М. Лісковець, О.В. Гуда

Луцький національний технічний університет

ПРО ДЕЯКІ ОЦІНКИ МОДУЛЯ НЕПЕРЕРВНОСТІ БІГАРМОНІЧНОЇ ФУНКЦІЇ В  
ОБЕРНЕНИХ ТЕОРЕМАХ НАБЛИЖЕННЯ

У даній роботі сформульовано і доведено теореми, які дають можливість визначити наближення, що забезпечують існування похідних відповідного порядку граничної функції. Наведений метод доведення дає можливість коректно розв'язати обернену задачу і визначити умови, при яких досліджувана початкова умова мала похідні до певного порядку включно. Одержані результати можуть бути поширені на інші функції (зокрема, функції бігармонічні півплощині).

*Ключові слова:* бігармонічна функція, обернена теорема, нерівність Мінковського, модуль неперервності.

В.Н. Тимошук, П.И. Гинайло, С.М. Лисковец, О.В. Гуда

О НЕКОТОРЫХ ОЦЕНКАХ МОДУЛЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ БИГАРМОНИЧЕСКОЙ  
ФУНКЦИИ В ОБРАТНЫХ ТЕОРЕМАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ

В данной работе сформулированы и доведены теоремы, дающие возможность определить приближения, которые обеспечивают существование производных соответствующего порядка. Приведенный метод доказательства дает возможность корректно решить обратную задачу, определить условия, при которых исследуемое начальное условие имеет производные до определенного порядка включительно. Полученные результаты можно использовать и при исследовании функций бигармоническими в полуплоскости.

*Ключевые слова:* бигармоническая функция, обратная теорема, неравенство Минковского, модуль непрерывности.

V. Toomoshchook, P. Ginaylo, S. Liskovets, O. Guda

ABOUT SOME EVALUATIONS OF THE IMMUNITY MODULE OF BIGARMMONIC  
FUNCTION IN THE RELATED APPROXIMATIVE THEOREMS

In this paper, theorems are formulated and proved, which make it possible to determine approximations that ensure the existence of derivatives of the corresponding order of the boundary function. The given method of proof makes it possible to correctly solve the inverse problem and determine the conditions under which the initial condition studied has derivatives to a certain order inclusive. The results obtained can be extended to other functions (in particular, biharmonic functions in the plane).

*Key words:* biharmonic function, inverse theorem, Minkowski inequality, continuity module.

**Постановка проблеми.** В статті [1] одержані обернені теореми наближення бігармонічними функціями в крузі. В цих теоремах за заданою швидкістю відхилення бігармонічних функцій від своїх граничних значень встановлено неперервність граничних значень (за відповідною метрикою) і оцінюється модуль неперервності другого порядку цього граничного значення.

У запропонованій роботі згадані обернені теореми доповнюються такими властивостями наближень, які забезпечують існування похідних певного порядку граничної функції і оцінюється модуль неперервності похідної найвищого можливого порядку.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Класична теорія наближення функцій оволоділа рядом ефективних методів для дослідження прямих і обернених теорем своєї теорії. Ці методи виявились плідними до якісного дослідження розв'язків крайових задач в плоских канонічних областях. Першими в цьому плані були результати 50-х років І.П. Натансона, О.П. Тіммана [2], які стосувались оцінок відхилення гармонійних функцій від їх значень на межі в термінах модулів неперервності крайових даних. Їх дослідження підтвердило думку про природну залежність поведінки розв'язків задачі Діріхле від властивостей функцій, заданих на межі. В даний час проводяться дослідження розв'язків більш загальних рівнянь з крайовими даними із різних функціональних класів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо функції бігармонічні в крузі. Нехай задано бігармонічне рівняння

$$\Delta^2 u = 0. \quad (1)$$

Позначимо  $u_f(\varphi, r) = u(\varphi, r)$  розв'язок рівняння (1) в одиничному крузі, що задовільняє граничним умовам

$$u(\varphi, r)|_{r=1} = f(\varphi); \quad \frac{\partial u}{\partial r} u(\varphi, r)|_{r=1} = 0. \quad (2)$$

Розв'язок граничної задачі (1), (2) можна записати у вигляді

$$u_f(\varphi, r) = \frac{(1-r^2)^2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi+t) \frac{1-r \cos t}{(1-2r \cos t+r^2)^2} dt. \quad (3)$$

Клас таких функцій позначимо через  $B_\varphi$ . Позначимо через  $L_p[-\pi; \pi]$   $1 \leq p \leq \infty$ , клас  $2\pi$ -періодичних функцій  $\varphi(x)$   $-\pi \leq \varphi \leq \pi$  з кінцевою нормою, що визначається співвідношенням

$$\|f\| = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^p d\varphi \right\}^{\frac{1}{p}}, \text{ якщо } 1 \leq p < \infty$$

$$\|f\| = \text{ess sup}_{-\pi \leq \varphi \leq \pi}, \text{ якщо } p = +\infty.$$

Зауважимо, що у випадку  $k=2$  теорема отримана в [1]. Для доведення теореми необхідно використати деякі допоміжні твердження.

Теорема 1. Якщо  $f \in L_p[-\pi; \pi]$ ,  $p \geq 1$ ,  $u_f(\varphi, r) \in B_\varphi$ , то для фіксованих натуральних  $k$  виконується нерівність

$$\left\| \frac{\partial^k u_f(\varphi, r)}{\partial \varphi^k} \right\| \leq M \frac{\|f\|}{(1-r)^k}, \quad 0 \leq r < 1, \quad (4)$$

де  $M > 0$  – стала, що не залежить від  $r$ .

Доведення. Використовуючи (3) розв'язок  $u_f(\varphi, r)$  граничної задачі (1), (2) і узагальнену нерівність Мінковського [2] одержимо нерівність

$$\left\| \frac{\partial^k u_f(\varphi, r)}{\partial \varphi^k} \right\| \leq \frac{\|f\|}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left\| \frac{\partial^k}{\partial \varphi^k} \left( \frac{(1-r^2)^2 (1-r \cos t)}{(1-2r \cos t+r^2)^2} \right) \right\| dt. \quad (5)$$

Оцінимо інтеграл в правій частині (5). Для цього бігармонічне ядро Пуассона запишемо у вигляді

$$\frac{(1-r^2)^2 (1-r \cos t)}{(1-2r \cos t+r^2)^2} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(1-r^2)^2}{1-2r \cos t+r^2} + \frac{(1-r^2)^3}{(1-2r \cos t+r^2)^2} \right] \quad (6)$$

і позначимо

$$P_1 = \frac{(1-r^2)^2}{1-2r \cos t+r^2}, \quad P_2 = \frac{(1-r^2)^3}{(1-2r \cos t+r^2)^2}. \quad (7)$$

Тоді, враховуючи що  $P_1 = (1-r^2) \left( -1 + \frac{1}{1-re^{it}} + \frac{1}{1-re^{-it}} \right)$ , диференціюванням по  $t$

одержимо формулу для похідної порядку  $k$  ( $k=1, 2, \dots$ ):

$$\frac{\partial^k P_1}{\partial t^k} = (1-r^2) \cdot r(i)^k \left[ \frac{e^{it} Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})}{(1-re^{it})^{k+1}} + \frac{e^{-it} Q_{k-1}^{(2)}(r, e^{-it})}{(1-re^{-it})^{k+1}} \right], \quad (8)$$

де  $Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})$ ,  $Q_{k-1}^{(2)}(r, e^{-it})$  – многочлени степеня  $(k-1)$  по кожному з вказаних аргументів. Ці многочлени є обмеженими в замкнутому крузі  $0 \leq r \leq 1$  сталою, що залежить лише від степеня многочлена. Обчислимо модулі обох доданків в (8)

$$\left| \frac{e^{it} Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})}{(1-re^{it})^{k+1}} \right|^2 = \frac{Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it}) \cdot Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})}{(1-re^{it})^{k+1} (1-re^{-it})^{k+1}} = \frac{|Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})|^2}{(1-2r \cos t + r^2)^{k+1}},$$

звідки

$$\left| \frac{e^{it} Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})}{(1-re^{it})^{k+1}} \right| = \frac{|Q_{k-1}^{(1)}(r, e^{it})|}{(1-2r \cos t + r^2)^{\frac{k+1}{2}}}. \quad (9)$$

Цілком аналогічно одержимо

$$\left| \frac{e^{-it} Q_{k-1}^{(2)}(r, e^{-it})}{(1-re^{-it})^{k+1}} \right| = \frac{|Q_{k-1}^{(2)}(r, e^{-it})|}{(1-2r \cos t + r^2)^{\frac{k+1}{2}}}. \quad (10)$$

З (8)–(10) отримаємо оцінку

$$\left| \frac{\partial^k P_1}{\partial t^k} \right| \leq \frac{M_1 (1-r^2)}{(1-2r \cos t + r^2)^{\frac{k+1}{2}}},$$

де  $M_1$  – стала, що залежить лише від  $k$ . Використовуючи дану оцінку, відому тотожність

$$\frac{1-r^2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dt}{1-2r \cos t + r^2} = 1 \quad \text{і} \quad \text{справедливу для всіх } t \in [-\pi; \pi] \quad \text{нерівність}$$

$1-2r \cos t + r^2 \geq (1-r)^2$ , знайдемо

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\partial^k P_1}{\partial t^k} dt \leq M_1 \frac{1-r^2}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dt}{(1-2r \cos t + r^2) (1-2r \cos t + r^2)^{\frac{k+1}{2}}} \leq \frac{M_1}{(1-r)^{k-1}}. \quad (11)$$

Оскільки

$$P_2 = \frac{(1-r^2)^3}{(1-re^{it})^2 (1-re^{-it})^2} = (1-r^2) \left[ -1 + \frac{1}{1-re^{it}} + \frac{1}{1-re^{-it}} \right]^2 =$$

$$= \frac{1-r^2}{(1-re^{it})^2} + \frac{1-r^2}{(1-re^{-it})^2} + (1-r^2) \left[ 1 - \frac{2}{1-re^{it}} - \frac{2}{1-re^{-it}} \right] + 2 \left[ -1 + \frac{1}{1-re^{it}} + \frac{1}{1-re^{-it}} \right],$$

то достатньо розглянути похідних порядку  $k \in N$  кожного з доданків в правій частині (12). Позначимо

$$P_2^{(1)} = \frac{1-r^2}{(1-re^{it})^2}; \quad P_2^{(2)} = \frac{1-r^2}{(1-re^{-it})^2}; \quad P_2^{(3)} = (1-r^2) \left[ 1 - \frac{2}{1-re^{it}} - \frac{2}{1-re^{-it}} \right];$$

$$P_2^{(4)} = 2 \left[ -1 + \frac{1}{1-re^{it}} + \frac{1}{1-re^{-it}} \right].$$

Аналогічно (11), отримаємо наступні нерівності

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{\partial^k P_2^{(3)}}{\partial t^k} \right| dt \leq \frac{M_2}{(1-r)^{k-1}}, \quad (13)$$



$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{\partial^k P_2^{(4)}}{\partial t^k} \right| dt \leq \frac{M_3}{(1-r)^k}, \quad (14)$$

де  $M_2, M_3$  – додатні сталі, що не залежать від  $r$ . Для  $P_2^{(1)}, P_2^{(2)}$  аналогічно доведення рівності (9) одержимо рівності

$$\left| \frac{\partial^k P_2^{(1)}}{\partial t^k} \right| = \frac{(1-r^2) \left| R_2^{(1)}(r, e^{it}) \right|}{(1-2r \cos t + r^2)^{\frac{k+1}{2}}}, \quad (15)$$

$$\left| \frac{\partial^k P_2^{(2)}}{\partial t^k} \right| = \frac{(1-r^2) \left| R_2^{(2)}(r, e^{-it}) \right|}{(1-2r \cos t + r^2)^{\frac{k+1}{2}}}, \quad (16)$$

де  $R_2^{(1)}(r, e^{it}), R_2^{(2)}(r, e^{-it})$  – многочлени відповідних аргументів, що обмежені в замкнутому крузі  $0 \leq r \leq 1$  сталою, що залежить лише від  $k$ . З (15), (16) маємо

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{\partial^k P_2^{(1)}}{\partial t^k} \right| dt \leq \frac{M_4}{(1-r)^k}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{\partial^k P_2^{(2)}}{\partial t^k} \right| dt \leq \frac{M_5}{(1-r)^k}, \quad (18)$$

де  $M_4, M_5$  – додатні сталі, що не залежать від  $r$ .

Використовуючи (5), рівності (60 і (12), а також оцінки (11), (13), (14), (17), (18) інтегралів від окремих доданків, одержимо кінцеву оцінку 4. Теорема доведена.

Для фіксованого  $r_1, 0 \leq r_1 \leq 1$  позначимо через  $u_{u(\varphi, r_1)}(\varphi, r)$  розв'язок рівняння (1), що задовільняє граничним умовам  $u(\varphi, r)_{r=1} = u(\varphi, r_1), \left. \frac{\partial u}{\partial \varphi}(\varphi, r) \right|_{r=1} = 0$ . Аналогічно введемо позначення  $u_{u(\varphi, r_2)}(\varphi, r), 0 \leq r_2 \leq 1$ .

Теорема 2. Якщо  $f \in L_p[-\pi; \pi], p \geq 1, u(\varphi, r) \in B_\varphi$ , то для довільних  $r_2, r_1 (0 < r_1, r_2 < 1)$  справедлива рівність

$$u_{u(\varphi, r_1)}(\varphi, r_2) = u_{u(\varphi, r_2)}(\varphi, r_1), \quad -\pi \leq \varphi \leq \pi. \quad (19)$$

Доведення. виходячи з (3) та використовуючи теорему Фубіні [2], знайдемо

$$u_{u(\varphi, r_1)}(\varphi, r_2) = \frac{(1-r_1^2)^2 (1-r_2^2)^2}{4\pi^2} \times \\ \times \int_{-\pi}^{\pi} f(\eta) \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[1-r_1 \cos(\eta-t)][1-r_2 \cos(t-\varphi)]}{(1-2r_1 \cos(\eta-t) + r_1^2)^2 (1-2r_2 \cos(t-\varphi) + r_2^2)^2} dt d\eta \quad (20)$$

$$u_{u(\varphi, r_2)}(\varphi, r_1) = \frac{(1-r_1^2)^2 (1-r_2^2)^2}{4\pi^2} \times \\ \times \int_{-\pi}^{\pi} f(\eta) \int_{-\pi}^{\pi} \frac{[1-r_2 \cos(\eta-t)][1-r_1 \cos(t-\varphi)]}{(1-2r_2 \cos(\eta-t) + r_2^2)^2 (1-2r_1 \cos(t-\varphi) + r_1^2)^2} dt d\eta. \quad (21)$$

Розглянемо різницю внутрішніх інтегралів (по  $t$ ) в правих частинах (20) і (21). Використовуючи заміну  $t = u + \frac{\eta + \varphi}{2}$  ( $\eta$  і  $\varphi$  для цього інтегралу є параметрами) та враховуючи  $2\pi$ -періодичність підінтегральної функції, поклавши  $v = \frac{\eta + \varphi}{2}$ , одержимо для вказаної різниці

$$\int_{-\pi}^{\pi} \Phi(u, \varphi, \eta) du, \quad (22)$$

$$\Phi(u, \varphi, \tau) = \frac{[1 - r_1 \cos(v - u)][1 - r_2 \cos(v + u)]}{(1 - 2r_1 \cos(v - u) + r_1^2)^2 (1 - 2r_2 \cos(v + u) + r_2^2)^2} -$$

де

$$- \frac{[1 - r_2 \cos(v - u)][1 - r_1 \cos(v + u)]}{(1 - 2r_2 \cos(v - u) + r_2^2)^2 (1 - 2r_1 \cos(v + u) + r_1^2)^2}.$$

Оскільки  $\Phi(-u, \varphi, \eta) = -\Phi(u, \varphi, \eta)$ , то інтеграл (22) дорівнює нулю і теорема 2 доведена.

Зауважимо, що при виконанні теореми 2 є справедливою рівність

$$u_{f-u(\varphi, r_1)}(\varphi, r_2) - u_{f-u(\varphi, r_2)}(\varphi, r_1) = u(\varphi, r_2) - u(\varphi, r_1). \quad (23)$$

**Висновки.** В даній роботі наведено теореми, які дають можливість визначити властивості наближення, що забезпечують існування похідних певного порядку граничної функції. А це дозволяє розв'язати проблему відновлення граничної функції в задачі Діріхле для рівняння  $(\Delta - c^2)u = 0$  в крузі; задачі Ліурічеллі для його ітерації; задач відновлення початкових умов для одновимірних рівнянь теплопровідності та ін. Розв'язок даних задач дає можливість розв'язувати багато різних технічних задач теорії пружності, теорії пластичності, будівельної механіки. Крім цього одержані результати можуть бути поширені і на інші функції (зокрема на функції бігармонічні в півплощині).

### Література

1. Горбайчук В. И. О некоторых граничных свойствах бигармонических функций // Изд. вузов математики – 1974 – №12. – С.54-57.
2. Тимман А.Ф. Теория приближения функций действительного переменного. – М., Физматиз, 1960. – 624с.

Стаття надійшла до редакції 13.06.2018

УДК 621.762

**І.Ю. Троснікова***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СПРЯМОВАНО АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМ Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C**

*У статті розглянуто закономірності формування структури та властивостей керамічних матеріалів з підвищеною міцністю для ефективної роботи в екстремальних умовах – великих динамічних навантажень, абразивного зношування в агресивному середовищі та при високих температурах. Розроблено фізико-хімічні основи отримання керамічних матеріалів, що полягають в контрольованому керуванні структурою під час спрямованої кристалізації евтектичних сплавів систем Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C.*

*Ключові слова:* спрямована кристалізація, армування, евтектичні сплави, керамічні матеріали, швидкість охолодження.

**И.Ю. Тросникова***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»***ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМ Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C**

*В статье рассмотрены закономерности формирования структуры и свойств керамических материалов с повышенной прочностью для эффективной работы в экстремальных условиях - больших динамических нагрузках, абразивного износа в агрессивной среде и при высоких температурах. Разработаны физико-химические основы получения керамических материалов, состоящие в контролируемом управлении структурой при направленной кристаллизации евтектических сплавов систем Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C.*

*Ключевые слова:* направленная кристаллизация, армирование, евтектические сплавы, керамические материалы, скорость охлаждения.

**I.Yu. Trosnikova***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***THE BASICS OF FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES THE REINFORCED COMPOSITE MATERIALS OF SYSTEMS OF Mo-Si-B, WC-W<sub>2</sub>C**

*The article considers the patterns of formation of the structure and properties of ceramic materials with increased strength and hardness for efficient work in extreme conditions - large dynamic loads, abrasive wear in aggressive media and at high temperatures. Physical and chemical bases for obtaining ceramic materials consisting of control of the structure with directed crystallization of eutectic alloys of systems of Mo-Si-B and WC-W<sub>2</sub>C were developed.*

*Keywords:* directional crystallization, reinforcement, eutectic alloys, ceramic materials, cooling rate.

**Постановка проблеми.** Науково-технічний прогрес на сьогоднішній день базується на створенні нових матеріалів, здатних витримувати все вищі термічні та механічні навантаження в найбільш екстремальних умовах. Тому все більше уваги приділяється застосуванню керамічних матеріалів, які мають комплекс підвищених фізико-механічних властивостей, особливо в області високих динамічних навантажень, підвищених температур та агресивних середовищ.

Деталі, що працюють в умовах великих динамічних навантажень, абразивного зношування, в агресивному середовищі та при високих температурах, наприклад, бури нафто- та гірничовидобувного обладнання, металообробного інструменту, лопатки газотурбінних двигунів та інші мають строк служби в 3-5 разів нижчий, аніж інші частини механізмів цієї техніки [1]. Проблему підвищення зносостійкості можна вирішити шляхом виготовлення конструкційних деталей машин і механізмів із нових матеріалів з підвищеними твердістю, міцністю та в'язкістю, або модифікуванням поверхні традиційних шляхом нанесення зносостійких покриттів [2].

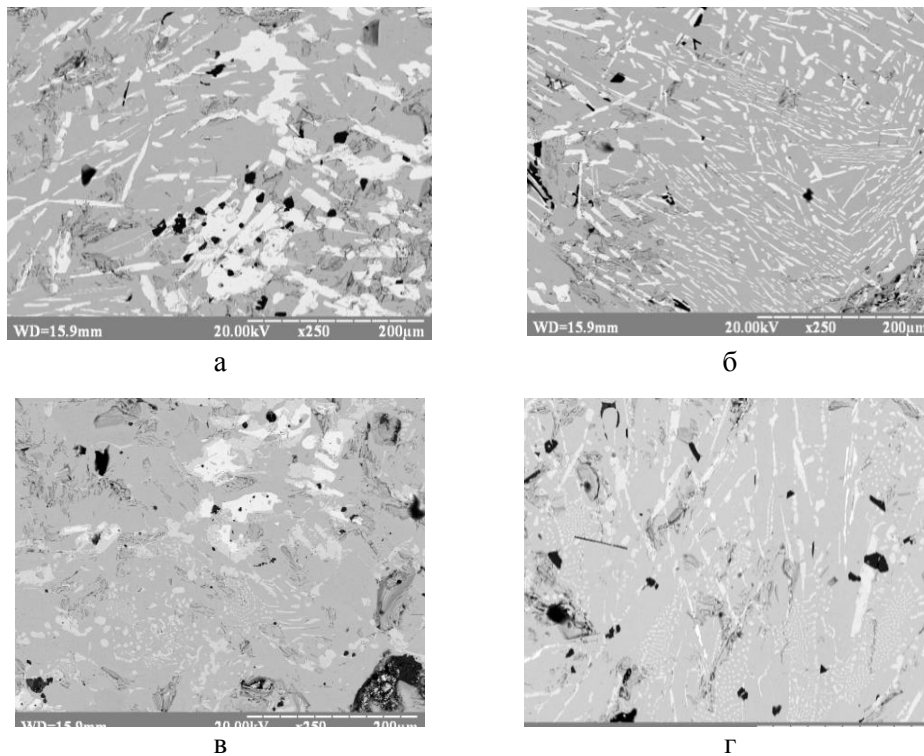
Керамічні матеріали мають найбільш високі значення температури плавлення, модуля пружності, температури початку інтенсивної повзучості, твердості. Серед перспективних для виготовлення деталей газотурбінних двигунів є сплави системи Mo-Si-B, а серед традиційних для захисту металевих виробів від зношування сплави системи WC-W<sub>2</sub>C. Головним недоліком керамічних матеріалів є низька міцність та висока крихкість. З усіх механізмів зміцнення (подрібнення зерна, армування волокнами, введення пластичної зв'язки, створення внутрішніх напружень та інше) тільки армування монокристалічними волокнами забезпечує збільшення міцності більше ніж на порядок [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одержання армованих керамічних матеріалів змішуванням порошків матричної фази та волокон з наступним спіканням, гарячим пресуванням, ізостатичним пресуванням не дозволяє зберегти цілісність і рівномірний розподіл волокон по об'єму матричної фази [4-6]. Методи кристалізації із розплавів евтектичних сплавів дозволяють отримувати регулярне розташування волокон та формування когерентних та напівкогерентних границь розподілу між матричною фазою і волокнами, що є головною умовою підвищення термічної стабільності структури та поліпшення фізико-механічних властивостей матеріалу. Водночас ступінь когерентності, рівномірність розподілу за розмірами, розмір волокон залежить від теплових умов кристалізації, хімічного складу та природи фазових складових композиційного матеріалу.

**Постановка завдань.** Метою роботи є дослідження впливу параметрів процесу кристалізації та природи компонентів на мікроструктуру сплавів систем  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$ ,  $\text{WC-W}_2\text{C}$  з метою підвищення їх механічної міцності та зносостійкості.

**Викладення основного матеріалу.** Для вивчення процесу сплавоутворення у квазібінарній системі  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  вихідні компоненти отримували у вигляді порошків прямим синтезом із елементів. Вивчався хімічний, фазовий склад та фізичні властивості порошків. Встановлено, що частинки з розміром 5-10 мкм порошку  $\text{MoB}_2$  мають сферичну, а  $\text{MoSi}_2$  більш неправильну форми.

Зі збільшенням швидкості кристалізації кристалів евтектичного сплаву системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  розмір включень із дибориду молібдену зростає в поздовжньому напрямку і зменшується в площині поперечного перетину кристалу. Крім того, збільшується кількість включень боридної фази, що свідчить про формування стрижнів та пластин, які забезпечують ефект армування матричної фази із дисиліциду молібдену (рис. 1).



**Рис. 1.** Мікроструктура поперечного (а, в) та поздовжнього (б, г) перетину евтектичного сплаву ( $8 \text{ MoSi}_2\text{-}18\text{ MoB}_2$ ) – 1%(мас.)Si системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  - швидкість кристалізації 2 мм/хв. (а,б) і 4мм/хв (в,г)

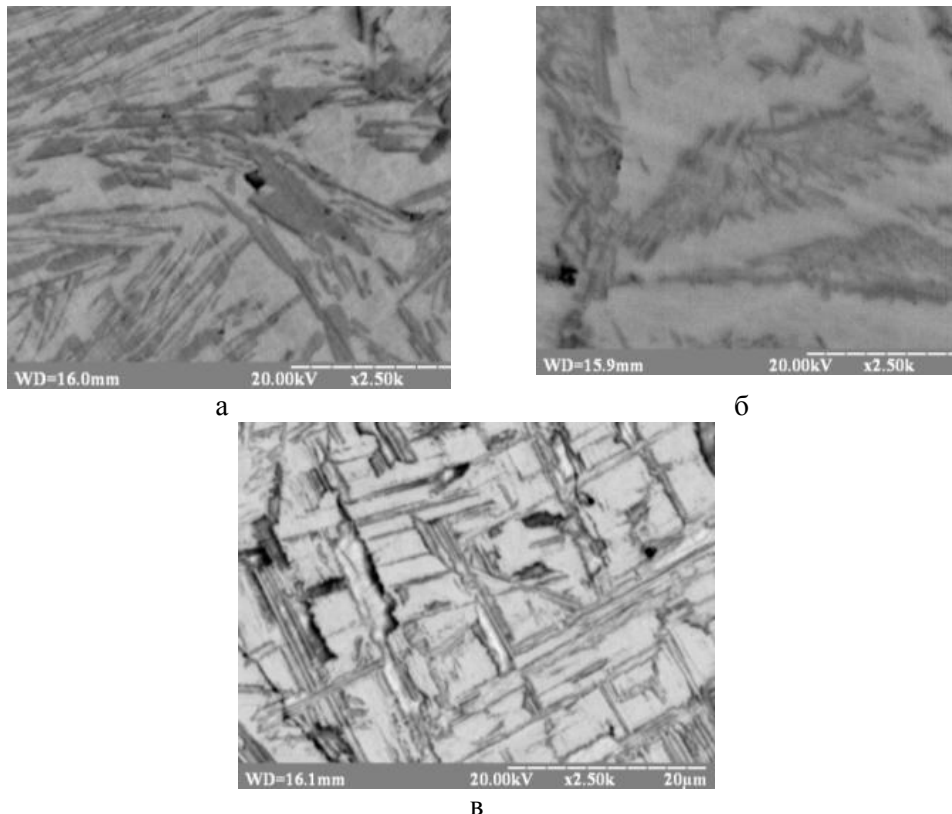
Вимірювання механічних властивостей кристалів евтектичного сплаву показало, що зі збільшенням швидкості кристалізації від 1 до 4 мм/хв. мікромеханічні характеристики сплаву зростають в 1,5-2 рази, як у площині поперечного, так і в поздовжньому перерізі кристалу, що можна пояснити ефектом армування бездефектними монокристалічними волокнами з дибориду молібдену матричної фази з дисиліциду молібдену.

На основі вивчення структури, температури плавлення, фазового складу встановлено евтектичний характер діаграми стану квазібінарної системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$ , склад евтектики – 82 мас.% $\text{MoSi}_2$  - 18 мас.% $\text{MoB}_2$  та температура плавлення – 1650 °С.

Закономірності формування структури при спрямованій кристалізації розплаву квазібінарного евтектичного сплаву системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  полягають у тому, що вирощені в умовах спрямованої кристалізації кристали евтектичного сплаву представляють собою матрицю із  $\text{MoSi}_2$  з регулярно розташованими волокнами із  $\text{MoB}_2$ , розмір яких зменшується, а кількість зростає при збільшенні швидкості росту кристалів від 1 до 4 мм/хв.

Виявлено, що кристали евтектичного сплаву системи  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  з матрицею з  $\text{MoSi}_2$  та регулярно розташованими стрижневими включеннями з  $\text{MoB}_2$  мають на порядок нижчу швидкість високотемпературної повзучості, порівняно зі сплавами з хаотичним розташуванням фазових складових і є найбільш перспективними для виготовлення деталей газотурбінних двигунів.

Сплави системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$  широко використовують на практиці як наплавочні матеріали для деталей, що працюють в умовах великих динамічних навантажень [2]. Суттєвого підвищення їх механічних властивостей можна досягти за рахунок армування [7], утім спроба отримати армований композит в системі  $\text{WC-W}_2\text{C}$  в умовах зонної плавки, аналогічно системі  $\text{MoSi}_2\text{-MoB}_2$  з максимально можливою швидкістю охолодження  $10^2$  град/с виявилася не можливою. Тому вплив швидкості охолодження на формування структури та властивостей евтектичного сплаву системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$  –  $\text{WC-78}\div\text{82}\%$ (мас.) $\text{W}_2\text{C}$  (реліту) вивчали на сплавах, отриманих в умовах відцентрового розпилення розплаву евтектичного складу системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$ , де реалізується швидкість охолодження  $10^5$  град/с (рис.2).



а -  $10^2$  град/с; б –  $10^3$  град/с; в -  $10^5$  град/с

**Рис. 2. Мікроструктура сплаву системи  $\text{WC-W}_2\text{C}$ , отриманого з різною швидкістю охолодження**

Як видно з рисунку 2 зі зростанням швидкості охолодження від  $10^2$  до  $10^3$  град/с видовжені пластини та стрижні змінюють свою морфологію на дендритну з гілками 1 та 2 порядку, а при максимальній швидкості охолодження ( $10^5$  град/с) формується комірчаста структура, де наявні дендрити тільки 1 порядку. Такий процес формування структури свідчить про те, що зі зростанням швидкості кристалізації збільшується концентраційне переохолодження в розплаві на фронті росту кристалу.

Методами рентгеноструктурного аналізу встановлено вплив швидкості охолодження на фазовий склад, розмір та напружено-деформований стан фазових складових та властивості

евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C [8]. Виявлено, що з підвищенням швидкості охолодження співвідношення WC та W<sub>2</sub>C практично не змінюється, розміри областей когерентного розсіювання зменшуються у 1,5–2 рази, напруження як у матриці, так і у включеннях зростають в 2–2,5 рази, при чому армуюча фаза WC знаходиться в сплавах у розтягнутому, а матрична фаза W<sub>2</sub>C — у стиснутому стані, що призводить до підвищення мікротвердості на 30%, в 2–4 рази міцності на стиснення та на 30–40% зносостійкості.

**Висновки.** У роботі встановлено закономірності формування структури та властивостей при спрямованій кристалізації розплаву квазібінарного евтектичного сплаву системи MoSi<sub>2</sub>-MoB<sub>2</sub>, а також евтектичного сплаву системи WC-W<sub>2</sub>C в умовах охолодження зі швидкістю від 10<sup>2</sup> до 10<sup>5</sup> град/с.

#### Список використаних джерел:

1. Белый А.И. Износоустойчивость и прочность карбидов вольфрама WC - W<sub>2</sub>C, полученных разными методами // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12. – С. 20 – 23.
2. Дзыкович В.И. Свойства порошков карбидов вольфрама, полученных по различным технологиям // Автоматическая сварка. – 2010. – № 4. – С. 28 – 31.
3. Лобода П.І. Фізико-хімічні основи створення нових боридних матеріалів для електронної техніки і розробка керамічних катодних вузлів з підвищеною ефективністю // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – 2004.
4. Лобода П.І. Спрямовано закристалізовані бориди. – К.: Праймдрук, 2012. – 395 с.
5. Jain P., Kumar K.S. Dissolved Si in Mo and its effects on the properties of Mo–Si–B alloys, Scripta Materialia, Volume 62, Issue 1, 2010, Pages 1-4.
6. Hasemann G., Bogomol I., Schliephake D., Loboda P.I., Krüger M. Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo–Si–B alloy, Intermetallics, Volume 48, 2014, Pages 28-33.
7. I. Bogomol, O. Vasylykiv, Y. Sakka and P. Loboda. Mechanism of nucleation and growth of directionally crystallized alloys of the B<sub>4</sub>C–MeB<sub>2</sub> system // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 490 (1-2). – P. 557-561.
8. Троснікова І.Ю., Лобода П.І., О.П. Карасєвська О.П., Білий О.І. Вплив швидкості охолодження під час кристалізації розплаву на структуру та властивості WC-W<sub>2</sub>C // Порошкова металургія. – 2013. - № 11/12 . – С. 80-87.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2018

УДК 66.66.08

Г.Б. Халед

*Харківський національний університет радіоелектроніки***КВАНТОВО-ХІМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ  
МОЛЕКУЛАМИ РУБРЕНУ ТА СТЕАРИНОВОЮ КИСЛОТОЮ ТА РУБРЕНОМ І  
МЕТИЛОВИМ ЕФІРОМ СТЕАРИНОВОЇ КИСЛОТИ**

*В даній роботі представлено квантово-хімічні дослідження енергії взаємодії між молекулами рубрену та стеариновою кислотою та рубреном і метиловим ефіром стеаринової кислоти. Проведені дослідження показали, що комплекси рубрену з метиловим ефіром стеаринової кислоти є більш міцніми, ніж між рубреном та стеариновою кислотою. Це дає можливість з великою мірою вірогідності передбачити, що метиловий ефір стеаринової кислоти буде кращим кандидатом-амфіфільною сполукою для створення плівок Ленгмюра-Блоджетт з рубреном, який є неамфіфільною молекулою.*

*Ключові слова:* рубрен, стеаринова кислота, метиловий ефір стеаринової кислоти, плівки Ленгмюра-Блоджетт, амфіфільність

Г.Б. Халед

**КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ РУБРЕНА И СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТОЙ И РУБРЕНОМ И  
МЕТИЛОВЫМ ЭФИРОМ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТЫ**

*В данной работе представлены квантово-химические исследования энергии взаимодействия между молекулами рубрена и стеариновой кислотой и рубреном и метиловым эфиром стеариновой кислоты. Проведенные исследования показали, что комплексы рубрена с метиловым эфиром стеариновой кислоты более прочные, чем между рубреном и стеариновой кислотой. Это дает возможность с большой степенью вероятности предположить, что метиловый эфир стеариновой кислоты будет лучшим кандидатом-амфифильных соединений для создания пленок Ленгмюра-Блоджетт с рубреном, который является неамфифильной молекулой.*

*Ключевые слова:* рубрен, стеариновая кислота, метиловый эфир стеариновой кислоты, пленки Ленгмюра-Блоджетт, амфифильность

G.B. Khaled

**QUANTUM-CHEMICAL INVESTIGATION OF THE ENERGY INTERACTION BETWEEN  
RUBREN AND STEARIC ACID MOLECULES AND RUBREN AND METHYL ETHER OF  
STEARIC ACID**

*In this paper, quantum-chemical studies of the energy of interaction between the molecules of rubrene and stearic acid and rubrene and methyl ester of stearic acid are presented. The conducted studies showed that the complexes of rubrene with methyl stearic acid ester are stronger than between rubren and stearic acid. This makes it possible to assume with a high degree of probability that stearic acid methyl ester will be the best candidate for amphiphilic compounds to create Langmuir-Blodgett films with a clay, which is a non-amphiphilic molecule.*

*Keywords:* rubrene, stearic acid, stearic acid methyl ester, Langmuir-Blodgett films, amphiphilicity.

**Постановка проблеми.** Актуальною задачею сучасної біосенсорики є розробка методу та пристрою визначення слідових концентрацій поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ). ПАВ – це гідрофобні, низькорозчинні у воді органічні сполуки, для яких характерна наявність в хімічній структурі двох і більше конденсованих бензольних кілець [1]. Оскільки ПАВ є ефективними електрохемілюмінофорами, тому їх інкорпорування у моно- чи мульти шарові плівки Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) можна покласти в основу методики твердофазного ЕХЛ-визначення ПАВ з низькою межею виявлення [2]. Під молекулярними системами ЛБ розуміють мономолекулярні шари поверхнево активних органічних речовин, що знаходяться на межі розділу рідкої (як правило, це вода) і газоподібної (повітря) фаз [3]. Технологія ЛБ дозволяє отримати моно- і мультишарові високоорганізовані плівки з контрольованою товщиною, орієнтацією і високою поверхневою щільністю люмінесцентних центрів. Реалізація створення сенсора на ПАВ з використанням технології ЛБ стримується проблемою, пов'язаною зі складністю формування плівок ЛБ з неленгмюрогенними речовинами, до яких належать ПАВ. ПАВи, зокрема рубрен, не є амфіфільними і не здатні самостійно утворювати однорідні і стабільні ЛБ-моношари на поверхні водної субфази і, таким чином, ЛБ-плівки.

Щоб краще зрозуміти природу молекулярних взаємодій молекул ПАВ з амфіфільними речовинами, принципи їх збірки у супрамолекулярні ЛБ-структури на поверхні сенсорного електроду доцільно провести дослідження взаємодії модельних комплексів молекул ПАВ та популярних у технології ЛБ амфіфільних речовин. Найбільш ефективно для цього

використовувати методи комп'ютерної хімії. Це дає змогу скоротити час, необхідний для оптимального планування експериментів, перевірки і підтвердження результатів розрахунків, а потім і для прийняття рішень про направлення вдосконалення технології створення сенсорного елементу та проведення детектування.

**Мета статті:** провести квантово-хімічні дослідження енергії взаємодії між молекулами рубрену і стеариновою кислотою та рубреном і метиловим ефіром стеаринової кислоти.

**Виклад основного матеріалу.** У якості амфифільних речовин обрано стеаринову кислоту та метиловий ефір стеаринової кислоти. В якості ПАВ ми обрали рубрен, оскільки він менш токсичний за інші ПАВ. Структури стеаринової кислоти, її метилового ефіру та рубрену були вибрані з Кембриджської бази структурних даних [4]. Потім вони були повністю оптимізовані з використанням метода теорії функціонала електронної густини DFT (функціонал M06-2X) з базисним набором cc-pvdz (M06-2X/cc-pvdz) [5]. Відповідність геометрії мінімуму на поверхні потенційної енергії (ППЕ) молекул підтверджено розрахунком других похідних енергії (гессіан), які мали тільки позитивні власні значення. Енергії взаємодії між молекулами в димерах **a**, **b**, **віг** (Рис.1, 2) були розраховані за допомогою методу M06-2X/cc-pvdz скориговані на помилку суперпозиції базисного набору з використанням стандартної процедури Бойз-Бернарді (BSSE-корекція) [6]. Всі розрахунки виконувалися з використанням програми Gaussian03 [7].

Енергію взаємодії у комплексах рубрен-ленгмюрогена речовина (1:1) розраховували за формулою (1):

$$E_{\text{interaction}} = E_{\text{Counterpoise corrected energy}} - (E_{\text{total of amphiphile}} + E_{\text{total of rubrene}}), \quad (1)$$

де  $E_{\text{Counterpoise corrected energy}}$  – повна енергія комплексу з врахуванням суперпозиційної помилки базисного набору (BSSE);

$E_{\text{total of amphiphile}}$  – повна енергія амфифільної речовини;

$E_{\text{total of rubrene}}$  – повна енергія рубрену.

Стабільні комплекси між двома органічними сполуками утворюються в тому випадку, якщо вони пов'язані специфічними міжмолекулярними взаємодіями: водневими зв'язками, галогенними зв'язками, стекінг-взаємодіями. Для утворення специфічних взаємодій молекули повинні містити певні функціональні групи.

Молекула стеаринової кислоти має гідроксильну і С-Н групи, які здатні утворювати водневі зв'язки в якості донора протона. Карбоксильна група, яка міститься в молекулі стеаринової кислоти і в її метальному ефірі, може утворювати водневі зв'язки в якості акцептора протона.

Молекула рубрена має  $\pi$ -систему, яка може виступати в якості акцептора протона в міжмолекулярних взаємодіях. Таким чином, в комплексах рубреназі стеариновою кислотою можливе утворення С-Н...О, С-Н... $\pi$  і О-Н... $\pi$  водневих зв'язків. У комплексах рубрена з метальним ефіром стеаринової кислоти, в яких замість атома водню гідроксильної групи присутня метальна група, також можливе утворення тих же водневих зв'язків, крім О-Н... $\pi$  водневого зв'язку. Крім того, досліджувані молекули є досить великими, тому в повну енергію взаємодії комплексу помітний внесок повинні вносити неспецифічні взаємодії, зокрема дисперсійні.

Результати квантово-хімічних розрахунків показали, що найбільш велику енергію взаємодії мають комплекси **1g** та **2g** в яких молекули зв'язані між собою С-Н...О та С-Н... $\pi$  водневими зв'язками одночасно (Рис.1, 2) та мають найбільшу площу перекривання серед оптимізованих комплексів. Натомість найнижчу енергію взаємодії у комплексі рубрен-стеаринова кислота має димер **1b**, утворений за допомогою тільки С-Н...О водневого зв'язку і площа перекривання взаємодіючих молекул є найменшою, що зумовлює мінімальний внесок дисперсійних взаємодій. А у комплексі рубрен-метиловий ефір стеаринової кислота це димер **2a**, який утворюється за допомогою тільки С-Н... $\pi$  водневого зв'язку і неспецифічних взаємодій. Геометричні характеристики водневих зв'язків вказують на їх слабкість (Табл.1). Тому можна припустити, що повна енергія комплексів як від енергії специфічних взаємодій, так і від енергій таких складових, як електростатичні та дисперсійні взаємодії між молекулами.

Розрахункові значення енергій взаємодій найбільш енергетично вигідних комплексів амфифільна речовина-рубрен, які були досліджені у даній роботі представлені в Табл. 1.



Таблиця 1.

Розрахункові значення енергій взаємодій комплексів амфіфільна речовина-рубрен (1:1) в залежності від геометричного положення молекули рубрену відносно молекули амфіфілу,  $E_{int}$ , ккал/моль та характеристики водневих зв'язків (Н...А, Å та D-Н...А).

Комплекси	рубрен + стеаринова кислота(1:1)		рубрен + метиловий ефір стеаринової кислоти (1:1)	
	Міжмолекулярні водневі зв'язки: (Н...А, Å и D-Н...А, град)	Енергія взаємодії ( $E_{int}$ , ккал/моль)	Міжмолекулярні водневі зв'язки: (Н...А, Å и D-Н...А, град)	Енергія взаємодії ( $E_{int}$ , ккал/моль)
<i>a</i>	C-H...O 2.40 Å 117° C-H...π 2.84 Å 114°	-5.32	C-H...π 2.62 Å 152° C-H...π 2.76 Å 145°	-9.18
<i>б</i>	C-H...O 2.38 Å 127°	-2.00	C-H...O 2.60 Å 116° C-H...π 2.75 Å 162° C-H...π 2.82 Å 156° C-H...π 2.75 Å 174°	-13.69
<i>в</i>	C-H...π 2.72 Å 145° C-H...π 2.73 Å 142°	-7.44	C-H...π 2.68 Å 149° C-H...π 2.82 Å 174°	-14.33
<i>г</i>	C-H...O 2.59 Å 125° C-H...π 2.68 Å 167° C-H...π 2.77 Å 169°	-14.77	C-H...O 2.60 Å 120° C-H...π 2.69 Å 169° C-H...π 2.75 Å 167°	-14.96

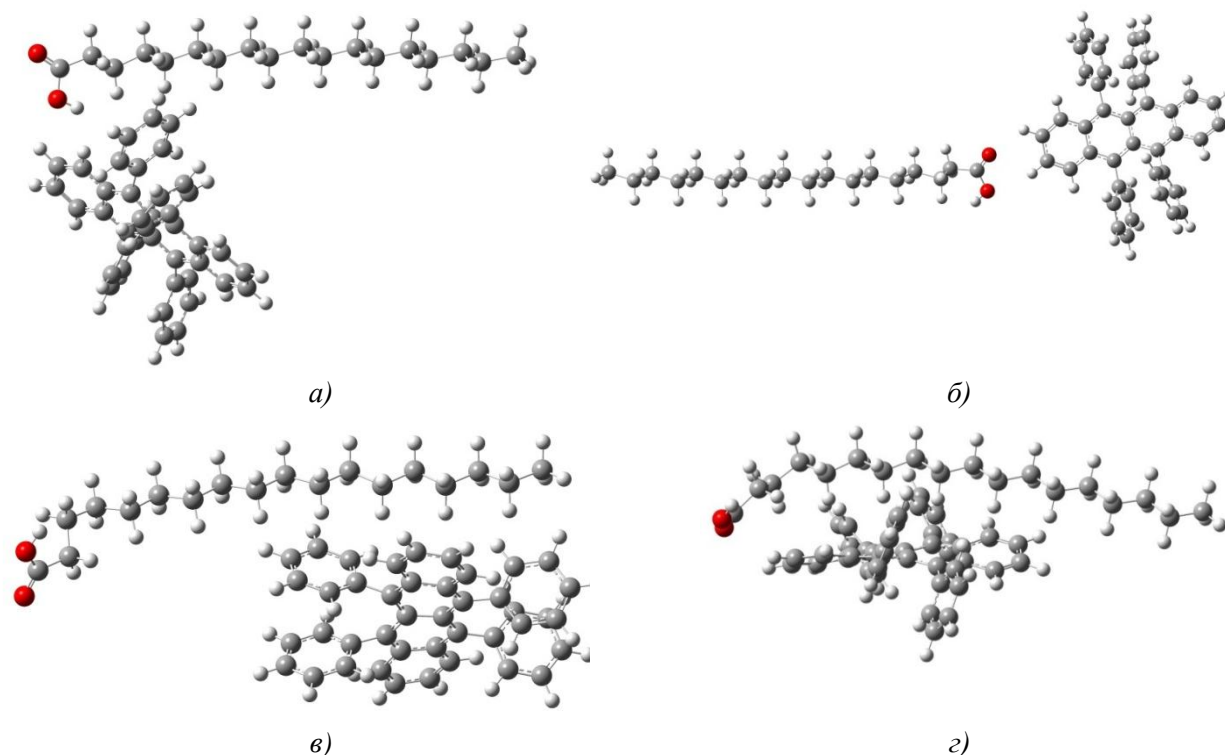


Рис. 1. Структури комплексів рубрен + стеаринова кислота з різними енергіями взаємодії: *a*  $-E_{int} = -5.32$  ккал/моль ; *б*  $-E_{int} = -2.00$  ккал/моль; *в*  $-E_{int} = -7.44$  ккал/моль; *г*  $-E_{int} = -14.77$  ккал/моль

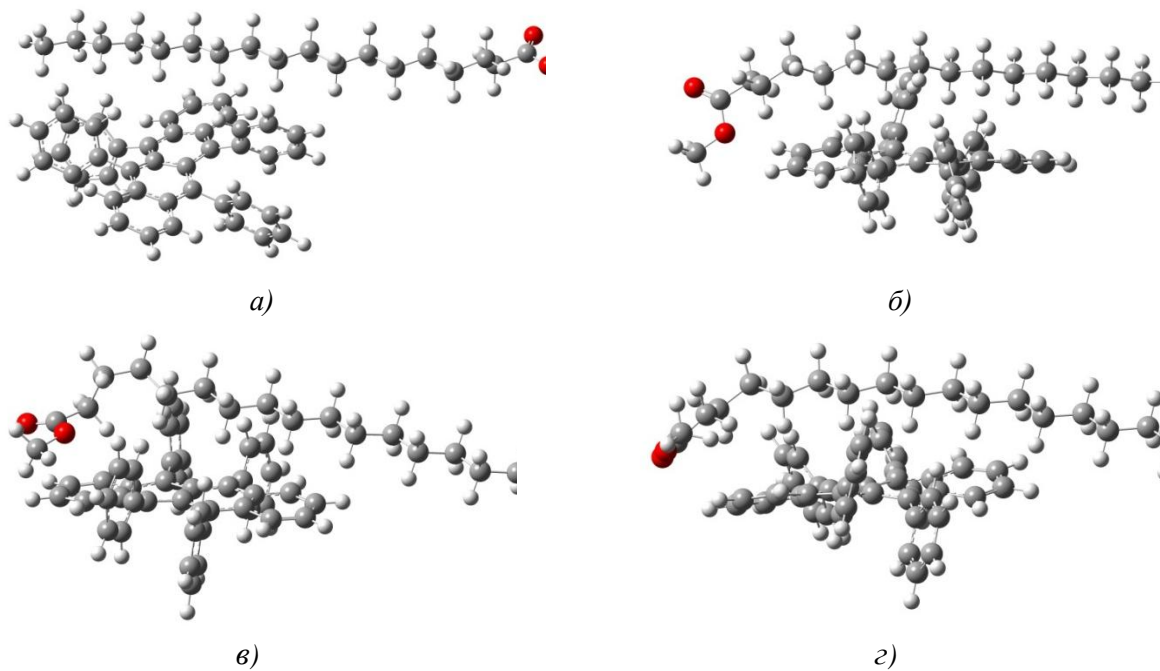


Рис. 2. Структури молекул рубрен + ефір стеаринової кислоти з різними енергіями взаємодії: *a*  $-E_{\text{int}} = -9.18$  ккал/моль; *б*  $-E_{\text{int}} = -13.69$  ккал/моль; *в*  $-E_{\text{int}} = -14.33$  ккал/моль; *з*  $-E_{\text{int}} = -14.96$  ккал/моль

Таким чином, шляхом квантово-хімічних розрахунків визначено спектр ймовірних орієнтацій рубрену в бінарному розчині стеаринова кислота / рубрен та метиловий ефір стеаринової кислоти/ рубрен. Розраховано енергії взаємодії для кожного з комплексів. Максимальна енергія взаємодії стеаринова кислота / рубрен відповідає орієнтації, представленій на рис. 1*з*, а мінімальна – на рис. 1*б*. Для комплексів «метиловий ефір стеаринової кислоти/рубрен на рис. 2*з*, та рис. 2*а*, відповідно.

**Висновок.** Визначено спектр ймовірних просторових орієнтацій (значення відстаней і кутів атомів в молекулі рубрену) в бінарному розчині стеаринова кислота/рубрен та метиловий ефір стеаринової кислоти/рубрен. Встановлено що, взаємодії між рубреном і стеариновою кислотою або її метиловим ефіром визначаються в першу чергу дисперсійними взаємодіями. При цьому енергія взаємодії рубрену з ефіром вище, ніж енергія взаємодії з кислотою. Це дає можливість з великою мірою вірогідності передбачити, що метиловий ефір стеаринової кислоти буде кращим кандидатом-амфіфільною сполукою для створення плівок ЛБ рубреном, який є неамфіфільною молекулою. Таким чином, комп'ютерне моделювання та квантово-хімічні розрахунки структури і енергії взаємодії комплексів амфіфіл/ПАВ дозволили вибрати найбільш ефективну амфіфільну сполуку та запропонувати методику цього вибору.

#### Список використаних джерел:

1. Sousa J.C.G., Ribeiro A. R., Barbosa M. O., Pereira M. F. R. & Silva A. M. T. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines // Journal of Hazardous Materials, 344, p. 146-162 (2018).
2. Халед Г. Б., Кукоба А. В., Білаш О. М., Жолудов Ю. Т., Сніжко Д. В., Музика К. М. Електрохемілюмінесцентна платформа для твердофазного визначення слідових концентрацій поліциклічних ароматичних вуглеводнів // Радіотехніка: Всеукр. між-від. наук.-техн. зб., 192, с. 106-112 (2018).
3. Ashwell G.J. Langmuir-Blodgett films: Molecular engineering of non-centrosymmetric structures for second-order nonlinear optical applications // Journal of Materials Chemistry, 9(9), p. 1991-2003 (1999)
4. Groom, C. R.; Bruno, I. J.; Lightfoot, M. P.; Ward, S. C. The Cambridge Structural Database // Acta Cryst., B72, p. 171-179 (2016).
5. Hohenstein E. G., Chill S. T., Sherrill C. D. Assessment of the performance of the m05-2x and m06-2x exchange correlation functionals for noncovalent interactions in biomolecules // Journal of Chemical Theory and Computation, 4, No. 12, p. 1996-2000 (2008).

6. Boys S. F., Bernardi F. The calculation of small molecular interactions by the differences of separate total energies. Some procedures with reduced errors // Mol. Phys., 19, p. 553–566 (1970).

7. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel, H. B., Scuseria G. E.; Robb M. A., Cheeseman J. R., Montgomery J. A., Jr. Vreven, Kudin K. N., Burant J. C., Millam J. M., Iyengar, S. S., Tomasi J., Barone V., Mennucci B., Cossi M., Scalmani G., Rega N., Petersson G. A., Nakatsuji H., Hada M., Ehara M., Toyota K., Fukuda R., Hasegawa J., Ishida M., Nakajima T., Honda Y., Kitao O., Nakai H., Klene M., Li X., Knox J. E., Hratchian H. P., Cross J. B., Adamo C., Jaramillo J., Gomperts R., Stratmann R. E., Yazyev O., Austin A. J., Cammi R., Pomelli C., Ochterski J. W., Ayala P. Y., Morokuma K., Voth G. A., Salvador P., Dannenberg J. J.; Zakrzewski V. G., Dapprich S., Daniels A. D., Strain, M. C.; Farkas, et al. Gaussian 03, Revision C.01; Gaussian, Inc.: Wallingford, CT, 2004.

**Рецензенти:**

**Шишкіна Світлана Валентинівна**, керівник відділу рентгенівської дифракції та квантової хімії Державного наукового інституту "Інститут монокристалів" Національної академії наук України. к.х.н., н.с.

**Музика Катерина Миколаївна**, професор кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, д.т.н., с.н.с.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018.

УДК 621.9.4

**К.І. Цідило, Р.Т. Карпик, В.С. Витвицький, О.А. Сапаров***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСЬОВОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*Дослідження напружено-деформований стан суцільних осьових різальних інструментів (на прикладі свердла) методом скінченних елементів, що дозволяє прогнозувати їх жорсткість на стадії технологічної підготовки виробництва. Моделювання конструкцій інструментів здійснювалося створенням 3D-геометричних прототипів в CAD/CAE-системі SolidWorks. При оцінці напружено-деформованого стану осьових інструментів численним методом враховано крутний момент і осьову силу різання, що дозволило отримати деформації, напруження та переміщення. Визначено величину допустимої подачі інструменту.*

*Ключові слова:* осьовий різальний інструмент, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, напруження, деформації, переміщення.

**К.И. Цидыло, Р.Т. Карпик, В.С. Витвицкий, А.А. Сапаров****МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Исследовано напряженно-деформированное состояние сплошных осевых режущих инструментов (на примере сверла) методом конечных элементов, что позволяет прогнозировать их жесткость на стадии технологической подготовки производства. Моделирование конструкций инструментов осуществлялось созданием 3D-геометрических прототипов в CAD/CAE-системе SolidWorks. При оценке напряженно-деформированного состояния осевых инструментов численным методом учтено крутящий момент и осевую силу резания, что позволило получить деформации, напряжения и перемещения. Определена величина допустимой подачи инструмента.*

*Ключевые слова:* осевой режущий инструмент, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, напряжения, деформации, перемещения.

**K.I. Tsidylo, R.T. Karpyk, V.S. Vytvytskyi, O.A. Saparov****STRESS-STRAIN STATE SIMULATION OF AN AXIAL CUTTING TOOL BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

*A stress-strain state of solid axial cutting tools (by the case of a drill) by the finite element method was studied for tool rigidity prediction at the stage of technological preparation of production. Tool design simulation was carried out by 3D-geometric prototypes in the CAD/CAE-system SolidWorks. The margin torque and axial cutting force were considered within assessing the stress-strain state of the axial tools by the numerical method. It made possible to obtain deformation, stress and displacement. The value of permissible tool feed was determined.*

*Keywords:* axial cutting tool, stress-strain state, finite element method, stress, deformation, displacement.

**Постановка проблеми.** Осьові різальні інструменти (свердла, кінцеві фрези, зенкери, розвертки, тощо) при обробці внутрішніх поверхонь під час роботи перебувають у складному напружено-деформованому стані, який викликається силами і моментами різання, а також опором оброблюваного матеріалу. Під дією сил різання зуби різальних інструментів пружно деформуються, в результаті чого змінюється їх форма і геометричні розміри. Елементи різальних кромок переміщуються, тим самим здійснюючи вплив на точність оброблених поверхонь; тіло інструмента втрачає стійкість, наслідком чого є відведення осі інструменту. Останнє при обробці глибоких отворів внаслідок великої довжини вильоту інструменту і його низької жорсткості, а також через втрату поздовжньої стійкості може призвести до поломки інструменту в процесі різання і, як наслідок, виникнення браку в обробленій деталі.

Одним з найважливіших показників, що характеризують довговічність роботи осьового інструменту, є його жорсткість, тому її оцінка на початкових етапах проектування свердел і свердлильних операцій є актуальною і потребує особливої уваги розробника (конструктора, технолога). Оцінку жорсткості осьового різального інструменту на етапах проектування технологічної операції зручно проводити шляхом дослідження напружено-деформованого стану 3D-геометричних прототипів інструменту, сформованих із скінченної кількості макроелементів, визначених сукупністю конструктивних і геометричних параметрів. Систему зовнішнього впливу, що діє на інструмент, слід представляти у вигляді сукупності сил закріплення та різання, виражених конструктивними параметрами та режимами обробки.

Свердління – найбільш поширена і трудомістка операція обробки отворів [1], тобто підвищивши продуктивність свердління можна досягти істотного зниження виробничих витрат.

Розглянемо напружено-деформований стан осьового інструменту на прикладі спірального свердла зі швидкорізальної сталі, яке працює в важких умовах при постійно змінних силах і моментах різання, а також температурних навантажень, які діють на різальну частину, особливо під час свердління глибоких отворів. Дані навантаження призводять до нерівномірного зношування різальних кромки інструменту, тим самим знижуючи точність, якість та продуктивність обробки. З цього випливає, що визначення критичних значень деформацій і напружень, а також переміщень різальної частини свердла, дозволяє прогнозувати міцність і стійкість інструменту.

Потужність сучасних персональних комп'ютерів і мобільних пристроїв, а також нові програмні технології дозволяють удосконалити блок виведення розрахунків, надаючи інженерам-конструкторам засоби тривимірної візуалізації результатів. Для дослідження напружено-деформованого стану осьового різального інструменту застосуємо скінченно-елементний аналіз, який є потужним засобом, що дозволяє моделювати розподіли переміщень, деформацій і напружень в конструкціях промислового призначення. Основна ідея даного методу полягає в тому, що будь-яку безперервну величину (переміщення, силу, тиск, температуру тощо) можна апроксимувати моделлю, складеною з окремих елементів. На кожному з цих елементів досліджується безперервна величина апроксимується частково-безперервною функцією, яка будується за значеннями досліджуваної безперервної величини в скінченій кількості точок, які належать досліджуваному елементу. Для реалізації скінченно-елементного аналізу розроблено багато різноманітних програмних комплексів (ANSYS, NX Nastran, SolidWorks Simulation тощо), більшість з яких є системами загального призначення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш простим у застосуванні при моделюванні задач напружено-деформованого стану є програмний комплекс SolidWorks з його надбудовою Simulation [2]. Незалежно від того, яку задачу розв'язують в процесі скінченно-елементного аналізу в системі SolidWorks Simulation можна виділити три стадії процесу:

- попередня (препроцесорна) – підготовка моделі;
- прикладання навантажень та отримання розв'язку;
- постпроцесорна – обробка отриманих результатів.

На стадії препроцесорної підготовки здійснюється побудова геометричної 3D-моделі, виконується вибір типу розрахунку та задаються всі необхідні для розв'язку задачі початкові умови: тип системи координат, фізико-механічні властивості матеріалу.

На другому етапі будується скінченно-елементна сітка, виконуються необхідні дії над її вузлами та елементами, прикладаються навантаження, задаються граничні умови та розв'язується задача. Даний етап включає в себе вибір виду аналізу та його опцій, різного виду навантажень, кроку розв'язку і завершується запуском на розрахунок скінченно-елементної задачі.

На постпроцесорній стадії можна звернутись до отриманих результатів та вивести їх необхідним чином. Найбільш ефективним методом візуального представлення числових даних, отриманих методом скінченних елементів, є зображення напівтонової моделі тривимірного каркасу досліджуваної конструкції, тому результатом роботи програми на постпроцесорній стадії є графічне та табличне представлення отриманих результатів – деформацій, сил, напружень та переміщень, як на окремих ділянках, так і їх розподіл по всій конструкції.

Практика експлуатації осьових інструментів, в тому числі для обробки отворів, показує, що його роботоздатність багато в чому визначається інструментальним матеріалом, геометричними параметрами різального елемента, режимами різання, а також способом базування та кріплення інструмента [3, 4].

Аналізуючи характер і причини зношування та руйнування свердел, їх можна розділити на такі групи в залежності від характеру руйнування:

- а) пластична деформація і зношування по задній поверхні відбувається при дуже високій швидкості різання;
- б) кратерне зношування – найбільш поширений вид зносу, що виникає на передній поверхні інструменту внаслідок критично високої температури в зоні різання.
- в) наростування, яке виникає при обробці низьковуглецевих або нержавіючих сталей;
- г) викришування різальної кромки, може виникнути через: неспіввісність осі свердла і осі обертання інструменту; відведення свердла, викликаного надмірним вильотом, подачею або глибиною свердління; недостатньою жорсткістю свердла в результаті неправильного кріплення, а також поганого стану шпинделя або неточного регулювання.

Існуючі методи, спрямовані на досягнення оптимальних параметрів початкового стану інструменту з метою підвищення його експлуатаційних показників [4] (міцність, працездатність, продуктивність тощо) умовно можна розділити на стадії:

- вибору – здійснюється розробка і вдосконалення існуючих інструментальних матеріалів, застосування методів поверхневого зміцнення різальної частини інструменту, що забезпечують підвищення міцності і працездатності;
- проектування – здійснюється вдосконалення конструкції та оптимізація геометричних параметрів різальної частини інструменту;
- експлуатації – здійснюється оптимізація режимів різання.

В даному дослідженні для підвищення роботоздатності свердел приведено методику оптимізації конструктивних параметрів, що може використовуватися на стадії вибору розрахунку і проектування, а також експлуатації на основі порівняльної оцінки напруженого стану та міцності конструкції інструменту.

**Мета дослідження** – моделювання зміни напружено-деформованого стану різальної частини спірального свердла при навантаженні осьовою силою та крутним моментом, що виникають в процесі свердління глибоких отворів.

**Викладення основного матеріалу.** Як об'єкт дослідження обрано спіральне свердло з конічним хвостовиком, діаметром 18 мм з довжиною робочої частини 130 мм і загальною довжиною 228 мм, що виготовлене з швидкорізальної сталі Р6М5. Фізико-механічні властивості інструментального матеріалу: границя міцності при розтягу  $\sigma_b = 800$  МПа; модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуасона  $\mu = 0,28$ ; модуль зсуву  $G = 1,6 \cdot 10^5$  МПа. Для свердла прийнято такі геометричні параметри: кут при вершині  $2\phi = 118^\circ$ ; кут підйому гвинтової лінії  $\omega = 26^\circ$ ; задній кут  $\alpha = 12^\circ$ ; передній кут  $\gamma = 25^\circ$ ; кут нахилу поперечної різальної кромки  $\psi = 52^\circ$ .

Для виконання дослідження було побудовано твердотільну 3D-модель спірального свердла (рис. 1, а) з такими об'ємними властивостями: густина  $\rho = 8138$  кг/м<sup>3</sup>, об'єм  $V = 3,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> та маса  $m = 0,286$  кг.

Проводимо нанесення сітки на побудовану геометричну модель (рис. 1 б) за допомогою генератора сітки, який може обробляти конструкції складної форми автоматично. При цьому реалізується алгоритм розумного вибору розмірів скінченного елемента з урахуванням кривизни поверхні моделі. Також при необхідності можливо задавати загальний розмір елемента та тип сітки.

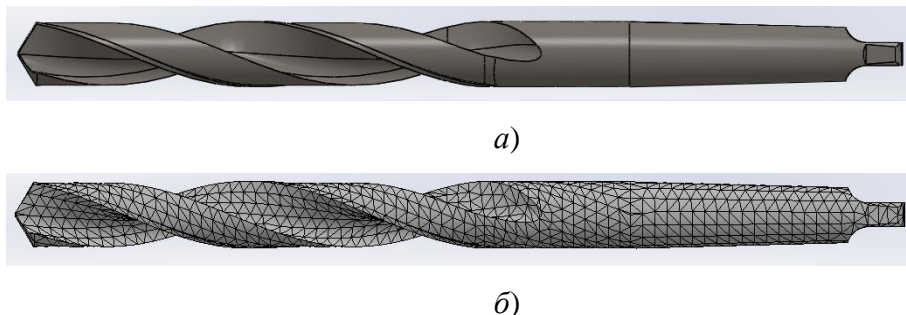


Рис. 1. Твердотільна 3D-модель спірального свердла Ø18 мм (а) та його поділ на скінченну кількість елементів (б)

Швидкість різання та механічні навантаження, що діють на головні різальні кромки в залежності від подачі інструменту (осьова сила та крутний момент) розраховані за рекомендаціями [5] наведено на рис. 2.

Після побудови скінченно-елементної сітки до моделі прикладаються навантаження. Під навантаженнями розуміють як внутрішні та зовнішні сили, так і граничні умови у вигляді обмежень переміщення. В програмі навантаження поділені на такі категорії: обмеження ступенів вільності (обмеження переміщення вузлів вздовж і їх поворотів навколо осей координат); зосереджені сили і моменти; поверхневі навантаження; об'ємні сили; інерційні навантаження.

Слід підкреслити, що мешування моделі (створення скінченно-елементної сітки) і правильне її навантаження, передусім стосовно розміщення і видів граничних умов, є найбільш відповідальним етапом у створенні адекватної моделі об'єкта, що досліджується.



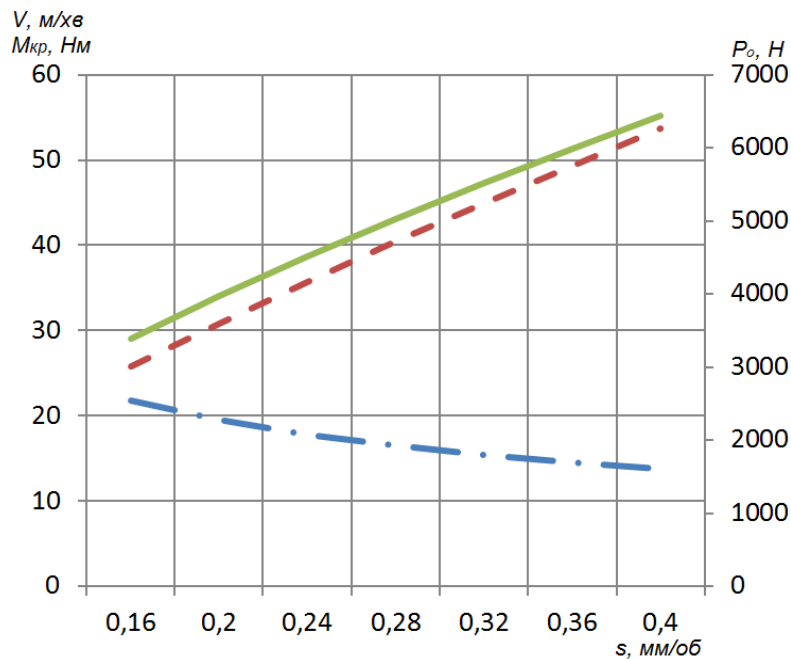


Рис. 2. Залежності швидкості різання (— · —) і крутного моменту (— · —) та осової сили (—) від подачі інструменту

У розробленій моделі осова сила прикладена до різальної кромки вздовж осі, тангенційну силу замінено крутним моментом, який старається «розкрутити» свердло (рис. 3 а). Умовам закріплення і роботи осового інструменту для обробки отворів свердлінням найточніше відповідає схема з фіксованим закріпленням хвостової частини (рис. 3 б), тобто не враховується можливе проковзування свердла в конусі Морзе, так як воно не впливатиме на стійкість інструменту.

Задавши всі необхідні параметри, виконуємо розв'язок, при якому програма звертається до бази даних за інформацією про модель та прикладені до неї навантаження, формує та розв'язує системи рівнянь (кількість яких у декілька разів перевищує кількість елементів моделі) і видає результати для даного виду аналізу. Результати записуються в спеціальний файл та базу даних. В розрахунковому відношенні ця частина процесу потребує найбільшої кількості машинного часу, але при цьому не потребує втручання користувача.

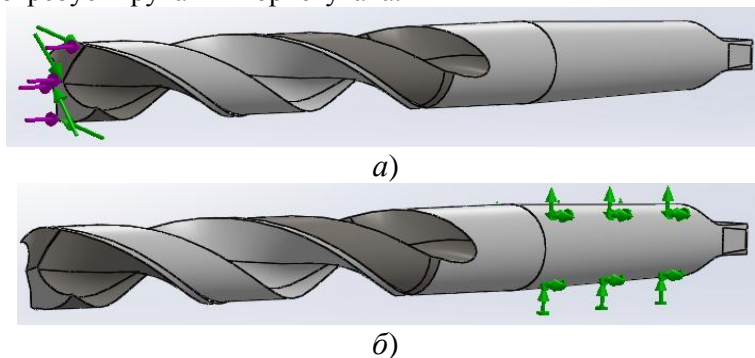


Рис. 3. Схема прикладення механічних навантажень, що діють на головні різальні кромки (а) та кріплення (б) свердла

Результати розв'язаної задачі представлені у вигляді інтерактивних епюр (рис. 4 а, б, в): напружень за Мізесом, результуючих переміщень і еквівалентних деформацій.

Максимальне значення напруження за Мізесом спостерігається близько середини різальної кромки, що може призводити до можливих сколів і відповідно виходу з ладу інструменту. Розроблений програмний алгоритм дозволяє візуалізувати розподіл деформацій, переміщень і напружень, що виникають в осовому інструменті (на прикладі спірального свердла) при його навантаженні у процесі експлуатації осовою силою та обертовим моментом.

Для оцінки можливості обробки при заданих режимах проведена серія чисельних експериментів із зміною подачі та залежних від неї параметрів, результати яких приведено на рис 5.

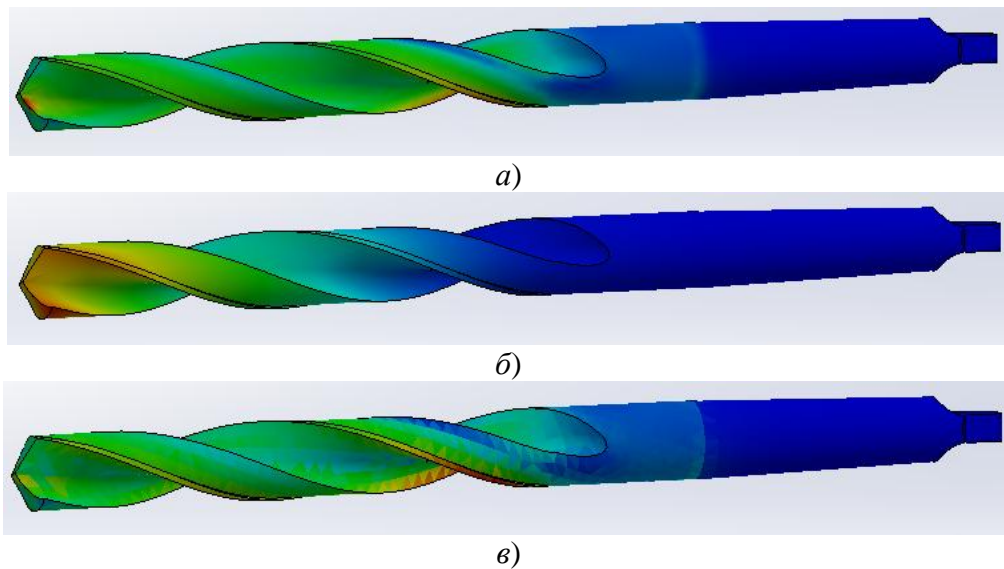


Рис. 4 а, б, в. Епюри напружень за Мізесом (а), результуючого переміщення (б) та еквівалентної деформації (в)

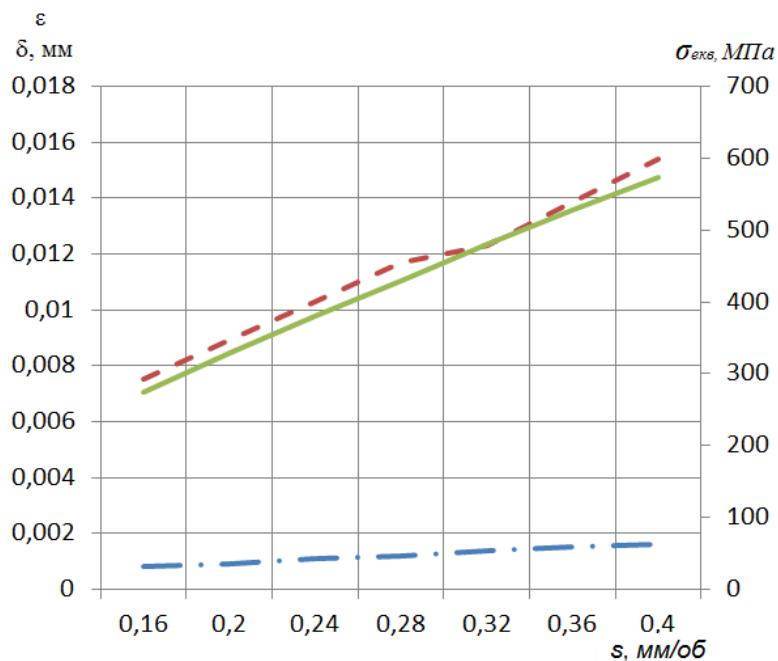


Рис. 5. Залежності напружень за Мізесом (—), результуючого переміщення (---) та еквівалентної деформації (- · -) від подачі інструменту

За результатами досліджень напружено-деформованого стану осевого інструменту на прикладі спірального свердла зі швидкорізальної сталі, можна зробити висновок, що при діаметрі свердла 18 мм і розрахунку режимів різання за нормативами [5] доцільно використовувати подачу не більшу, ніж 0,36 мм/об.

Результати розрахунків дозволяють проводити оцінку впливу конструктивних і геометричних параметрів свердел на точність і довговічність та розробляти рекомендації для можливості проведення оптимізації при їх проектуванні.

**Висновки.** Моделювання динаміки процесу деформації різальної частини свердла, при впливі на неї характерних навантажень, дозволяє визначити «слабкі» місця при проектуванні та подальшому виготовленні різального інструменту.



В результаті проведених досліджень розроблено методику скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану суцільних осьових різальних інструментів, яка дозволяє оцінити розподіл напружень в інструменті, оптимізувати режими різання та вдосконалити геометрію, що в кінцевому варіанті дозволить збільшити запас міцності, продуктивність інструменту на початкових етапах його проектування, розроблення операцій металообробки і тим самим підвищити ефективність процесу різання.

#### **Список використаних джерел**

1. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
2. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А.А. Алямовский. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
3. Аваков А.А. Физические основы теории стойкости режущих инструментов. / А.А. Аваков – М.: Машгиз, 1960 – 308 с.
4. Режущие инструменты: учебное пособие / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе [и др.] – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 388 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

#### **Рецензент:**

**В.Г. Панчук**, докт. техн. наук.

Стаття надійшла до друку 20.06.2018

УДК 629.113

**В.І. Захарчук**

Луцький національний технічний університет

**МЕТОД БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ПАЛИВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

*Особливість запропонованого методу полягає в тому, що показники палив та двигуна оцінюються критерієм адаптованості техніки до певного виду палива, також застосовано новий підхід до оцінки екологічної безпеки технологічних транспортних засобів під час роботи на різних паливах за критерієм екологічності з врахуванням кількості викидів шкідливих речовин, їх гранично допустимих концентрацій та класу небезпеки. Отримані характеристики двигуна для їх використання в математичній моделі руху транспортного засобу описані поліноміальними залежностями. Найбільше значення загального критерію вибору доцільного виду палива, який об'єднує перераховані вище критерії, має природний газ у випадку його використання в переобладнаному з дизеля газовому двигуні, менше значення критерію для біодизельного палива, найменше значення критерію для нафтового дизельного палива.*

*Ключові слова:* альтернативні моторні палива, транспортні засоби, багатокритеріальний вибір.

**V. Zaharchuk****METHOD OF MULTICRITERION CHOICE OF FUEL FOR TRANSPORT VEHICLES**

*The purpose of the work is to choose a type of fuel or an energy source for vehicles according to one general criterion. The feature of the proposed method is that the indicators of fuel and engine are estimated by the criterion of adaptability of technique to a particular type of fuel. A new approach to environmental safety assessment of technological vehicles while working on different fuels by environmental criterion taking into account the amount of emissions of harmful substances, their maximum permissible concentrations and hazard class. The economic efficiency in the operation of vehicles on alternative fuels is estimated by the criterion of economic efficiency.*

*The obtained characteristics of the engine for their use in the mathematical model of motion of the vehicle were described by polynomial dependencies. Quantitative values of fuel consumption and emissions of harmful substances in the process of moving a technological vehicle for a ride cycle using various types of fuels were obtained by method of mathematical modeling. The analysis helps to define the efficient type of the fuel in accordance with the above mention criteria. Natural gas has the greatest value for choosing the appropriate fuel type. Less criterion is used for biodiesel fuel, the lowest value criterion is appropriate for petroleum diesel fuel.*

*Keywords:* alternative motor fuels, transport vehicles, multicriterion choice.

**В.И. Захарчук****МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ТОПЛИВА ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Особенность предложенного метода заключается в том, что показатели топлив и двигателя оцениваются критерием адаптированности техники к определенному виду топлива, также применен новый подход к оценке экологической безопасности технологических транспортных средств во время работы на разных топливах за критерием экологичности с учетом количества выбросов вредных веществ, их предельно допустимых концентраций и класса опасности. Полученные характеристики двигателя для их использования в математической модели движения транспортного средства описаны полиномиальными зависимостями. Наибольшее значение общего критерия выбора целесообразного вида топлива, который объединяет перечисленные выше критерии, имеет природный газ в случае его использования в переоборудованном с дизеля газовом двигателе, меньшее значение критерия для биодизельного топлива, наименьшее значение для нефтяного дизельного топлива.*

*Ключевые слова:* альтернативные моторные топлива, транспортные средства, многокритериальный выбор

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день *в світі* є великий парк колісних транспортних засобів та мобільної сільськогосподарської техніки з двигунами, які працюють на дизельному паливі нафтового походження. Але вартість дизельного палива зростає, а екологічна ситуація в *країнах* погіршується. Одним з основних шляхів виходу з цієї ситуації є адаптація дизелів до роботи на альтернативних видах палив [1, 2, 3].

Можливість застосування певного виду альтернативного моторного палива (АМП) визначається його регіональними ресурсами, співвідношенням цін між альтернативними та традиційними паливами, затратами на адаптацію двигунів для роботи на АМП, на доставку, зберігання та заправку техніки.

Значна частина колісних тракторів, зокрема класу 1,4, в сільськогосподарському виробництві, комунальному господарстві та промисловості використовується в якості технологічного транспорту, коли передбачений їх заїзд в закриті приміщення та тривала робота в цих приміщеннях. Вже через декілька хвилин їх роботи в закритому приміщенні гранично

допустимі концентрації шкідливих викидів у відпрацьованих газах (ВГ) двигуна перевищують норму [4]. Зменшити це негативне явище можна використанням альтернативних моторних палив.

**Аналіз літературних даних.** Для технологічних транспортних засобів (ТЗ) пріоритет по АМП належить біопаливам на основі рослинних олій та газовим паливам [5, 6]. Дослідженню показників ТЗ при їх роботі на АМП присвячена значна кількість робіт в Україні, зокрема в НТУ, ХНАДУ, ХПІ [7, 8, 9]. Але на даний час відсутні комплексні дослідження системи «паливо-двигун-транспортний засіб», які з системних позицій дозволили б розробити методики оцінки впливу використовуваного палива на енергетичні, екологічні та економічні показники засобів технологічного транспорту.

**Мета дослідження.** Метою роботи є вибір раціонального виду палива для технологічних транспортних засобів.

**Матеріали та методи досліджень.** Застосування системних принципів дозволило здійснити дослідження процесу експлуатації автотракторної техніки на АМП на моделі експлуатаційної системи «паливо-двигун-транспортний засіб» (рис. 1) [8]. На вхід системи подається певний вид палива, яке характеризується своїм елементарним складом, нижчою теплотою згоряння, ціною та іншими показниками. Виходом системи є загальний критерій вибору палива. Системний аналіз показав, що методика підбору альтернативних видів палива повинна ґрунтуватися на оцінці за різними критеріями [7]. Дослідники сходяться на думці, що найбільш важливими критеріями є: критерій адаптованості, екологічної безпеки ТЗ та економічної ефективності експлуатації [5, 6, 7], які включає в себе загальний критерій вибору палива.

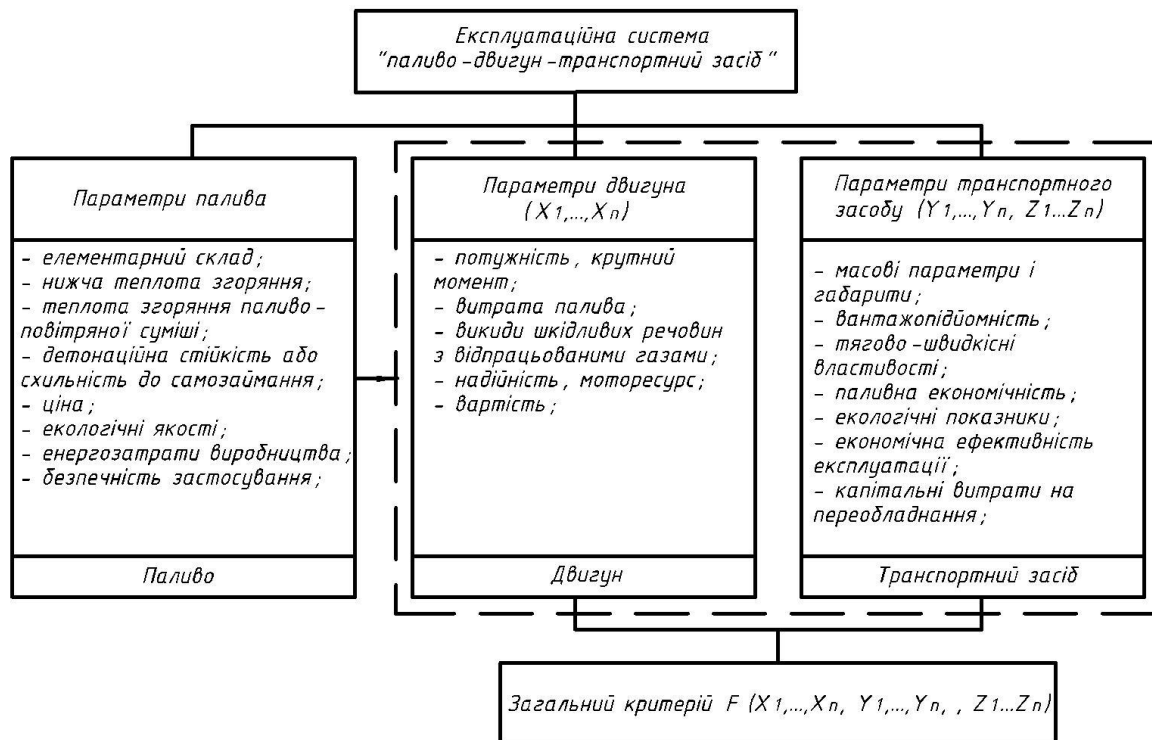


Рис. 1. Схема експлуатаційної системи «паливо-двигун-транспортний засіб»

Завдання вибору палива для транспортного засобу в загальному випадку зведене до задачі оптимізації параметрів експлуатаційної системи «паливо-двигун-транспортний засіб», тобто до відшукування таких значень  $x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n, z_1, \dots, z_k$ , при яких виконується умова:

$$F(x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n, z_1, \dots, z_k) \rightarrow \max$$

де  $x_j \in X$  - множина параметрів двигуна;

$y_i \in Y$  - множина параметрів транспортного засобу;

$z_i \in Z$  - множина параметрів транспортного засобу,

або до доведення, що таких значень на множині, як  $X \cup Y \cup Z$  (область визначення параметрів системи «паливо-двигун-транспортний засіб») не існує.

Як видно із схеми, зображеної на рис.1, системні об'єкти системи «паливо-двигун-транспортний засіб» характеризуються значною кількістю параметрів, врахувати усі при виконанні дослідження дуже складно. Тому методом апріорного ранжування визначені найбільш важливі з них, зокрема, для підсистеми «двигун» це потужність та витрата палива.

В роботі вперше розроблена загальна методологія вибору моторних палив для технологічних транспортних засобів за одним критерієм, який включає в себе критерій адаптованості  $K_a$  системи до альтернативних моторних палив, критерій екологічної безпеки  $K_e$  ТЗ та критерій економічної ефективності експлуатації  $K_{ек}$ .

Для комплексної оцінки експлуатаційних властивостей нафтового та альтернативних палив, а також енергетичних та паливо-економічних показників двигуна при роботі на різних паливах використовується критерій адаптованості, який визначається на основі методу аналізу ієрархій (МАІ) Т. Сааті. За допомогою МАІ можна вирішувати завдання багатокритеріальної оптимізації з досить великою кількістю критеріїв оптимальності [10]. Об'єкти досліджень оцінюються попарним порівнянням за допомогою розробленої математичної матричної моделі із застосуванням множини критеріїв, обраних залежно від вирішуваних завдань та області проблем, і мають різні рівні деталізації. При застосованні МАІ порівнюється відносна важливість кожного критерію з відносною важливістю будь-якого іншого критерію (елемента), який реалізується математичною матричною моделлю. Порівняння проводиться обчисленням власного вектора по рядках, обчисленням та нормалізацією вектора пріоритету. Для оцінки погодженості в МАІ використовуються індекс погодженості і відношення погодженості. Завершальний етап МАІ - розрахунок критерію адаптованості техніки до різних палив:

$$K_a = \sum_{i=1}^{i=n} x_i \phi_i, \quad (1)$$

де  $x_i$  – вектор пріоритету  $i$ -го оціночного критерію, отриманого при парному порівнянні відносної важливості критеріїв на другому рівні по відношенню до загальної мети на першому рівні;

$\phi_i$  – вектор пріоритету  $i$ -го об'єкта досліджень, отриманого при парному порівнянні відносної важливості об'єктів досліджень на третьому рівні (парне порівняння об'єктів досліджень) по відношенню до критеріїв другого рівня.

Для розрахунку потужності двигуна використано зв'язок між корисною роботою (потужністю) двигуна і кількістю теплоти, витраченою для її одержання. Паливна економічність двигуна оцінюється питомою ефективною витратою палива в енергетичних одиницях.

Оцінка екологічних властивостей технологічних ТЗ, що працюють на альтернативних і базових видах палива проводиться з урахуванням санітарних норм [11]. На першому етапі це виконується за критерієм ЕП екологічної пристосованості ДВЗ до альтернативних видів палива [11]:

$$ЕП = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i)^{\alpha_i} = \frac{КНТ}{КНТ_6}, \quad (2)$$

де  $КНТ$  – категорія небезпеки ТЗ, що працює на альтернативному паливі,  $м^3/с$ ;

$КНТ_6$  – категорія небезпеки ТЗ, що працює на базовому паливі,  $м^3/с$ .

$$КНТ = \sum_{i=1}^n КНД_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{M_i}{ГДК_i} \right)^{\alpha_i} \quad (3)$$

де  $КНД_i$  – категорія небезпеки  $i$ -ої речовини,  $м^3/с$ ;

$M_i$  – кількість викидів  $i$ -ої речовини,  $г/с$ , значення яких отримані на основі даних про шляхові викиди ШР,  $г/км$ , отриманих розрахунками з використанням математичних моделей руху ТЗ за їздовим циклом;

$ГДК_i$  – середньодобова гранично-допустима концентрація  $i$ -ої речовини,  $г/м^3$ ;

$\alpha_i$  – безрозмірна константа, що дозволяє співставити класи небезпеки  $i$ -ої речовини і діоксиду сірки (III клас небезпеки);

$n$  – кількість шкідливих речовин у ВГ.

На другому етапі визначається показник екологічної небезпеки ТЗ, працюючого на альтернативному виді палива

$$K_{en} = EP \cdot K_{\sigma} \quad (4)$$

де  $K_{\sigma}$  – показник екологічної небезпеки ТЗ, що працює на базовому виді палива.

Критерій екологічної безпеки

$$K_e = \frac{1}{K_{en}} \quad (5)$$

Економічна ефективність використання АМП оцінюється критерієм економічної ефективності

$$K_{ек} = \frac{E_{е.е}}{K} \quad (6)$$

де  $K$  – капітальні витрати на переобладнання ТЗ для використання АМП;

$E_{е.е}$  – економія експлуатаційних витрат при використанні АМП.

Економія експлуатаційних витрат має місце, в основному, за рахунок використання дешевшого палива або за рахунок його меншої витрати.

Об'єднання окремих критеріїв в загальний критерій оптимального виду палива здійснюється наступним чином:

$$K = \varphi_1 K_a + \varphi_2 K_e + \varphi_3 K_{ек}, \quad (7)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - коефіцієнти вагомості критеріїв адаптованості техніки до АМП, екологічної безпеки та економічної ефективності експлуатації технологічних ТЗ на різних паливах ( $\sum \varphi_i = 1$ ).

Для оцінки вагомості окремих критеріїв були використані результати експертних оцінок, виконані в роботі [9]. Найбільшу значимість прийнято для критерію екологічної безпеки (0,38...0,42), дещо менші значення (0,28...0,32) мають: критерій адаптованості та критерій економічної ефективності експлуатації. Для визначення палива, яке має найкращі показники, при оцінюванні його властивостей, повинна виконуватись умова:  $K \Rightarrow \max$ .

**Результати досліджень.** З використанням методу аналізу ієрархій та математичної матричної моделі виконана комплексна оцінка експлуатаційних показників альтернативних моторних палив та показників двигуна з метою визначення критерію адаптованості. Оціночні показники моторних палив наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Оціночні показники моторних палив**

Показник	Паливо		
	ДП	БДП	СПГ
Достатність ресурсів та можливість масового виробництва	-	+/-	+/-
Нижча теплота згоряння МДж/кг (МДж/м <sup>3</sup> )	42,5	38,3	38
Детонаційна стійкість (октанове число) або схильність до самозаймання (цетанове число)	45	49	110-125
Ціна, грн./л (грн./м <sup>3</sup> ) на поч. 2015 р.	16,5	15,5	8
Екологічні якості (вплив на навколишнє середовище)	-	+	+/-
Енерговитрати виробництва	-	+	+
Безпечність застосування	+/-	+	+/-

Прим.: «+» – наявність переваг у порівнянні із дизельним нафтовим паливом;

«-» – відсутність переваг у порівнянні із дизельним нафтовим паливом;

«+/-» – поєднання переваг та недоліків.

ДП - дизельне паливо, БДП - біодизельне паливо, СПГ – стиснутий природний газ.

Оціночними показниками паливо-енергетичних властивостей є показники палив та показники двигуна: А1 – достатність ресурсів та можливість масового виробництва палива; А2 – енергетичні показники двигуна при роботі на даному паливі; А3 – детонаційна стійкість палив та схильність до самозаймання; А4 – ціна палива; А5 – питома ефективна витрата палива двигуном в енергетичних одиницях; А6 – енергозатрати виробництва палива; А7 – безпечність застосування.

За результатами розрахунків критерію адаптованості техніки до різних палив найвище значення критерію має природний (табл. 2).

Таблиця 2

## Розрахункові значення критерію адаптованості техніки до різних палив

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	Критерій адаптованості
$\Sigma(x_i)$	0,14	0,14	0,14	0,11	0,16	0,15	0,16	
Дизельне паливо	0,26	0,4	0,24	0,27	0,25	0,27	0,36	0,29
Біодизель	0,43	0,34	0,34	0,27	0,32	0,33	0,36	0,34
Природний газ	0,31	0,25	0,42	0,46	0,43	0,38	0,28	0,36

Математичним моделюванням визначені: шляхова витрата палива та шляхові викиди шкідливих речовин технологічного транспортного засобу (трактор МТЗ-80) при роботі на різних паливах. Порівняння паливо-економічних та екологічних показників двигунів при роботі на різних паливах проводилось за експериментальними навантажувальними та швидкісними характеристиками, які описувались поліноміальними моделями (рис. 2). Годинні витрати палива, повітря та вміст ШР у ВГ двигунів всіх типів під час роботи в режимі самостійного холостого ходу задовільно описуються поліномами другої степені залежно від частоти обертання холостого ходу  $n_0$ . Під час роботи двигуна з іскровим запалюванням на газовому паливі в навантажувальних режимах показники визначаються в функції від двох змінних: частоти обертання колінчастого вала двигуна  $n_0$  та розрідження у впускному колекторі  $\Delta p_k$ . Показники дизеля в навантажувальних режимах описуються поліномами залежно від  $n_0$  та крутного моменту двигуна  $M_e$ .

Наприклад, показники дизеля під час роботи на біодизельному паливі та його сумішах з нафтовим паливом (витрата повітря  $G_{нов}$ , витрата палива  $G_n$ , концентрації шкідливих речовин у ВГ: оксиду вуглецю  $CO$ , вуглеводнів  $C_mH_n$ , оксидів азоту  $NO_x$  та димність  $D$ ) описуються поліномами третього порядку.

Виконана перевірка адекватності поліноміальних моделей, які описують двигуни, за критерієм Фішера. Масові викиди шкідливих речовин визначались за витратами палива та повітря та концентраціями цих речовин у ВГ.

Розроблено математичні моделі руху технологічних транспортних засобів (ТТЗ) шляхом врахування роботи технологічного засобу з причепом та конструктивних особливостей двигуна та трансмісії. Математичні моделі руху транспортних засобів за їздовим циклом це системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які описують режими руху транспортних засобів та відповідні їм режими роботи двигунів. Вхідними параметрами в математичних моделях є споряджена маса транспортного засобу, величина та швидкість переміщення органів керування паливоподачею, обрана передача, час переключення передач, швидкість руху, втрати в трансмісії, дорожні умови, завантаження транспортного засобу. Вихідними параметрами є витрата палива, витрата повітря та викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами двигунів ТТЗ.

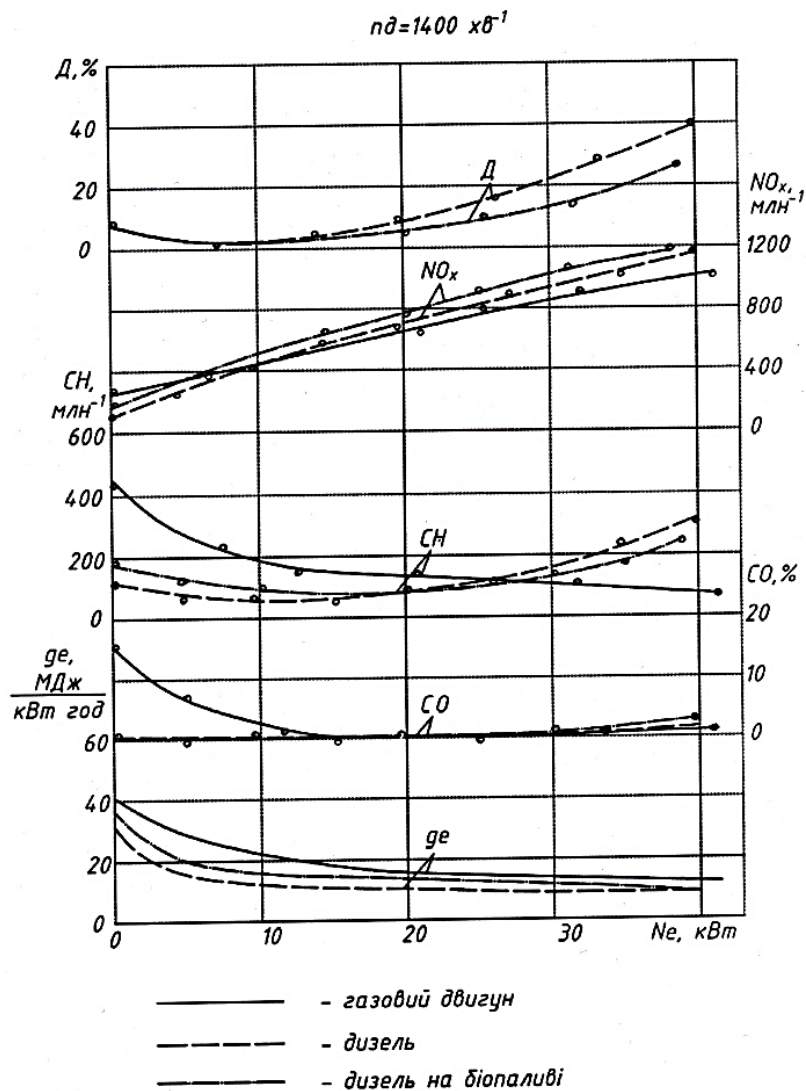


Рис. 2 – Навантажувальні характеристики з заміром токсичності відпрацьованих газів двигуна 4С11,0/12,5 під час роботи на різних паливах

Основною величиною для розрахунку всіх режимів прийнято значення ефективного крутного моменту двигунів, який розраховується поліноміальною залежністю другого ступеня від частоти обертання колінчастого вала і положення важеля керування паливоподачею (в дизелях) або розрідження у впускному колекторі (в двигунах з іскровим запалюванням). Під час руху ТЗ сила тяги на ведучих колесах витрачається на подолання сил опору рухові, які створює дорога, а також сил опору прискореному рухові. Сила опору повітря внаслідок малих швидкостей руху ТТЗ не враховується.

Процеси розгону ТЗ з блокованим зчепленням, сповільнення з від'єднаним та приєднаним двигуном описуються диференційними рівняннями, які розв'язуються за методом Рунге-Кутта. Шляхом розв'язання систем диференційних рівнянь, які описують режим роботи транспортного засобу, на кожній ділянці їздового циклу визначаються середні значення параметрів, які визначають режим роботи двигунів. Математичні моделі дозволяють розрахувати питому витрату палива та питомі масові викиди шкідливих речовин ТТЗ за концентраціями цих речовин та витратами різних видів палива і повітря.

Адекватність математичних моделей руху ТТЗ за їздовим циклом перевірялась порівнянням розрахункових швидкостей та витрат палива з даними експериментальних досліджень, отриманих при виконанні їздового циклу в дорожніх умовах. Перевірка адекватності математичних моделей підсистем системи „паливо-двигун-транспортний засіб” порівнянням з результатами експериментальних досліджень показала, що математичні моделі задовільно описують основні

процеси системи і можуть бути використані для оцінки доцільності використання альтернативних палив в ТТЗ.

Зазвичай моделювання руху транспортних засобів виконується за режимами стандартних їздових циклів, які імітують рух транспортних засобів. Оскільки стандартні їздові цикли для технологічного транспорту відсутні, то для оцінки показників такої техніки сформований їздовий цикл, який включає основні режими її руху. Їздовий цикл складається з двох частин: перша частина – розгін, рух з порівняно високою швидкістю та сповільнення характерний для доставки вантажу на виробництво, друга частина - рух з малою швидкістю та частими зупинками характерний для розвезення вантажу.

Розрахунки показали, що ТТЗ з дизелем при русі за прийнятим їздовим циклом, витрачає менше палива (відповідно в середньому) на 22 %, викиди  $CO$  у трактора з дизелем менші на 47 %,  $CH$  – менше на 90 %, ніж у ТТЗ з газовим двигуном. Це пояснюється тим, що газовий двигун на всіх режимах працює на більш багатих паливо-повітряних сумішах. Оксидів азоту  $NO_x$  ТТЗ з дизелем викидає на 4 % більше. На відміну від ТТЗ з газовим двигуном, ТТЗ з дизелем викидає ще і сажу. Порівнюючи сумарні питомі викиди шкідливих речовин (ШР), приведені до оксиду вуглецю  $\Sigma CO$ , з урахуванням відносної агресивності, видно, що більш токсичним (на 36 %) є ТТЗ з дизелем. Сумарна токсичність тракторного двигуна, працюючого на біодизельному паливі, також є нижчою, у порівнянні роботою на нафтовому паливі. Але кількість викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах не дає можливість виконати аналіз екологічної безпеки ТТЗ.

Категорія небезпеки ТТЗ, працюючого на біодизелі в 1,11 рази менша, а на природному газі в 1,26 рази менша, ніж на дизельному паливі. Причому екологічна небезпека відпрацьованих газів для всіх видів палива в середньому на 90% визначається небезпекою оксидів азоту  $NO_x$ , вміст яких у ВГ за масою не дуже значний.

Наступним етапом було визначення показника екологічної небезпеки та рівня екологічної безпеки ТТЗ при роботі на різних паливах за критерієм  $K_e$  (таблиця 3). З табл. 3 видно, що найкраще значення критерію екологічної безпеки притаманне ТТЗ, працюючому на природному газі.

Таблиця 3

#### Оцінка екологічної безпеки ТТЗ при роботі на різних паливах

Вид палива	Показник екологічної небезпеки $K_{en}$	Критерій екологічної безпеки $K_e$
Дизельне паливо	2,98	0,33
Природний газ	2,38	0,42
Біодизель	2,7	0,37

Експлуатація ТТЗ на газовому паливі в порівнянні з дизельним паливом забезпечує річний економічний ефект 6078,3 грн., а термін окупності витрат на переобладнання для роботи на газі складає 1,41 року. При експлуатації на біодизельному паливі річний економічний ефект складе 177,3 грн., а термін окупності витрат на переобладнання 4,9 року.

В результаті досліджень встановлено, що найвище значення загального критерію вибору доцільного виду палива має природний газ у випадку його використання в переобладнаному з дизеля газовому двигуні, а найменше значення критерію в нафтового дизельного палива. Результати розрахунків зведені в табл. 4.

Таблиця 4

#### Значення загального критерію вибору доцільного виду палива для ТТЗ

Паливо	Загальний критерій $K$ вибору доцільного виду палива
Дизельне паливо	0,221
Природний газ	0,489
Біодизель	0,31

**Висновки.** Модельні представлення функціонування автотракторної техніки, працюючої на різних паливах, дозволили звести задачу вибору палива до оптимізації параметрів експлуатаційної системи «паливо-двигун-транспортний засіб» за критерієм адаптованості, критеріями екологічної



безпеки та економічної ефективності експлуатації. Запропонована методологія дозволяє оцінити показники автотракторної техніки при її роботі на різних паливах за одним загальним критерієм, що значно спрощує вибір раціонального виду палива.

#### Список літератури:

1. Марков В. А., Ефанов А. А., Девянин С. Н. Альтернативные топлива и методика оценки их экологических качеств // Грузовик. – 2007. – №6. – с. 27-34.
2. Патрахальцев Н. Н. Повышение экономических и экологических качеств двигателей внутреннего сгорания на основе применения альтернативных топлив // М. : РУДН, 2008. – 248 с.
3. Использование альтернативных топлив в самоходной технике. Научно-информационный материал // М. : Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина, 2010. – 95 с.
4. Максименко О. О. Технология улучшения состояния воздушной среды в помещениях ограниченного объема при работе в них двигателей внутреннего сгорания с жидкостными нейтрализаторами // Автореф. дис. канд. техн. наук. 05.20.01. – Рязань: РГСХА, 2006. – 20 с.
5. Гавриш В. І. Забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів у аграрному секторі економіки // Монографія В. І. Гавриш. – Миколаїв : МДАУ, 2007. – 283 с.
6. Базаров Б. И. Работа поршневых двигателей на альтернативных видах топлива // Б. И. Базаров. – Ташкент: ТАДИ, 2001. – 238с.
7. Парсаданов И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия // Харьков: НТУ"ХПИ". – 2003. – 244 с.
8. Захарчук В. І. Методика підбору альтернативних моторних палив для транспортних засобів // В.І. Захарчук – Вісник НТУ, 2013., №3. – С. 85–90.
9. Матейчик В. П. Методи оцінювання та способи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів // [Монографія] : В.П. Матейчик. – Київ: НТУ. – 2006. 216 с.
10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий // Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
11. Цыкура А. А., Дворников Г. П., Бондаренко Е. В. Оценка влияния автомобильного транспорта на качество воздушной среды Оренбуржья // Вестник ОГУ. – 2000. – №1, с. 47-49.

Стаття надійшла до редакції 21.06.2018

**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 лівє 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 державного стандарту 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. Іванов<sup>1</sup>, П.П. Петров<sup>2</sup>**

*Луцький національний технічний університет<sup>1</sup>*

*Тернопільський національний технічний університет<sup>2</sup>*

**НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОІДА, 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 - ....

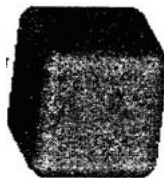


Рис. 1. Назва рисунка

Таблиця 1.

Назва таблиці

№п/п	Фактори		Функції відгуку	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>

**Висновки.** В статті розроблено алгоритм наближеного.....

**Список використаних джерел:**

1. Гуляев К.В. Математические модели и моделирование. – М: Металлургия, 1970. – 471 с.
2. Гірченко.....

**ПШБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.**

Ціна договірна

# **Колектив авторів**

**Наукові нотатки**

**Міжвузівський збірник  
(за галузями знань «Технічні науки»)  
Випуск 63**

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