

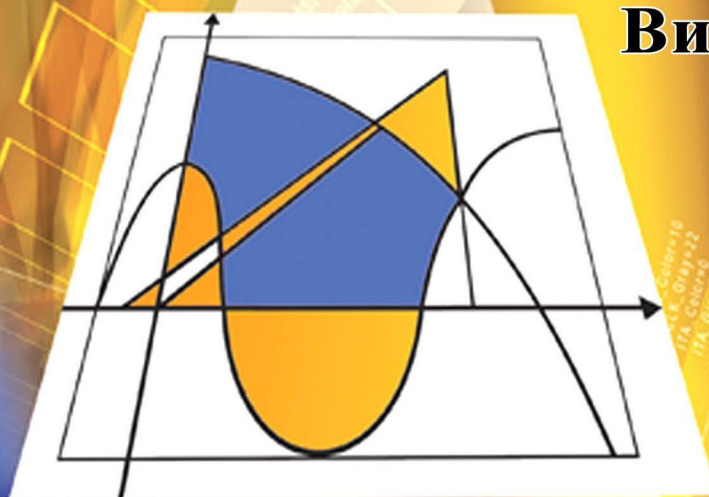
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

# НАУКОВІ НОТАТКИ

Випуск 60



ЛУЦЬК - 2017

# **НАУКОВІ НОТАТКИ**

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

**Випуск 60  
2017**

**Луцьк 2017**

## РЕДАКЦІЙНА РАДА

Пустюльга С.І., декан МБФ, Луцький НТУ, д.т.н, професор; Рудь В.Д., зав. кафедри, 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., проректор, Луцький НТУ, к.т.н., доцент.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 5 від 29.12.2017 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**

## 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 печаті. 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\*\*](http://notatki.com.ua)

*З повагою,*

*Відповідальний редактор,  
професор Луцького НТУ*

*В.Д. Рудь*



## ЗМІСТ

<b>Зміст</b> .....	4
<b>Алексенко В.Л., Шарко А.А., Юренін К.Ю., Сметанкін С.О., Степанчиков Д.М.</b> Вплив ступенів деформації на параметри сигналів акустичної емісії сталі СТЗСП.....	8
<b>Амелін М.Ю., Сапронов О.О., Ходаковський О.В., Букетова Н.М.</b> Відновлення деталей транспорту полімерними композитами з мікродисперсними частками, що є відходами виробництва.....	22
<b>Андрущак І.Є., Матвійв Ю.Я.</b> Технологічні прийоми структурного підходу до програмування і його основні концепції.....	31
<b>Антоненко Я.С.</b> Натурні випробування жорсткості станин важких токарних верстатів.....	36
<b>Барановський В.М., Скальський О.Ю.</b> Теоретичні основи викопування крихких коренеплодів цикорію.....	43
<b>Береженко Є.Б., Барановський В.М.</b> Технологія збирання гички коренеплодів.....	50
<b>Бодак В.І., Бодак М.В., Павлова І.О., Сомов Д.О.</b> Переваги та недоліки різних форм забірних частин шнекових насосів.....	56
<b>Брайло М.В., Букетов А.В., Якущенко С.В., Ludmila Dulebova</b> Застосування методу планування експерименту при формуванні полімерного композиту з поліпшеними експлуатаційними характеристиками для його використання у засобах транспорту.....	58
<b>Букетов А.В., Кулініч В.Г., Сметанкін С.О., Андрійчук В.А., Алексенко В.Л.</b> Вплив модифікатору $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$ на адгезійні властивості епоксидної матриці.....	69
<b>Вдовиченко В.О.</b> Оцінка доцільності пріоритетного руху міського громадського пасажирського транспорту з позицій стабілізації часу прибуття в транспортно-пересадочний термінал.....	75
<b>Гадай А.В., Грицюк Ю.В.</b> Моделювання приймачів електроенергії з різкозмінним навантаженням.....	80
<b>Грицюк І.В., Грицюк Ю.В., Волинець В.І.</b> Визначення витрат енергопостачальних компаній на обслуговування реактивних перетікань в електричних мережах з розосередженими джерелами енергії.....	86
<b>Дацко Б.М., Чумало Г.В.</b> Вплив хлоридно-сульфідних середовищ на ємнісно омичні властивості епоксидних покриттів.....	92
<b>Дацюк Л.М., Вржешч М.В., Дацюк Т.Л.</b> Обґрунтування параметрів вирізного диска садильної машини.....	95
<b>Дзюра В.О.</b> Вплив розміщення деформувальних елементів на параметри регулярного мікрорельєфу.....	100
<b>Дудніков А.А., Дудніков І.А., Дудник В.В., Горбенко О.В., Келемеш А.О.</b> Зміцнення поверхневого шару деталей методом пластичного деформування.....	108
<b>Єфімчук Г.В.</b> Інтенсифікація процесу обводнення прісносухої сировини.....	113
<b>Засідко І.Б., Полутренко М.С., Мандрик О.М.</b> Рівняння Ленгмюра в дослідженнях адсорбції цеолітом йонів купруму та мангану.....	117
<b>Захарова Л.М.</b> Дослідження дисипативних структур під час необоротних деформацій масиву гірських порід.....	122
<b>Калюжний В.Л., Горностаї В.М., Потятиник А.М.</b> Розрахунково-експериментальне дослідження холодного прямого видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою» круглих стержнів із сталі.....	127
<b>Корнеєва І.Б.</b> Проектування та розрахунок сталефібробетонної багатопустотної плити перекриття.....	133
<b>Ларін О.О., Потопальська К.Є.</b> Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу зі статистично заданим корозійним дефектом, що розвивається у часі.....	137
<b>Ліщенко Н.В.</b> Визначення режимів зубошліфування за температурним критерієм.....	147
<b>Мазін С.П., Маренко Г.М., Скиба А.Г., Франков В.М.</b> Пропозиції щодо вдосконалення конструкцій бронетранспортерів Національної гвардії України.....	156

<b>Марчук В.І., Марчук І.В.</b> Забезпечення точності формоутворення в технологічних системах шліфування поверхонь обертання.....	161
<b>Марчук Н.М.</b> Обґрунтування параметрів оправок для нарізання різі мітчиками в отворах деталей машин.....	166
<b>Навроцька Т.Д.</b> Технологічне оснащення для контролю якості деталей гвинтових механізмів.....	171
<b>Недашківський Є.А.</b> Інноваційний підхід до прогнозування фінансових часових рядів з фрактальною структурою.....	175
<b>Неутов С.Ф., Сидорчук М.М., Сур'янінов М.Г.</b> Дослідження повзучості сталевібробетону.....	181
<b>Пилипець М.І., Паньків В.Р.</b> Методологія проведення експериментальних досліджень комбінованого гвинтового транспортера.....	187
<b>Повстяна Ю.С., Шенфельд В.Й., Янченко О.Б., Савюк І.В., Самчук Л.М.</b> Структурні особливості пористої кераміки на основі окалини сталі та сапоніту.....	193
<b>Ратушний О.В., Дрофа А.О.</b> Шлях до нової парадигми розвитку: особливості переходу до VI технологічного укладу та постіндустріального суспільства.....	199
<b>Савюк І.В.</b> Побудова матричної моделі для оптимізації шихтового складу екзотермічної шихти.....	206
<b>Татарченко Г.О., Білошицький М.В., Білошицька Н.І., Уваров П.Є.</b> Корозія сталей в органічній кислоті у присутності озону.....	212
<b>Фесенко О.Д.</b> Вдосконалена методика побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА.....	218
<b>Шинкарчук Н.В.</b> Контактна взаємодія ізотропної пластинки з круговим отвором і пружного диска.....	225

## CONTENT

<i>Contents</i> .....	4
<i>Aeksenko V.L., Sharko A.A., Yurenin K.Y., Smetankin S.A., Stepanchikov D.M.</i> The influence of deformation's degree on acoustic emission signals' parameters of the steel ST3SP.....	8
<i>Amelin M.Yu., Sapronov A.A., Khodakovskii A.V., Buketova N.M.</i> Restoration of transport parts with polymeric composites with microdispersed particles, which are production wastes.....	22
<i>Andruschak I.Ye., Matviiv Yu.Ya.</i> Technological adjustments of the structural approach to programming and his main concepts.....	31
<i>Antonenko Y.</i> Natural studies of hardness of heavy lathes frames.....	36
<i>Baranovsky V., Skalsky O.</i> Theoretical aspects of digging out fragile chicory root crops.....	43
<i>Berezhenko E.B., Baranovsky V.M.</i> Technology of harvesting of root crops.....	50
<i>Bodak V., Bodak M., Pavlova I., Somov D.</i> Advantages and disadvantages of different forms of side parts of mechanical pumps.....	56
<i>Brailo M., Buketov A., Yakushchenko S., Ludmila Dulebova</i> The application of the method of experiment planning in creating a polymeric composite with improved performance for its use in transport.....	58
<i>Buketov A.V., Kulinich V.G., Smetankin S.A., Andreychuk V.A., Aleksenko V.L.</i> The influence of the C <sub>13</sub> H <sub>12</sub> Cl <sub>2</sub> N <sub>2</sub> modifier on the adhesive characteristics of epoxy matrix.....	69
<i>Vdovychenko V.</i> An estimation of expediency of priority motion of urban public passenger transport from positions of stabilizing of arrival time to the transport-transplantation terminal.....	75
<i>Hadaj A., Hrytsiuk Yu.</i> Modeling of electric energy receivers with cutting variable loading.....	80
<i>Hrytsiuk I.V., Hrytsiuk Y.V., Volynets V.I.</i> Determination of the benefits of energy supply companies for service of reactive transmitters in electrical networks with reserved energy sources.....	86
<i>Dacko B.M., Chumalo H.V.</i> Influence of chloride - sulfide environments on the capacity-omic properties of epoxy coatings.....	92
<i>Datsiuk L., Vrzheschch M., Datsiuk T.</i> Ground of parameters of the carved disk of landing machine.....	95
<i>Dzyura V.O.</i> Influence of deformation elements arrangement on regular microrelief parameters.....	100
<i>Dudnikov A.A., Dudnikov I.A., Dudnik V.V., Gorbenko O.V., Kelemesh A.A.</i> Slimming of surface layer details by method plastic deformation.....	108
<i>Yefimchuk G.</i> The intensification of the soaking of dry raw materials.....	113
<i>Zasidko I.B., Polutrenko M.S., Mandryk O.M.</i> Langmuir's equation in the studies of adsorption by the zeolite of the coenzyme and mangan ions.....	117
<i>Zakharova L.</i> Investigation of dissipative structures that emerged during irreversible deforming of the ground.....	122
<i>Kaljuzhny V., Gornostay V., Potjatynyk A.</i> Computational and experimental research of cold forward extrusion according to the scheme "workpiece behind the workpiece" of the round steel rods.....	127
<i>Korneieva I.B.</i> Design and calculation multihollow slab of overlap steel fiber concrete.....	133
<i>Larin O., Potopalska K.</i> An estimation of residual strength of curvilinear pipeline part based on a statistical corrosion defect which is developing over a time.....	137
<i>Lishchenko N.V.</i> Determination of grinding modes by temperature criteria.....	147
<i>Mazin S.P., Marenko G.N., Skiba A.G., Frankov V.N.</i> Proposition concerning the armored fighting vehicle construction improvement of National guard of Ukraine.....	156
<i>Marchuk V.I., Marchuk I.V.</i> Providing the accuracy of formal formation in technological systems sanding of surface surfaces.....	161
<i>Marchuk N.</i> Rationale of rating parameters for redistribution of miscellaneous incidents of machine parts.....	166
<i>Navrotska T.D.</i> Technological equipment for control of quality details of screw mechanisms.....	171
<i>Nedashkivskyi Y.A.</i> Innovative approach to forecasting of financial time series with fractal structure.....	175

<i>Neutov S.F., Sidorchuk M.M., Suryaninov N.G.</i> Investigation of creep of steel fiber concrete.....	181
<i>Pilipets M., Pankiv V.</i> Methodology for conducting experimental investigations of combined screw transporter.....	187
<i>Povstiana Yu., Shenfeld V., Yanchenko A., Saviuk I., Samchuk L.</i> Structural features of persistent ceramics on the basis of steel and saponite.....	193
<i>Ratushnyi A., Drofa A.</i> The way to the new development paradigm: peculiarities of transition to the VI wave of innovation and the post-industrial society.....	199
<i>Saviuk I.</i> Construction matrix model for optimizing charge composition exothermic charge.....	206
<i>Tatarchenko G.O., Biloshytskyi M.V., Biloshytska N.I., Uvarov P.E.</i> Corrosion of steel in organic acid in the presence of ozone.....	212
<i>Fesenko A.D.</i> Improved methodology of building intelligent automatic control system for the unmanned aerial vehicle navigation system.....	218
<i>Shynkarchuk N.V.</i> Contact interaction of an isotropic plate with a circular hole and an elastic disk.....	225



УДК 667.64:678.026

В.Л. Алексенко<sup>1</sup>, А.А. Шарко<sup>2</sup>, К.Ю. Юренин<sup>1</sup>, С.А. Сметанкин<sup>1</sup>, Д.М. Степанчиков<sup>2</sup>*Херсонская государственная морская академия<sup>1</sup>**Херсонский национальный технический университет<sup>2</sup>***ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СТАЛИ СТЗСП**

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований по установлению взаимосвязи возникновения сигналов акустической эмиссии (АЭ) с параметрами силового поля при различных стадиях нагружения образцов из стали СтЗсп. Разработаны методика исследований и конструкция образцов, позволяющие исследовать связь параметров нагружения и деформации с моментами возникновения сигналов АЭ. Полученные при нагружении образцов данные АЭ сигналов, сопоставлены с результатами измерений относительной деформации образцов. Обнаружена корреляция возникновения сигналов АЭ с моментами изменения степени деформации материала в функции от приложенного напряжения. Показано, что ответственной за изменение степени деформации стали СтЗсп при одноосном нагружении является низкочастотная часть спектра АЭ. Рассмотрена физическая природа возникновения сигналов АЭ и дискретные модели источников акустической эмиссии в материалах. Доказано, что параметры АЭ, возникающей при деформировании материалов при различных этапах накопления повреждений и развития нагружений, могут служить эффективными характеристиками изменения микроструктуры материалов. Обнаружено, что возникновение сигналов АЭ при деформационных изменениях структуры происходит раньше, чем это фиксируется в результате механических испытаний на одноосное растяжение. Дается объяснение этому явлению, исходя из погрешностей измерений, которая в разрывных испытаниях значительно выше, чем при акустических измерениях. Показано, что АЭ является перспективным направлением исследований процессов деформации и разрушения материалов, позволяющим оценить наступление характерных этапов диаграммы изменения степени деформации от приложенной нагрузки.*

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия (АЭ), сигналы, деформация, микроструктура материала, напряжение, измерения.

В.Л. Алексенко, А.А. Шарко, К.Ю. Юренин, С.О. Сметанкин, Д.М. Степанчиков

*Херсонська держана морська академія**Херсонський національний технічний університет***ВПЛИВ СТУПЕНІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ПАРАМЕТРИ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ  
СТАЛІ СТЗСП**

*В роботі представлені результати експериментальних досліджень по встановленню взаємозв'язку виникнення сигналів акустичної емісії (АЕ) з параметрами силового поля при різних стадіях навантаження зразків із сталі СтЗсп. Розроблені методики дослідження та конструкція зразків, що дозволяють досліджувати зв'язок параметрів навантаження та деформації з моментами виникнення сигналів АЕ. Отримані при навантаженні зразків дані АЕ сигналів, зіставлені з результатами вимірів відносної деформації зразків. Виявлено кореляцію виникнення сигналів АЕ з моментами зміни ступеня деформації матеріалу в функції від прикладеної напруги. Показано, що відповідальною за зміну ступеня деформації сталі СтЗсп при одноосному навантаженні є низькочастотна частина спектра АЕ. Розглядається фізична природа виникнення сигналів АЕ та дискретних моделей джерел акустичної емісії у матеріалах. Доведено, що параметри АЕ, які виникають при деформуванні матеріалів при різних етапах накопичення пошкодження та розвитку навантажень, можуть служити ефективними характеристиками зміни микроструктур матеріалів. Виявлено, що виникнення сигналів АЕ при деформацийних змінах структур відбувається раніше, ніж це фіксується в результаті механічних випробувань на одноосному розтягуванні. Дасться обґрунтування цього явища, виходячи з помилок вимірювань, які в розривних випробуваннях значно вище, ніж при акустичних вимірах. Показано, що АЕ є перспективним напрямком досліджень процесів деформації та руйнування матеріалів, що дозволяє оцінити настання характерних етапів діаграм зміни ступеня деформації від прикладеного навантаження.*

*Ключові слова:* акустична емісія (АЕ), сигнали, деформация, микроструктура матеріалу, напруга, вимірювання.

V.L. Aeksenko, A.A. Sharko, K.Y. Yurenin, S.A. Smetankin, D.M. Stepanchikov

*Kherson State Maritime Academy**Kherson National Technical University***THE INFLUENCE OF DEFORMATION'S DEGREE ON ACOUSTIC EMISSION  
SIGNALS' PARAMETERS OF THE STEEL ST3SP**

*On the job the experimental researches results for establishing acoustic emissions' signals interaction with force field's parameters under different stages of stress load on steel samples St3sp. The research methods and samples construction were developed. They allow to explore an interaction of stress parameters and deformation with moments of signals AE appearance. The received during stress load of samples AE signals data compared with results of relative samples deformation measurement. It was detected the correlation of appearing AE signals with material's deformation changing stages' moments in function of applied stress. It was shown, that low-cycle AE spectres part during one-axle stress is in charge of steel St3sp deformation's stages changing. It was examined the physical nature of AE signals appearance and*

*discrete models of acoustic emissions sources in materials. It was proved, that AE parameters, appearing during materials deformation under different stages of damages cumulation and stresses development may be used as effective characteristics of materials' microstructure changing. It was detected, that AE signals' appearance under structures' deformation's changings happens earlier, then it fixes as result of mechanical tests by uniaxial tension. An explanation of this scene is given, basing on measurements' error, which is higher in tearing tests, than during acoustic measurements. It is shown that the AE is a promising direction for studying the processes of deformation and materials' fracture, which makes it possible to evaluate the characteristic steps' onset of the diagram, showing the change in the deformation's degree from the applied load.*

*Key words:* acoustic emission (AE), signals, deformation, materials' microstructure, stress, measurement.

**Постановка проблеми.** В последнее время наблюдается тенденция роста требований как к конструкционным материалам, так и к методам оценки их надежности и качества. Особое внимание уделяется разработке новых, физически обоснованных, критериев прочности материалов, основанных на всестороннем изучении явлений, лежащих в основе процессов деформации и разрушения. Изучение кинетики деформации материалов связано с необходимостью анализировать силовой отклик материала на внешние растягивающие напряжения. Накопление повреждений при деформации металлов и сплавов в процессах структурной перестройки материалов, протекающих при деформации материалов, сопровождается акустической эмиссией (АЭ). Из-за сложности взаимосвязей структурных параметров и физико-механических характеристик материалов, нельзя при определении их свойств полагаться на априорные представления и теоретические положения об их изменениях в различных условиях эксплуатации. Для подтверждения правильности решений и выработки практических рекомендаций необходимо проведение комплексных экспериментальных исследований деформации материалов при их одноосном нагружении с одновременной регистрации моментов возникновения сигналов АЭ.

Использование инструментария АЭ дает возможность найти неизвестные ранее характеристики структуры материалов, проследить динамику их развития, устойчивость, целостность и обеспечить прогнозирование развития дефектов материала.

**Анализ публикации по обозначенной проблеме** показывает, что главный интерес исследователей в настоящее время направлен на изучение дефектов структуры материала, определяющих эксплуатационные характеристики изделий [1-6]. Структура материалов при нагружении может быть представлена как сложная система, обладающая свойствами нелинейности, неравновесности и необратимости. Рассмотрение структурных изменений и их влияния на свойства материалов может быть положено в основу механизма деградации сплошности материала на ранних стадиях деформационного процесса [7,8]. Одной из важных практических задач является сопоставление параметров АЭ тем изменениям структуры, которые она сопровождает [9-11].

**Целью работы** является изучения влияния различной степени деформации стали Ст3 при одноосном растяжении на параметры сигнала акустической эмиссии.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Современные экспериментальные методы материаловедения направлены на визуализацию результатов уровней различных процессов в том числе и разрушения. Недостатки методов заключается в их статичности. Исследовать динамику процессов структурообразования позволяет акустическая эмиссия.

К акустической эмиссии относят класс явлений, при которых распространяющиеся упругие волны порождаются быстрым высвобождением энергии от локальных источников нарушений микроструктуры внутри материала. Метод АЭ чрезвычайно чувствителен к любым изменениям дефектной структуры материалов. Он является интегральным методом. Накопление деформации в условиях механических нагружений обусловлено коллективными дислокационными процессами организации дислокаций в коррелированный ансамбль. В общем случае деформация протекает неоднородно и в процесс поочередно вовлекаются разные области деформируемого материала, в то время как в остальных частях деформация отсутствует.

Для эксперимента была выбрана одна из самых распространенных конструкционных углеродистых сталей Ст3сп. Образцы для испытаний на одноосное растяжение вырезались из листового проката размером (223x37x3) мм. Размеры образцов выбирались из условий обеспечения возможности размещения на недеформируемых участниках образцов акустических датчиков. Для локализации деформации зона предполагаемого разрушения исполнялась в виде галтели. С целью обеспечения надежных захватов образцов в фиксирующих устройствах разрывной машины к образцам в местах их крепления приваривались сухарики размером (38x8x8) мм, для того чтобы не возникали перекосы, и прикладываемая нагрузка действовала по

продольной оси образца. Форма и геометрические размеры образцов, а также мест разрушения при разрывных испытаниях представлены на рис. 1.

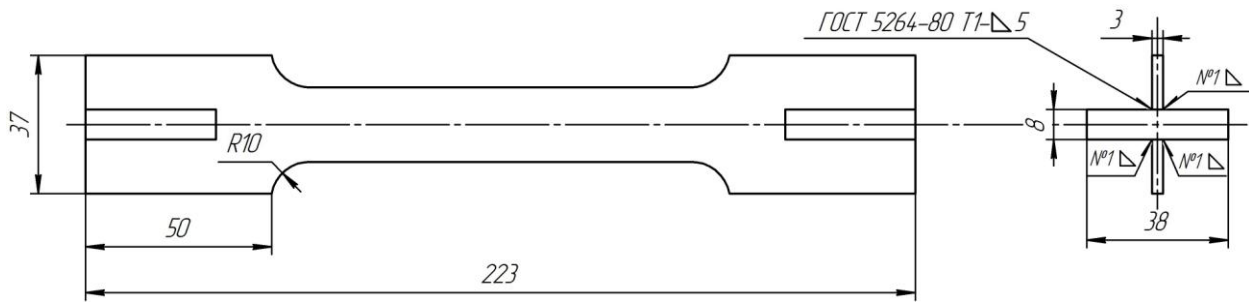


Рис. 1. – Чертеж образца из стали Ст3 для испытаний на одноосное растяжение.

Для снятия напряжений, вызванных механической обработкой, образцы отжигались при температуре 500 °С в течении одного часа.

В качестве контактного материала между преобразователями акустической эмиссии и образцом использовалось трансформаторное масло. В измерительной установке использовались широкополосные акустические датчики к акустико-эмиссионному прибору АФ15. Регистрация сигналов после усиления до 90 Дб выполнялась запоминающим осциллографом RIGOL DS1052E Digital oscilloscope. При этом осуществлялась частотная фильтрация. Ограничения в области низких частот вызваны необходимостью отсеки шумов механического и испытательного оборудования, а в области высоких – необходимостью отсеки электромагнитных наводок. При этом производилась запись сигнала в цифровом формате. Калибровка системы проводилась с помощью имитатора АЭ сигналов.

Неинформативные сигналы акустической эмиссии, вызванные шумами и трением в области захватов разрывной машины, уменьшались за счет использования резиновых прокладок между датчиками АЭ и образцом в струбцине крепления датчиков (рис.2.).

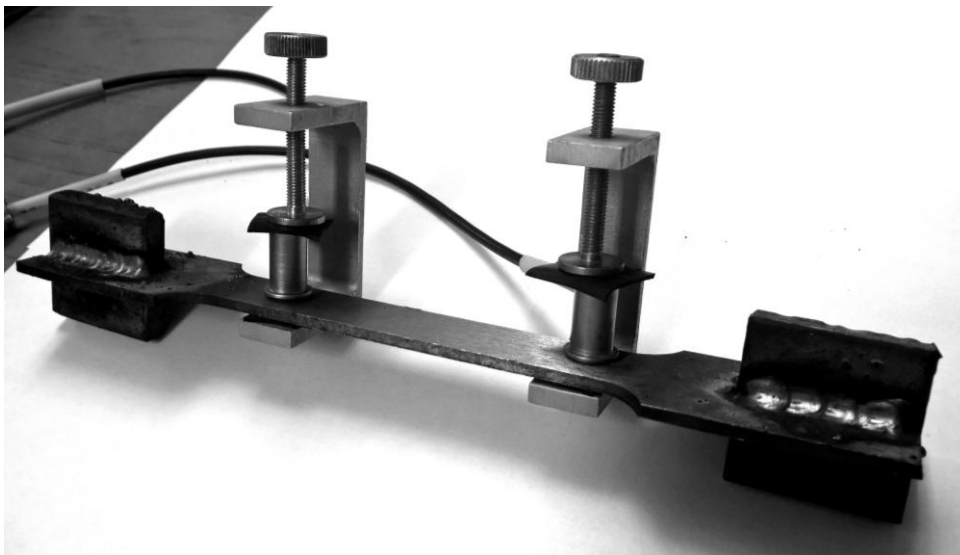


Рис. 2. – Расположение АЭ датчиков при измерениях.

Идентификация структурных особенностей накопления повреждений и разрушения материалов по данным АЭ осуществлялась на основе анализа степени деформации образцов, полученной из испытаний на разрывной машине УМ5. Схема экспериментальной установки для проведения измерений на одноосное нагружение представлена на рис.3.

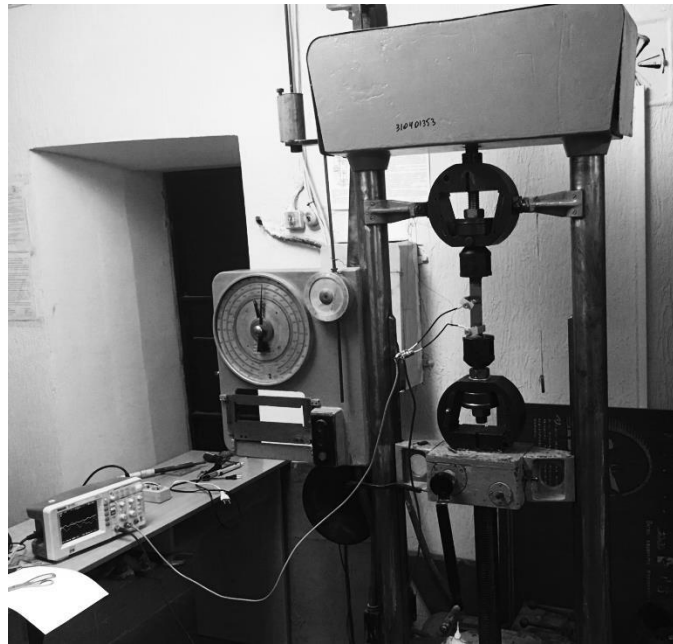


Рис. 3. – Установка для испытаний на одноосное нагружение.

Типичная форма акустического сигнала от двух датчиков акустической эмиссии при АЭ измерениях представлена на рис.4.

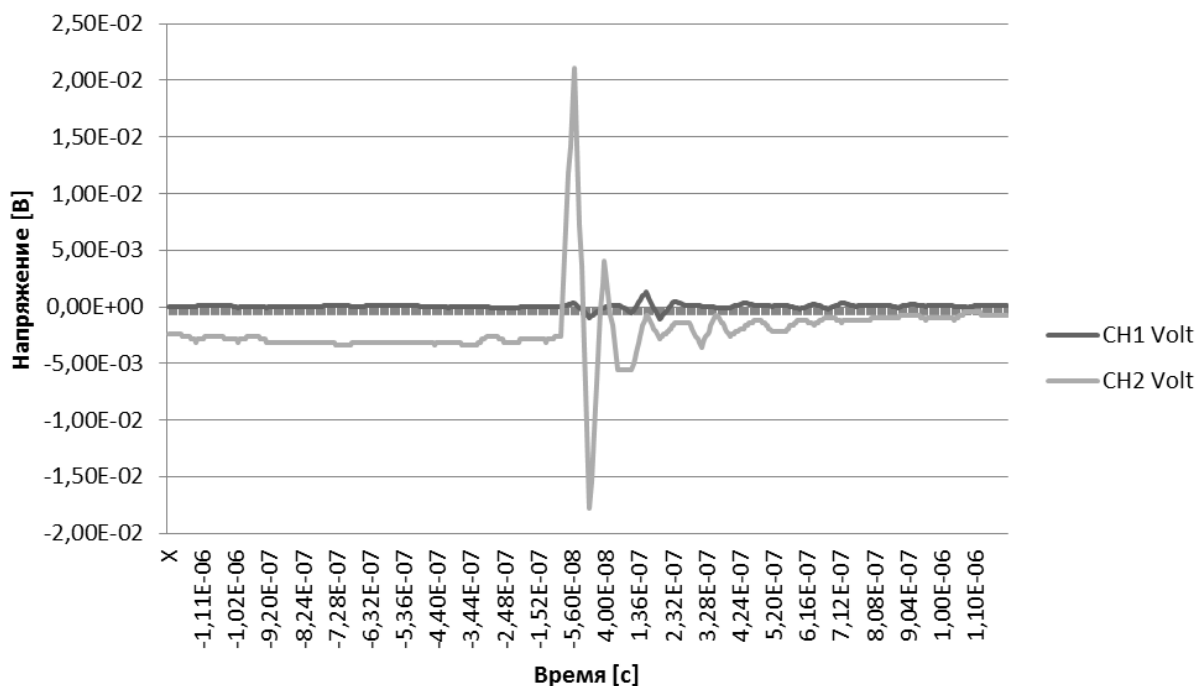


Рис. 4. – Типичный сигнал акустической эмиссии стали Ст3 от двух датчиков.

Сравнение формы АЭ сигнала с данными аналогичных измерений, представленных, например, в [3,10] дает основание заключить о правильности используемой методики, положенной в основу измерений АЭ сигналов. Различие АЭ сигналов от двух датчиков при идентичной нагрузке объясняются несогласованностью длины подводящих проводов между датчиками и усилителем осциллографа.

Фиксация удлинения осуществлялась с помощью рычажного тензометра Гугенбергера с постоянной базой. Тензометр Гугенбергера позволяет измерять деформацию на локальном участке образца. Принцип его работы основан на прямой зависимости линейного удлинения испытуемого



образца от напряжений в его поперечном сечении при действии деформирующей нагрузки. Схема работы прибора представлена на рис. 5.

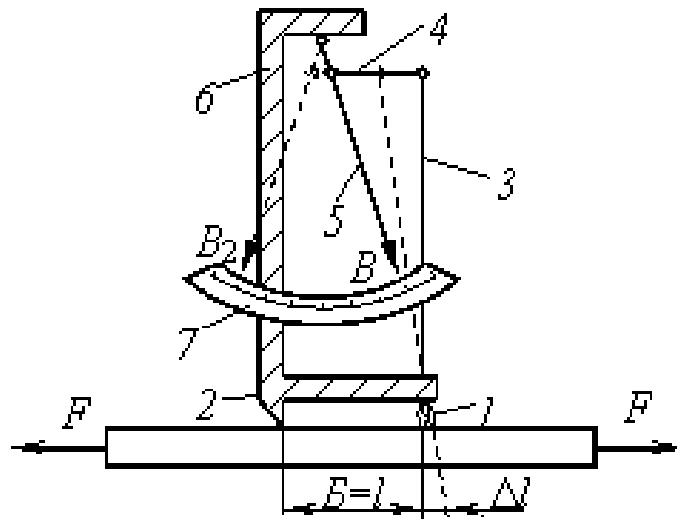


Рис. 5. – Принципиальная схема тензомера Гугенбергера.

В эксперименте с помощью струбинок тензометр прижимался к поверхности образца 1 через две ножевые опоры 2, выполненные в виде призм. Расстояние между ними  $L$  определяет базу измерений. Подвижная призма – 3, является одним из концов двухплечевая рычага 4. Соотношение плеч рычажной системы 4 таково, что смещение на  $0,001$  мм подвижного ножа 3 смещает конец стрелки 5 на уровне базы прибора 6 по шкале 7 на  $1$  мм, т.е. действительное перемещение увеличивается в тысячу раз. При базе  $20$  мм и передаточном числе  $1:1000$  цена деления прибора  $0,00005$  единиц относительной деформации, а погрешность измерений составляет  $15$  единиц относительной деформации.

Схема расположения датчиков АЭ и призм тензомера Гугенбергера представлена на рис.6.

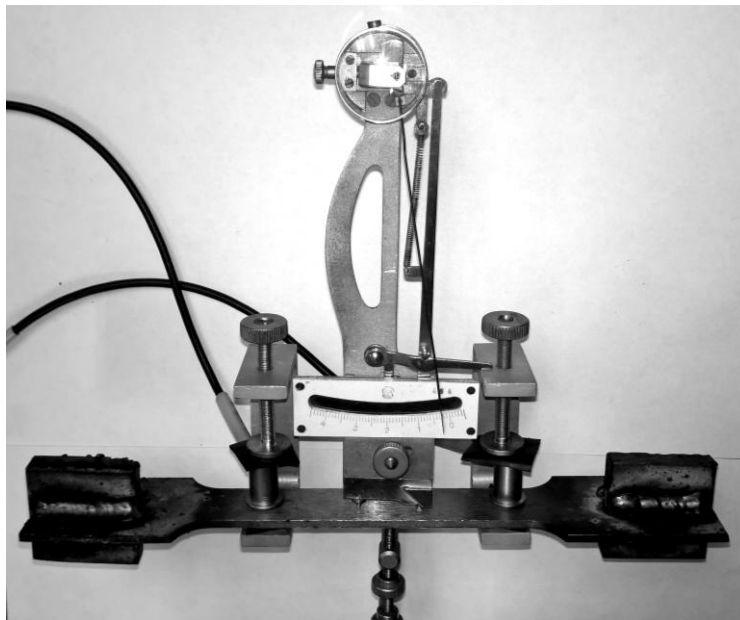


Рис. 6. – Схема расположения акустических датчиков и призм крепления рычажного тензомера Гугенбергера.

Технология измерений относительного удлинения с помощью рычажного тензомера Гугенбергера предусматривает перестановку стрелки прибора при достижении максимально разрешимой относительной деформации образца и суммирования текущих и предыдущих показаний прибора.

Для обеспечения непрерывной записи времени протекания процесса нагружения и фиксации относительной деформации таймер отсчета времени отключался на момент переустановки стрелки тензометра при достижении максимальных значений. Перестановка стрелки тензометра Гугенбергера требовала повторной установки прибора на испытуемом образце для сохранности подвижной призмы ножевой опоры и ее возвращения в исходное состояние при производстве измерений. Возможный уход стрелки прибора от нулевой отметки корректировался регулирующим устройством.

Схема эксперимента была основана на фиксации деформации как функции параметров силового воздействия на материал с синхронной регистрацией моментов возникновения сигналов АЭ (рис.7).



Рис. 7. – Схема информационно-измерительной АЭ системы.

Поскольку уровень сигналов АЭ невысок, возникают проблемы, связанные с выделением полезных сигналов на уровне собственных шумов аппаратуры и распознаванием сигналов АЭ. Для уменьшения собственных шумов нагружающего устройства, вызванных колебаниями двигателя разрывной машины, было предложено нагружение производить вручную. После достижения заданного уровня приложенной нагрузки происходит релаксация напряжений в образце. После установления равновесия производилось дальнейшее увеличение нагрузки с фиксацией измеряемых параметров.

Различие АЭ сигналов от двух датчиков устранялось за счет согласования длины подводящих проводов между датчиком и усилителем осциллографа. Синхронно регистрировались параметры деформирования и моменты возникновения сигналов акустической эмиссии. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты экспериментальных исследований

Усилие	Показания тензометра	Суммарное значение показаний с перестановкой тензометра	Время измерения	Общее время измерения с перестановкой стрелки тензометра	Механическое напряжение	Степень относительной деформации
Р, кг	DI	$\Sigma DI, \text{мм}$	t, с	$\Sigma t, \text{с}$	МПа	%
0	0	0	0	0	0,0	0,00
1590	22,5	22,5	0,5	0,5	259,7	0,11

1630	38	60,5	0,5	1	266,2	0,30
1640	65	125,5	0,5	1,5	267,9	0,63
1645	55	180,5	0,5	2	268,7	0,90
1650	50	230,5	0,5	2,5	269,5	1,15
1650	55	285,5	0,5	3	269,5	1,43
1650	45	330,5	0,5	3,5	269,5	1,65
1650	45	375,5	0,5	4	269,5	1,88
1650	44	419,5	0,5	4,5	269,5	2,10
1650	43	462,5	0,5	5	269,5	2,31
1650	23	485,5	1,5	6,5	269,5	2,43
1650	41	526,5	1	7	269,5	2,63
1650	41	567,5	1	8	269,5	2,84
1650	36	603,5	1	9	269,5	3,02
1650	33	636,5	10	10	269,5	3,18
1650	39	675,5	7	17	269,5	3,38
1650	40	715,5	28	45	269,5	3,58
1650	42	757,5	16	61	269,5	3,79
1670	40	797,5	8	69	272,8	3,99
1670	40	837,5	13	82	272,8	4,19
1670	60	897,5	14	96	272,8	4,49
1670	41	938,5	17	113	272,8	4,69
2000	43	981,5	14	127	326,7	4,91
2000	25	1006,5	14	141	326,7	5,03
2000	45	1051,5	12	153	326,7	5,26
2000	48	1099,5	1	154	326,7	5,50
2010	53	1152,5	1	155	328,3	5,76
2040	43	1195,5	1	156	333,2	5,98
2045	44	1239,5	2	158	334,0	6,20
2060	47	1286,5	1	159	336,5	6,43
2070	43	1329,5	1	160	338,1	6,65
2095	43	1372,5	1	161	342,2	6,86
2100	43	1415,5	1	162	343,0	7,08
2100	44	1459,5	1	163	343,0	7,30
2110	41	1500,5	1	164	344,6	7,50
2130	65	1565,5	1	165	347,9	7,83
2130	41	1606,5	1	166	347,9	8,03
2130	41	1647,5	1	167	347,9	8,24
2130	42	1689,5	1	168	347,9	8,45
2130	39	1728,5	1	169	347,9	8,64
2130	45	1773,5	1	170	347,9	8,87
2130	45	1818,5	1	171	347,9	9,09
2140	46	1864,5	34	205	349,5	9,32
2140	43	1907,5	13	218	349,5	9,54
2140	45	1952,5	18	236	349,5	9,76
2140	43	1995,5	17	253	349,5	9,98
2140	44	2039,5	16	269	349,5	10,20

2150	45	2084,5	17	286	351,2	10,42
2160	41	2125,5	14	300	352,8	10,63
2160	42	2167,5	12	312	352,8	10,84
2160	43	2210,5	13	325	352,8	11,05
2170	43	2253,5	1	326	354,4	11,27
2170	43	2296,5	3	329	354,4	11,48
2170	44	2340,5	1	330	354,4	11,70
2170	45	2385,5	3	333	354,4	11,93
2170	45	2430,5	1	334	354,4	12,15
2170	44	2474,5	1	335	354,4	12,37
2170	45	2519,5	1	336	354,4	12,60
2170	46	2565,5	1	337	354,4	12,83
2170	45	2610,5	1	338	354,4	13,05
2170	45	2655,5	3	341	354,4	13,28
2190	43	2698,5	2	343	357,7	13,49
2210	41	2739,5	1	344	361,0	13,70
2210	45	2784,5	1	345	361,0	13,92
2210	43	2827,5	1	346	361,0	14,14
2210	44	2871,5	1	347	361,0	14,36
2210	45	2916,5	1	348	361,0	14,58
2220	43	2959,5	1	349	362,6	14,80
2230	43	3002,5	1	350	364,2	15,01
2230	42	3044,5	1	351	364,2	15,22
2230	39	3083,5	0,5	351,5	364,2	15,42
2235	45	3128,5	0,5	352	365,1	15,64
2235	45	3173,5	0,5	352,5	365,1	15,87
2235	47	3220,5	0,5	353	365,1	16,10
2235	45	3265,5	0,5	353,5	365,1	16,33
2235	44	3309,5	0,5	354	365,1	16,55
2235	45	3354,5	0,5	354,5	365,1	16,77
2235	40	3394,5	0,5	355	365,1	16,97
2235	44	3438,5	0,5	355,5	365,1	17,19
2240	44	3482,5	0,5	356	365,9	17,41
2240	43	3525,5	0,5	356,5	365,9	17,63
2250	46	3571,5	0,5	357	367,5	17,86
2250	50	3621,5	0,5	357,5	367,5	18,11
2250	70	3691,5	0,5	358	367,5	18,46
2250	46	3737,5	0,5	358,5	367,5	18,69
2250	46	3783,5	0,5	359	367,5	18,92
2250	43	3826,5	0,5	359,5	367,5	19,13
2250	44	3870,5	0,5	360	367,5	19,35
2250	46	3916,5	0,5	360,5	367,5	19,58
2250	46	3962,5	0,5	361	367,5	19,81
2250	45	4007,5	1	362	367,5	20,04
2250	45	4052,5	2	364	367,5	20,26
2250	47	4099,5	3	367	367,5	20,50



2250	46	4145,5	1	368	367,5	20,73
2250	46	4191,5	1	369	367,5	20,96
2250	45	4236,5	7	376	367,5	21,18
2250	46	4282,5	1	377	367,5	21,41
2250	49	4331,5	0,5	377,5	367,5	21,66
2250	45	4376,5	0,5	378	367,5	21,88
2250	46	4422,5	0,5	378,5	367,5	22,11
2250	50	4472,5	0,5	379	367,5	22,36
2250	46	4518,5	0,5	379,5	367,5	22,59
2250	44	4562,5	36	415,5	367,5	22,81
2250	45	4607,5	0,5	416	367,5	23,04
2250	45	4652,5	0,5	416,5	367,5	23,26
2250	45	4697,5	0,5	417	367,5	23,49
2250	45	4742,5	27	444	367,5	23,71
2250	55	4797,5	36	480	367,5	23,99
2250	55	4852,5	0,5	480,5	367,5	24,26
2260	50	4902,5	0,5	481	369,1	24,51
2260	48	4950,5	22	503	369,1	24,75
2260	52	5002,5	0,5	503,5	369,1	25,01
2260	55	5057,5	0,5	504	369,1	25,29
2260	50	5107,5	0,5	504,5	369,1	25,54
2260	80	5187,5	0,5	505	369,1	25,94
2260	53	5240,5	14	519	369,1	26,20
2260	52	5292,5	0,5	519,5	369,1	26,46
2260	50	5342,5	10	529,5	369,1	26,71
2260	50	5392,5	12	541,5	369,1	26,96
2260	50	5442,5	0,5	542	369,1	27,21
2260	50	5492,5	0	542	369,1	27,46

В представленной таблице общее время измерений с перестановкой тензомера определялось суммированием времени показателей предыдущего отчета со значениями времени измерений, взятыми из этой же таблицы. Значения степени относительной деформации определялись умножением показаний тензомера, при перестановке стрелки прибора, на цену его деления. В таблице цветом выделены моменты возникновения сигнала АЭ при нагружении образца.

Схема проведения эксперимента по регистрации моментов возникновения сигналов АЭ при нагружении образцов из стали СтЗсп с фиксацией относительного удлинения представлена на рис. 8.

Деформация материала при растяжении является процессом, кинетика которого на всех стадиях определяется движением дислокаций и их ансамблей.

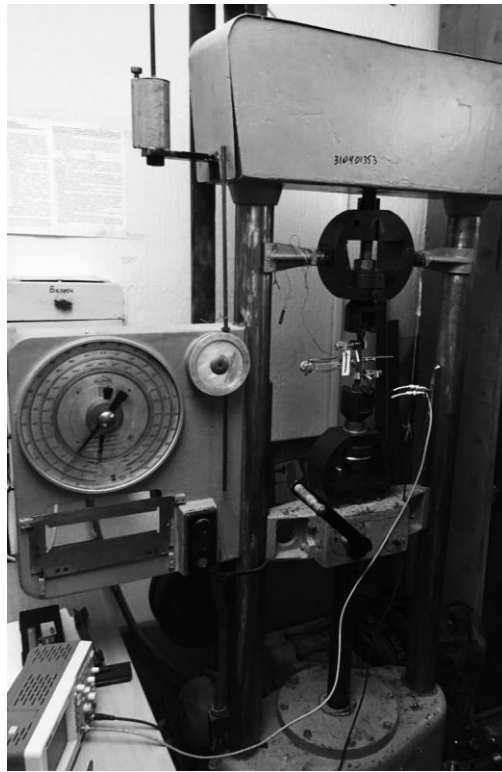


Рис. 8. – Внешний вид экспериментальной установки по обнаружению сигналов АЭ при изменении приложенной нагрузки с фиксацией относительного удлинения.

Результаты измерений зависимости степени относительной деформации образцов от приложенной нагрузки представлены на рис.9. Точками обозначены моменты возникновения сигналов АЭ, кружочками – границы силового поля, определенные из табл. 1, по результатам разрывных испытаний.

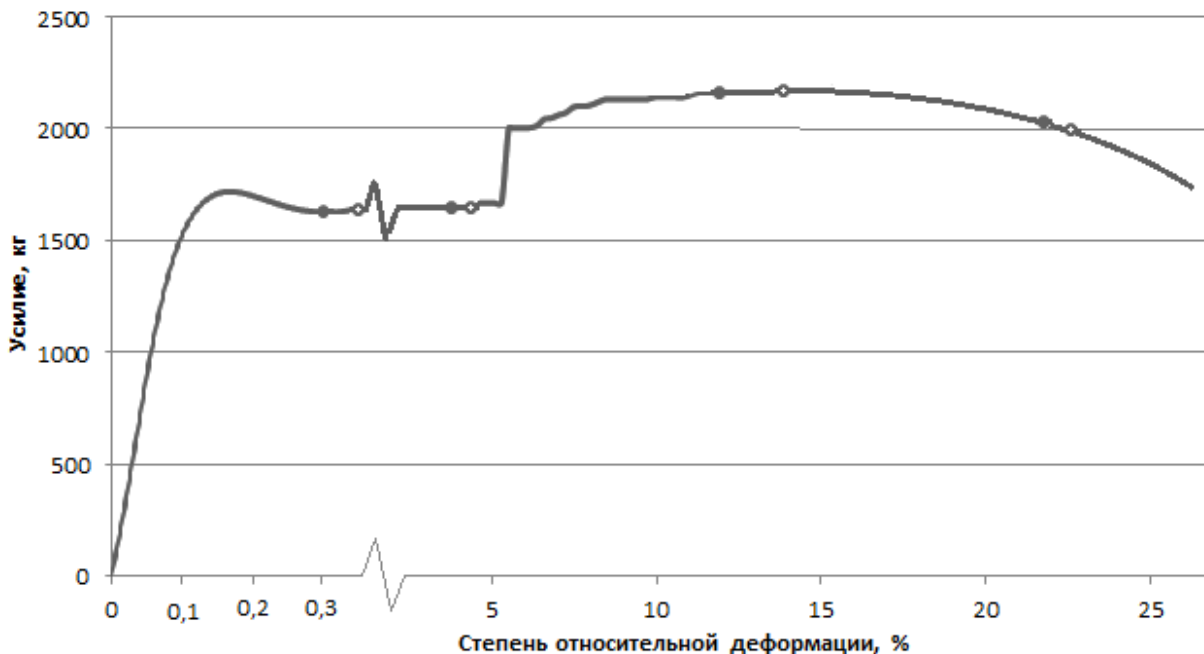


Рис. 9. – Диаграмма изменения степени деформации стали Ст3сп от приложенной нагрузки.

В результате эксперимента установлено скачкообразное возникновение сигналов АЭ при возрастании нагрузки. При нагружении образцов из стали Ст3сп четко прослеживаются три этапа (рис.9). Первый этап – этап макроупругой деформации, где соблюдается закон Гука. Вторым этапом – этап текучести, который соответствует деформации Чернова-Людерса и представляет собой упругое гомогенно-пластическое поведение. Третий этап – это этап деформационного упрочнения,

который предшествует разрушению. Отсутствие регистрации или низкий уровень активности АЭ свидетельствует не о полном отсутствии сигналов, а о низком уровне амплитуды и энергии излучаемых АЭ сигналов. При этом каждый параметр сигнала АЭ связан с каким-либо параметром процесса разрушения и является его акустическим отображением. Так в начальной стадии диаграммы нагружения справедлив закон Гука и напряжение в образце  $\sigma$  пропорционально деформации  $\varepsilon$ . Модуль упругости  $E$  определяется через тангенс угла наклона этой характеристики:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha .$$

Зона упругости ограничивается пределом пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ . После достижения  $\sigma_{\text{пц}}$  деформации образца растут быстрее, чем приложенное напряжение и диаграмма становится криволинейной. При достижении пределов упругости остаточная деформация не наблюдается. Сигнал АЭ на этом участке обнаружен при усилии 1630 кг и относительной деформации 0,3 %. В то же время для разрывных испытаний граница силового поля упругой деформации наблюдается при нагрузке 1645 кг и деформации 0,9 %. Следовательно, фиксация зоны макроупругой деформации методами АЭ наступает раньше, чем это следует из разрывных испытаний.

На диаграмме нагружения рис.9 имеется горизонтальных участок, ограничивающий зону макроупругой деформации. На нем деформации растут без увеличения нагрузки. Этот участок табл. 1 соответствует усилию 1650 кг. Сигнал АЭ на этом же участке наблюдается при этой нагрузке при деформации 3,18 %. В то же время для разрывных испытаний граница силового поля при этой нагрузке наблюдается при деформации 3,79 %. Это значит, что фиксация деформационных переходов методами АЭ наступает раньше, чем это можно сделать из разрывных испытаний.

После площадки текучести с возрастанием нагрузки деформация начинает расти. Происходит самоупрочнение материала до достижения максимального значения напряжения на диаграмме рис. 9. Деформация становится равномерной. После этой точки деформация образца начинает концентрироваться в одном месте и образуется шейка, предшествующая разрыву. Сигнал АЭ на этом участке наблюдается при нагрузке 2170 кг и деформации 11,27 %, в то время как разрывные испытания фиксируют наступление границы силового поля при этой же нагрузке для деформации 13,28 %. Этот факт свидетельствует о том, что возникновение сигнала АЭ при деформационных изменениях структуры происходит раньше, чем это следует из разрывных испытаний.

Нисходящий участок диаграммы напряжения носит условный характер, поскольку площадь поперечного сечения образца непрерывно уменьшается после образования шейки. Разрушение образца произошло при напряжении  $P_{\text{max}} = 375$  МПа. Это соответствует предельному напряжению для данной марки стали.

Дискретность разрушения подтверждается данными АЭ, полученными при различных степенях деформации: макроупругой деформации, текучести и деформационного упрочнения. Эксперимент показал, что фиксация предвестников возникновения изменения структуры с помощью АЭ измерений происходит значительно раньше, чем это обнаруживается механическими измерениями.

На рис.10 приведены характерные сигналы АЭ. В начале нагружения амплитуды сигналов были незначительны, однако с течением времени сигналы, сопровождающие процесс разрушения, нарастают и приобретают характер высокоамплитудных импульсов с соответствующим хрупким механизмом его развития в докритической стадии.

При практической реализации метода АЭ наиболее информативными являются амплитуда, амплитудное распределение и амплитудно-временное распределения.

При изменении условий деформирования и переходе на новую стадию деформирования при нагрузке изменяется тип концентраторов напряжения, порождающих дефекты. В процессе нагружения уравнивающая картина структуры материала изменяется и соответственно должна изменяться длина волны и период колебаний АЭ. Это подтверждается результатами экспериментов по снятию зависимости акустических сигналов от двух датчиков при нагрузках с усилием 1650 кг и 2170 кг или напряжениях 270 МПа и 355 МПа (рис. 10), что соответствует отмеченным этапам зависимости относительного удлинения, вызванного изменением приложенной нагрузки.

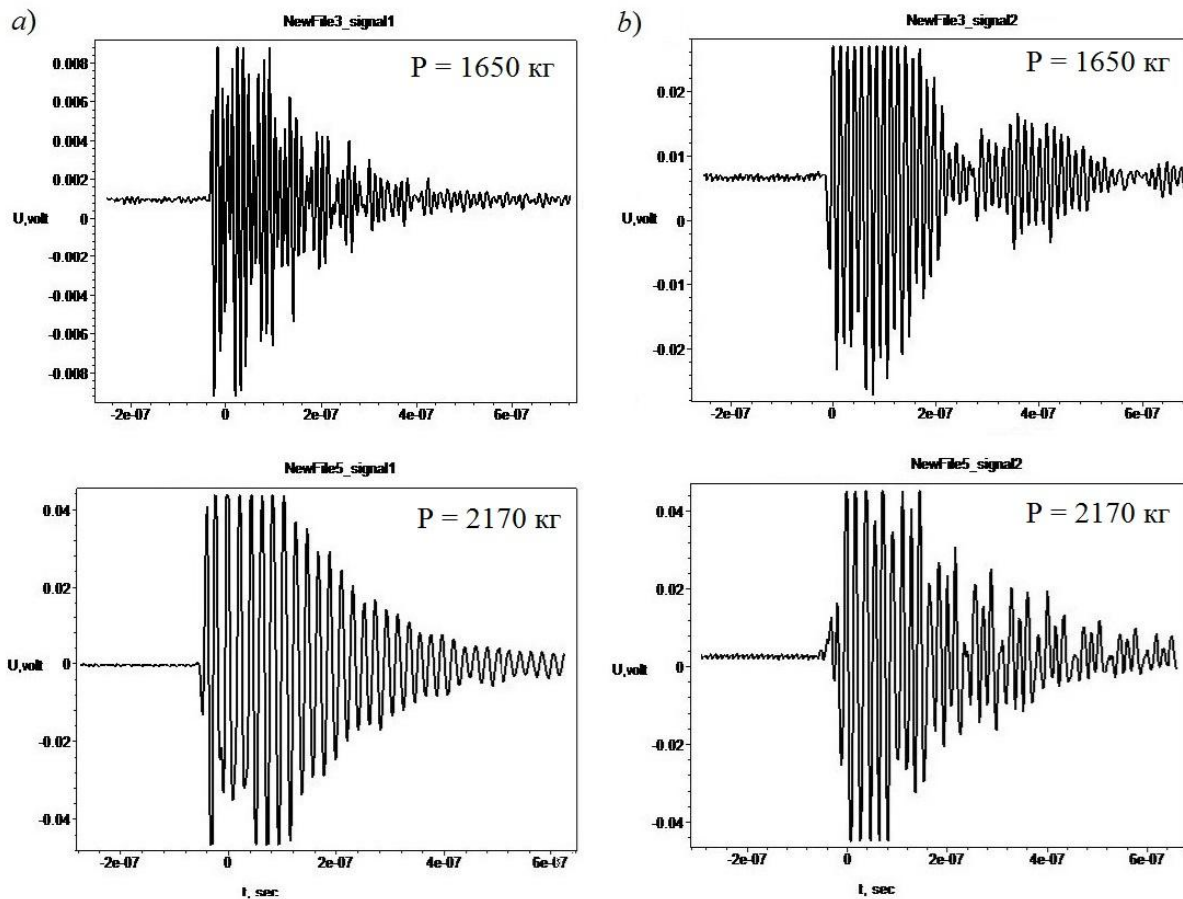


Рис. 10. – Сигналы АЭ от двух датчиков при разных нагрузках а) первый датчик б) второй.

Полученные сигналы характеризуются различным числом осцилляций, коррелирующих с изменениями в структуре материала, связанными с дискретным перемещением группы дислокаций.

Как следует из рассмотрения рис.10 плотность АЭ сигналов при возрастании нагрузки уменьшается. Экспериментально установлено [3,10], что чем реже акустический импульс, тем ниже частота АЭ сигнала. Следовательно, ответственной за изменение степени деформации стали СтЗсп при одноосном растяжении является низкочастотная часть акустического спектра. Объяснение этому явлению может быть выполнено с привлечением математических моделей трещинообразования, описанных в [7].

Поскольку квадрат амплитуды АЭ сигнала пропорционален его мощности, то с возрастанием его нагрузки и увеличением степени относительной деформации возрастает мощность АЭ сигнала, что на графиках рис.10 отмечено увеличением масштаба по оси ординат.

Результаты эксперимента позволяют вычислить энергию разрыва одной ячейки:

$$W = \frac{P_{\max}}{N},$$

где  $P_{\max} = 2260$  кг – наблюдаемое в эксперименте максимальное усиление при разрыве.

$N$  – общее количество ячеек в разрывном сечении образца.

Величина  $N$  определялась по формуле:

$$N = \frac{S}{a^2},$$

где  $S$  – площадь сечения в зоне разрыва  
 $a$  – расстояние между атомами в решетке.

Согласно [12] величина  $a = 2,5 \cdot 10^{-10}$  м. Площадь сечения в зоне разрыва с учетом конфигурации разрушения, представленной на рис.1, равна  $60 \text{ мм}^2$ . Тогда  $N = 9,6 \cdot 10^{14}$  и  $W = 2,35 \cdot 10^{-12}$  Дж. Это значение является количественным параметром чувствительности акустико-эмиссионной аппаратуры, предназначенной для фиксации начальной стадии разрушения материалов.



Возможным механизмом возникновения АЭ при изменениях структуры материала, вызванных деформацией, является отрыв дислокационных сегментов от точек закрепления. Акустическая эмиссия не является процессом, связанным с единичным элементарным атомом, а является коллективным процессом, в котором участвуют не менее  $10^3$  дислокаций.

Схема нагружения, в которой задается закон нагружения и фиксируются деформации как функция параметров силового воздействия, позволяет приблизить эксперимент к реальным условиям эксплуатации конструкций в широком интервале нагрузок [1,11].

Анализ моментов возникновения сигналов АЭ обнаруживает, что фиксация предвестников возникновения изменений структуры с помощью АЭ измерений, происходит значительно раньше, чем это обнаруживается в результате одноосных испытаний на растяжение при построении диаграммы изменения степени деформации от приложенной нагрузки. Обнаружить это явление обычными средствами механических измерений, даже в современном исполнении вследствие большой погрешности измерений достигнуть невозможно. Эта, экспериментально обнаруженная положительная особенность метода АЭ, должна получить свое дальнейшее техническое применение в перспективе его развития.

**Выводы.** Разработана методика исследований и конструкция образцов, позволяющие исследовать связь параметров нагружения и деформации с моментами возникновения сигналов АЭ. Обнаружена корреляция моментов возникновения сигналов АЭ при одноосном нагружении образцов из стали СтЗсп с деформационными переходами материала в функции от приложенного напряжения. Дискретность разрушения подтверждается данными АЭ, полученными при различных степенях деформации: макроупругой деформации, текучести и деформационного упрочнения.

Установлено, что в области упругой деформации первичная локализация источника АЭ начинается при усилиях больших 1630 кг и относительной деформации 0,3 %. В то же время при испытаниях на растяжение граница силового поля упругой деформации наблюдается при нагрузке 1645 кг и степени относительной деформации 0,9 %. Фиксация деформационных переходов в области пластического течения методами АЭ позволяет обнаружить предвестники изменения структуры материалов на более ранних стадиях.

Обнаружено, что в области текучести последующий источник АЭ наблюдается при нагрузке 1650 кг и степени деформации больше 3,2%. Здесь деформации растут без увеличения нагрузки. В то же время граница силового поля для этого участка нагружения при фиксированной нагрузке по данным испытаний на растяжение наблюдается при деформации 3,8 %. Следовательно, АЭ на площадке текучести является более информативным параметром структурных превращений материалов.

При переходе от пластической деформации к деформационному упрочнению АЭ сигналы наблюдаются при нагрузке 2170 кг и деформации 11,3 %, в то время как испытания на одноосные растяжения фиксируют наступление границы силового поля при этой же нагрузке для деформации 13,3 %.

Эксперимент показал, что фиксация возникновения изменений структуры с помощью АЭ измерений происходит значительно раньше, чем это обнаруживается механическими измерениями. Это может быть использовано при прогнозировании структурных изменений материалов при внешних возмущающих воздействиях.

Анализ амплитудного распределения АЭ сигналов во времени позволяет проследить развитие физических процессов. Регистрация АЭ в процессе деформации позволяет глубже понять механизмы ответственные за накопления повреждений. Возникновения сигналов АЭ при нагружении может служить информационным параметром при диагностировании развивающихся дефектов.

### Литература

1. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашева Л.И., Кушнарера У.С., О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии // Техническая диагностика и неразрушающий контроль 2016 – №4 – С.9-13.
2. Carpinteri A. Structural damage diagnostic and lifetime assessment by acoustic emission monitoring / A. Carpinteri, G. Lacidogna, N. Pugno // Engineering Fracture Mechanics 2007 - №74 – P.273-289.
3. Болотин Ю.И. Акустическая эмиссия хрупких микроразрушений: монография / Ю.И. Болотин, Ю.Б. Дробот – Хабаровск 2003 – 154 с.

4. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Бадищук В.І. Дослідження впливу ультрафіолетового випромінювання та магнітної природи наповнювачів на властивості епоксинаповнених матеріалів // Вопросы химии и химической технологии. - 2004. -№3. -С.101-104.
5. Стухляк П.Д., Іванченко О.В., Букетов А.В., Долгов М.А. Теорія інформації (інформаційно-вимірвальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник. – Херсон: Айлант, 2011. – 371 с.
6. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Долгов М.А., Голотенко С.М. Модифіковані енергетичними полями епоксикомпозитні матеріали для захисних покриттів різного функціонального призначення // Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. - Тернопіль:ТДТУ, 13-14 травня.- 2009.- С.179.
7. Marasnov V., Sharko A. Mathematical Models of Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals // International Fronter Science Letters. Switzerland – 2016 – V.10 – P.37-44.
8. Шарко А.А. Информационные параметры сигналов акустической эмиссии при диагностировании развивающихся дефектов / А.А. Шарко // Матеріали Міжнародній наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCS 2017) – Херсон ХНТУ 2017– С.166-167.
9. Букетов А.В., Нигалатий В.Д., Рожков С.А., Шарко А.В. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ 2015 – Вип. 48 – С.220-224.
10. Pollok A. Acoustic Emission Inspection / Metals Handbook. Ninth Edition ASM International – 1989 – Vol.17 – P.278-294.
11. Оглезнева Л.А. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II / Л.А. Оглезнева, А.Н. Калиниченко – Томск. Изд-во Томского политехнического университета 2009 – 292с.
12. Башков О.В. Анализ эволюции дефектной структуры поликристаллических материалов на различных стадиях нагружения методом акустической эмиссии. /Автореф. дис. канд. техн. наук - Комсомольск на Амуре, 2012. - 20 с.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2017

УДК 667.64:678.026

М.Ю. Амелін, О.О. Сапронов, О.В. Ходаковський, Н.М. Букетова

*Херсонська державна морська академія***ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТУ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИТАМИ З  
МІКРОДИСПЕРСНИМИ ЧАСТКАМИ, ЩО Є ВІДХОДАМИ ВИРОБНИЦТВА**

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

*Для формування композитних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, твердник поліетиленполіамін ПЕПА і дисперсні частки. Досліджено залежність вмісту порошків Agocel S-2000, Waltrap і залізої окалини на адгезійні, фізико-механічні властивості та теплостійкість епоксидних композитів. Доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними когезійними властивостями оптимальний вміст часток залежно від їх фізичної природи становить 10...30 або 60...80 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються підвищеною механічною міцністю і здатністю чинити опір статичним, динамічним, а також навантаженням ударного характеру, 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, А.А. Сапронов, А.В. Ходаковский, Н.Н. Букетова

*Херсонская государственная морская академия***ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТА ПОЛИМЕРНЫМИ  
КОМПОЗИТАМИ С МИКРОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ, КОТОРЫЕ ЯВЛЯЮТСЯ  
ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА**

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

*Для формирования композитных материалов использован эпоксидный диановый олигомер ЭД-20, отвердитель полиетиленполиамин ПЕПА и дисперсные частицы. Исследована зависимость содержания порошков Agocel S-2000, Waltrap и железной окалины на адгезионные, физико-механические свойства и теплостойкость эпоксидных композитов. Доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными когезийными свойствами оптимальное содержание частиц в зависимости от их физической природы составляет 10...30 или 60...80 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Такие материалы характеризуются повышенной механической прочностью и способностью сопротивляться статическим, динамическим, а также нагрузкам ударного характера, 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, A.A. Sapronov, A.V. Khodakovskii, N.M. Buketova

*Kherson State Maritime Academy***RESTORATION OF TRANSPORT PARTS WITH POLYMERIC COMPOSITES WITH  
MICRODISPERSED PARTICLES, WHICH ARE PRODUCTION WASTES**

*The expediency of restoring the details of transport by polymer composites is justified in the work. It is shown that the introduction of microdispersed particles into the polymer, which are production wastes, allows to significantly increase the performance characteristics of composite materials and protective coatings based on them.*

*To form composite materials, an epoxy diane oligomer ED-20, a hardener polyethylene polyamine PEPA and dispersed particles were used. The dependence of the Agocel S-2000, Waltrap and iron scale on the adhesion, physicomechanical properties and heat resistance 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 optimum content of particles, depending on their physical nature, is 10 ... 30 or 60 ... 80 parts by weight, by 100 parts by mass. epoxy oligomer ED-20. Such materials are characterized by increased mechanical strength and the ability to resist static, dynamic, and impact loads, since the performance of their properties is significantly increased compared to 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.** Останнім часом для підвищення економічної незалежності провідних країн світу важливим є застосування новітніх технологій при імпорті та експорті

© М.Ю. Амелін, О.О. Сапронов, О.В. Ходаковський, Н.М. Букетова

виробленої продукції. У цьому контексті провідним з економічної точки зору є використання не лише нових технологій, але й застосування композитних матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Актуальним на сьогодні є розвиток транспортних технологій, що передбачає застосування екологічно чистих матеріалів невисокої вартості з поліпшеними властивостями. У даному контексті виникає необхідність використання полімерних композитів у вигляді захисних покриттів для відновлення і ремонту засобів транспорту. Показано [1, 2], що такі покриття відзначаються довговічністю, зносостійкістю і поліпшеними антикорозійними властивостями.

Виходячи з наведеного вище, необхідно констатувати про доцільність розробки нових полімерних композитних матеріалів (КМ), які б у комплексі відзначалися поліпшеними адгезійними, фізико-механічними і теплофізичними властивостями. Цього досягають введенням дисперсних наповнювачів різної природи. При цьому використання часток, що є відходами промислового виробництва, для досягнення високих показників експлуатаційних характеристик КМ є актуальним як з точки зору економічних витрат на формування композитів, так і з боку підвищення надійності експлуатації та зменшення об'єму ремонтних робіт устаткування. Такий підхід, на наш погляд, дозволить отримати захисні покриття, які доцільно і необхідно використовувати при відновленні деталей машин та механізмів засобів транспорту, особливо річкового і морського.

**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, О.М.Сизоненко, Г.М.Бартенева, Г.А.Баглюка та ін. [1-6]. Зазначеними вище науковцями показані технологічні режими формування композицій, прийоми їх нанесення на засоби транспорту у природних умовах, а також проведено аналіз основних напрямків підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів. Водночас авторами [3, 4] стверджується, що важливим при збільшенні надійності роботи деталей транспорту з полімерними покриттями є міцність зчеплення адгезиву до основи та когезійні властивості покриття. Доведено, що останні можна поліпшити введенням дисперсного наповнювача, активного до взаємодії з полімером. Виходячи з цього, актуальним є введення у полімерний зв'язувач активних дисперсних часток, що є відходами промислового виробництва. Це дозволить отримати матеріали з поліпшеними когезійними властивостями.

**Мета роботи** – дослідити вплив вмісту дисперсного 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.

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:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-]_n$ . Зшивали КМ, вводячи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як мікродисперсні наповнювачі для експериментальних досліджень використано частки порошків Agocel S-2000 (АС) і Waltrap (ВТ). Це порошки відповідно білого і жовтого кольору виробництва Німеччини. Використовують у вигляді наповнювачів для композитних матеріалів будівельного призначення. Розмір часток становить 8...12 мкм. Характеристики наповнювачів наведено у табл. 1.

Додатково як наповнювач було використано частки залізної окалини (ЗО), що 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. Залізна окалина є відходом виробництва металу на металургійних підприємствах. Зернистість часток становить  $d = 60...63$  мкм.

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

витримування 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, витримування 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.

Таблиця 1

## Характеристики наповнювачів

Характеристики	Agocel S-2000	Waltrop
Форма	Круглі частки порошку	Круглі частки порошку
Колір	Білий	Жовтий
Запах	Немає	Немає
Температура розкладу, °С	140	220
Густина сипучості, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	660	520
Розчинність у воді при 20 °С, г/л	5	12
Значення рН при 20 °С	5...7	6...8
В'язкість динамічна при 20 °С, $\eta$ , мПа·с	1500	1850

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

Адгезійну міцність КМ до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 – 69 на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження  $v = 10$  м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив –  $d = 25$  мм.

Залишкові напруження у КМ визначали консольним методом [4]. Покриття товщиною  $\delta = 0,3...0,8$  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.

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ 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).

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

**Результати досліджень та їх обговорення.** Попередньо експериментально досліджено властивості модифікованої ультразвуковою обробкою вихідної епоксидної матриці. Доведено (рис. 1, рис. 2), що показники її адгезійної міцності і залишкових напружень становлять відповідно  $\sigma_a = 24,8$  МПа та  $\sigma_z = 1,4$  МПа. Доведено (рис. 1), що введення у епоксидний зв'язувач мікродисперсних добавок приводить до підвищення показників адгезійних властивостей КМ. Слід зазначити, що у епоксидний зв'язувач вводили наповнювачі різної зернистості: АС і ВТ з розміром часток –  $d = 10...12$  мкм, а також ЗО із зернистістю  $d = 60...63$  мкм. Причому частки АС і ВТ вводили за максимального вмісту  $q = 50$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом вміст наповнювача вказується у мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20), що зумовлено технологічними аспектами формування композицій. Останні полягають у тому, що введення даних часток за вмісту понад  $q = 50$  мас.ч. зумовлює формування пористих композитів. А це значно погіршує когезійні властивості матеріалів. Виходячи з цього, вважали за недоцільне у подальшому формування і дослідження властивостей таких КМ. Крім того, виходячи з мети роботи і об'єктів впровадження частки ЗО вводили у КМ за максимального вмісту  $q = 80$  мас.ч.

Встановлено, що введення дрібнодисперсних ( $d = 10...12$  мкм) часток АС і ВТ забезпечує монотонне підвищення адгезійної міцності КМ. Максимум показників адгезійної міцності КМ спостерігали при введенні часток АС за вмісту  $q = 30$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. При введенні часток АС за такого вмісту адгезійна міцність КМ збільшується від  $\sigma_a = 24,8$  МПа (для полімерної матриці) до  $\sigma_a = 36,8$  МПа. Надалі збільшення вмісту часток призводить до зменшення адгезійної міцності КМ до  $\sigma_a = 32,6$  МПа.

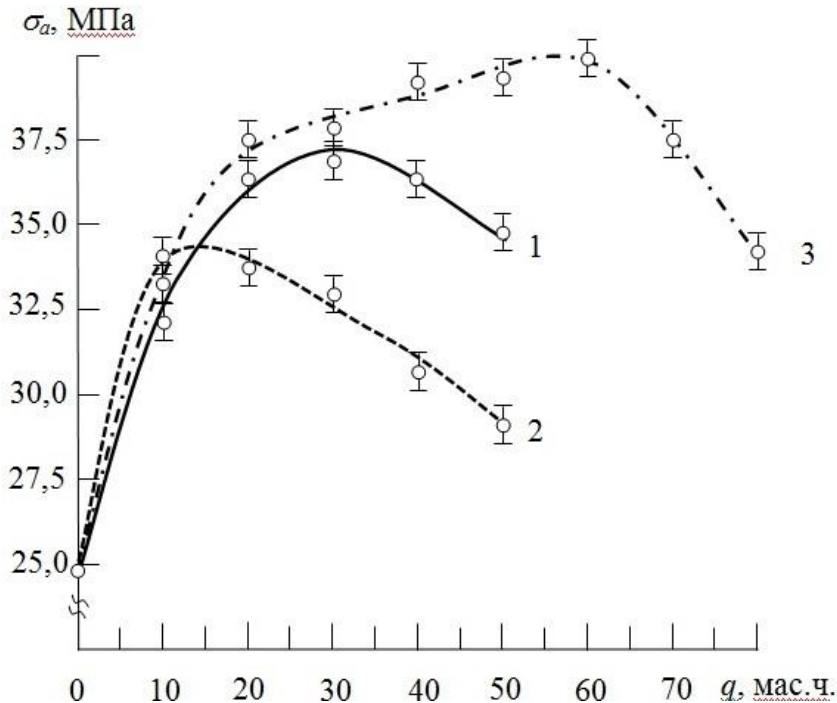


Рис. 1. Залежність адгезійної міцності ( $\sigma_a$ ) КМ від вмісту дисперсного наповнювача,  $q$ , мас.ч.: 1 – АС ( $d = 10...12$  мкм); 2 – ВТ ( $d = 10...12$  мкм); 3 – ЗО ( $d = 60...63$  мкм). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Аналогічно, максимальні показники ( $\sigma_a = 34,2$  МПа) на кривій залежності адгезійної міцності від вмісту дисперсних часток (рис. 1) спостерігали для КМ з наповнювачем ВТ, що містить  $q = 10$  мас.ч. добавки. Введення часток за вмісту  $q = 20...50$  мас.ч. призводить до монотонного зменшення адгезійної міцності до  $\sigma_a = 30,0$  МПа.

Отже доведено, що наповнювачі АС і ВТ є активними до фізико-хімічної взаємодії з епоксидним зв'язувачем. При цьому, критичний вміст кожного із них є різним, що свідчить про різну динаміку перебігу процесів зшивання при структуроутворенні даних матеріалів. Максимальні показники адгезійної міцності досліджуваних КМ за критичного вмісту часток наповнювачів практично не відрізняються:  $\sigma_a = 36,8$  МПа (для КМ з частками АС за вмісту  $q = 30$  мас.ч.) і  $\sigma_a = 34,2$  МПа (для КМ з частками ВТ за вмісту  $q = 10$  мас.ч.).

Децю іншу динаміку властивостей від вмісту наповнювача спостерігали для КМ із частками ЗО, розмір яких становить  $d = 60...63$  мкм. Порівняно з іншими досліджуваними добавками також спостерігали монотонне підвищення показників адгезійної міцності КМ залежно від вмісту залізної окалини, хоча максимум виявлено для КМ, наповненого частками у кількості  $q = 60$  мас.ч. Формування такого композиту забезпечує збільшення адгезійної міцності матеріалу від  $\sigma_a = 24,8$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_a = 39,8$  МПа. Надалі, збільшення вмісту ЗО призводить до погіршення адгезійних властивостей КМ, що, на наш погляд, зумовлено недостатнім змочуванням дисперсних 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.

Цікавими з наукової і практичної точки зору є результати дослідження залишкових напружень у КМ, наповнених частками різної природи і зернистості. Відомо [1, 2], що залишкові напруження є одним з визначальних факторів довговічності захисних покриттів, які експлуатують у критичних умовах динаміки навантажень та за впливу агресивних середовищ. Даний показник

особливо є актуальним при оцінюванні ресурсу експлуатації засобів транспорту з нанесеними покриттями.

Встановлено (рис. 2), що введення часток призводить до збільшення залишкових напружень у покриттях. У першу чергу це зумовлено тим, що при введенні у зв'язувач добавки навколо активних часток формуються зовнішні поверхневі шари, які відзначаються поліпшеними когезійними властивостями. Це забезпечує збільшення залишкових напружень на одиницю об'єму КМ, що зумовлено формуванням термодинамічно і кінетично неврівноважених систем. Слід зазначити, що незначні показники залишкових напружень можуть свідчити про невисоку когезійну міцність матеріалів, або, навпаки, про пластифікуючу дію наповнювача. Останнє передбачає формування надмолекулярних мікро-, мезо- і макроутворень, які забезпечують синергетику властивостей КМ під дією критичних навантажень.

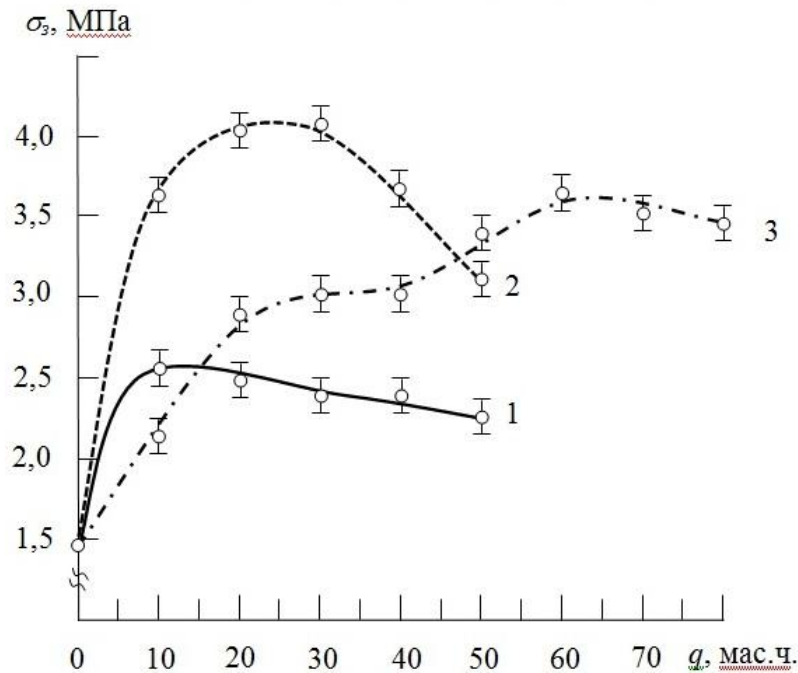


Рис. 2. Залежність залишкових напружень ( $\sigma_3$ ) у КМ від вмісту дисперсного наповнювача,  $q$ , мас.ч.: 1 – АС ( $d = 10...12$  мкм); 2 – ВТ ( $d = 10...12$  мкм); 3 – ЗО ( $d = 60...63$  мкм). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

Показано (рис. 2), що найвищими залишковими напруженнями серед усього діапазону досліджуваних матеріалів відзначаються КМ з частками ВТ. При цьому максимум ( $\sigma_3 = 3,6...4,0$  МПа) на кривій залежності « $\sigma_3 - q$ » спостерігали за вмісту добавки у кількості  $q = 10...30$  мас.ч. Отримані дані добре узгоджуються з результатами дослідження адгезійної міцності наповнених таким частками КМ, де спостерігали найвищі показники міцності прилипання адгезивів з наповнювачем ВТ за критичного вмісту до сталюї основи.

Навпаки, мінімальними показниками залишкових напружень на кривій залежності « $\sigma_3 - q$ » спостерігали для КМ з частками АС. Введення такого порошку (незалежно від кількості) призводить до несуттєвого підвищення залишкових напружень – від  $\sigma_3 = 1,4$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_3 = 2,2...2,5$  МПа (для усього діапазону досліджуваних КМ з даною добавкою).

Зазначимо, що максимальними ( $\sigma_3 = 3,6$  МПа) залишковими напруженнями (серед усього діапазону досліджуваного вмісту часток) характеризуються КМ, наповнені залізною окалиною при  $q = 60$  мас.ч. При цьому такий КМ, відзначається максимальними показниками адгезійної міцності серед усіх досліджуваних композитів, хоча порівняно з іншими матеріалами залишкові напруження не є найвищими. Це свідчить про доцільність використання даного наповнювача при формуванні багатокомпонентних матеріалів різного функціонального призначення.

Отже, встановлено оптимальний вміст кожного з досліджуваних наповнювачів для формування захисного покриття з максимальними адгезійними характеристиками. Доведено, що при формуванні адгезійного шару захисних покриттів для деталей транспорту можна використовувати наповнювачі різної фізичної природи. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності у 1,4...1,6 разів, а залишкових напружень у 1,7...2,6 разів, що дозволить:

- при введенні часток АС ( $d = 10...12$  мкм) у кількості  $q = 30$  мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 36,8$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 2,4$  МПа;



- при введенні часток ВТ ( $d = 10 \dots 12$  мкм) у кількості  $q = 10$  мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 34,2$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 3,6$  МПа;

- при введенні часток ЗО ( $d = 60 \dots 63$  мкм) у кількості  $q = 60$  мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 39,8$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 3,6$  МПа.

На наступному етапі досліджували фізико-механічні властивості і теплостійкість КМ з різними за природою та зернистістю наповнювачами. Експериментально встановлено, що властивості модифікованої ультразвуком епоксидної матриці при наведених вище режимах формування є наступними: модуль пружності при згинанні –  $E = 2,8$  ГПа, руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 48,0$  МПа, ударна в'язкість –  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>, теплостійкість (за Мартенсом) –  $T = 341$  К.

Доведено (рис. 3, табл. 1), що максимальними показниками фізико-механічних властивостей і теплостійкості серед КМ, наповнених частками із зернистістю  $d = 10 \dots 12$  мкм, відрізняються наступні матеріали:

- КМ, наповнений частками АС за вмісту  $q = 30$  мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 38,2$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 4,3$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 7,7$  кДж/м<sup>2</sup>, теплостійкість (за Мартенсом) –  $T = 361$  К;

- КМ, наповнений частками ВТ за вмісту  $q = 10$  мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 45,2$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 4,0$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 7,9$  кДж/м<sup>2</sup>, теплостійкість (за Мартенсом) –  $T = 366$  К.

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 наповнювачів на процеси зшивання полімеркомполітів, що пришвидшує їх гелеутворення, внаслідок чого збільшуються показники не лише адгезійної, але й когезійної міцності розроблених матеріалів.

Окремо слід зазначити про вплив наповнювача залізної окалини на властивості епоксикомполітів. Встановлено (рис. 3, табл. 1), що введення ЗО дозволяє максимально (порівняно з іншими досліджуваними матеріалами) підвищити показники фізико-механічних властивостей КМ стосовно епоксидної матриці. Зокрема, встановлено, що введення часток ЗО за вмісту  $q = 60 \dots 80$  мас.ч. забезпечує, порівняно з полімерною матрицею, підвищення показників фізико-механічних характеристик і теплостійкості у 1,2...1,9 разів. При цьому, отримали поліпшення наступних показників:

- руйнівних напружень при згинанні: від  $\sigma_{3z} = 48,0$  МПа до  $\sigma_{3z} = 54,6 \dots 56,5$  МПа;

- модуля пружності при згинанні: від  $E = 2,8$  ГПа до  $E = 4,4 \dots 5,3$  ГПа;

- ударної в'язкості: від  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $W = 8,0 \dots 8,2$  кДж/м<sup>2</sup>;

- теплостійкості (за Мартенсом): від  $T = 341$  К до  $T = 364 \dots 366$  К.

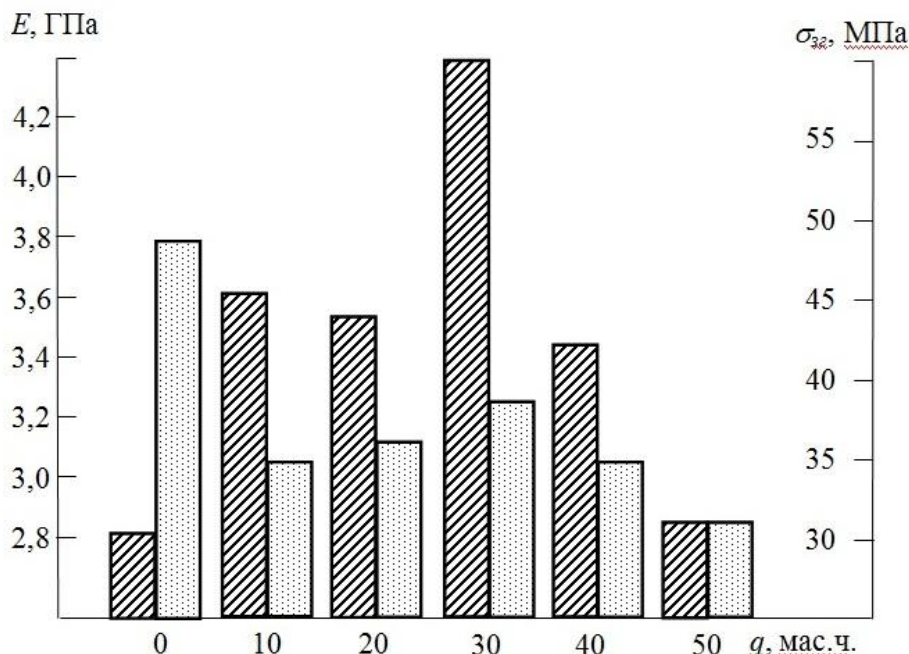


Рис. 3, а. Залежність модуля пружності ( $E$ ) і руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{3z}$ ) КМ від вмісту мікродисперсних часток АС ( $d = 10 \dots 12$  мкм):

1 – матриця; 2 –  $q = 10$  мас.ч.; 3 –  $q = 20$  мас.ч.; 4 –  $q = 30$  мас.ч.; 5 –  $q = 40$  мас.ч.;

6 –  $q = 50$  мас.ч.

▨ – модуль пружності ( $E$ );

▤ – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{3z}$ ).



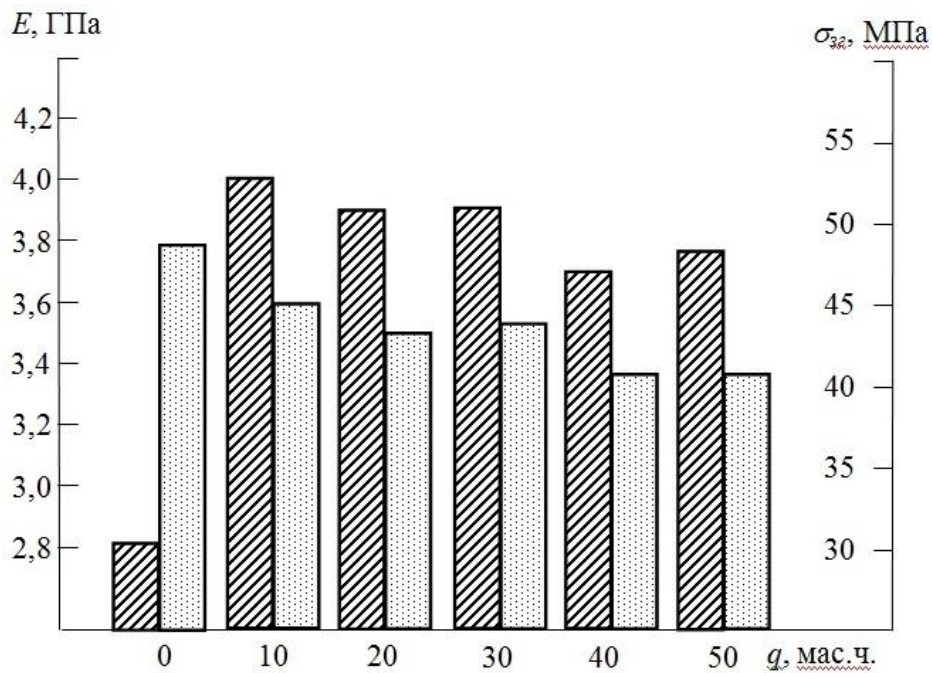


Рис. 3, б. Залежність модуля пружності ( $E$ ) і руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) КМ від вмісту мікродисперсних часток ВТ ( $d = 10...12$  мкм):

1 – матриця; 2 –  $q = 10$  мас.ч.; 3 –  $q = 20$  мас.ч.; 4 –  $q = 30$  мас.ч.; 5 –  $q = 40$  мас.ч.; 6 –  $q = 50$  мас.ч.

▨ – модуль пружності ( $E$ );  
 ▩ – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ).

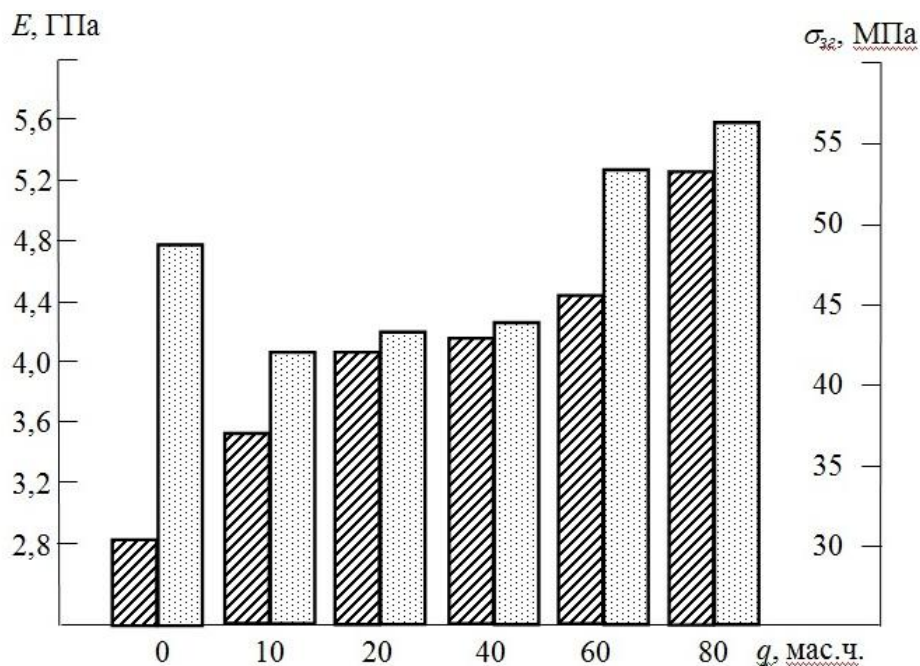


Рис. 3, в. Залежність модуля пружності ( $E$ ) і руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32}$ ) КМ від вмісту мікродисперсних часток ЗО ( $d = 60...63$  мкм):

1 – матриця; 2 –  $q = 10$  мас.ч.; 3 –  $q = 20$  мас.ч.; 4 –  $q = 40$  мас.ч.; 5 –  $q = 60$  мас.ч.; 6 –  $q = 80$  мас.ч.

▨ – модуль пружності ( $E$ );  
 ▩ – руйнівні напруження при згинанні ( $\sigma_{32}$ ).

Таблиця 1

**Залежність ударної в'язкості і теплостійкості (за Мартенсом) КМ від вмісту і природи мікродисперсного наповнювача**

КМ, наповнений частками АС ( $d = 10...12$ мкм)		
Вміст наповнювача, $q$ , мас.ч.	Ударна в'язкість, $W$ , кДж/м <sup>2</sup>	Теплостійкість, $T$ , К
0	7,4	341
10	7,5	358
20	7,5	358
30	7,7	361
40	7,6	356
50	7,6	355
КМ, наповнений частками ВТ ( $d = 10...12$ мкм)		
10	7,9	366
20	7,9	362
30	7,8	360
40	7,6	357
50	7,5	354
КМ, наповнений частками ЗО ( $d = 60...63$ мкм)		
10	7,4	355
20	7,5	357
40	7,8	362
60	8,2	366
80	7,7	364

**Висновки.** У роботі встановлено оптимальний вміст кожного з досліджуваних наповнювачів для формування захисного покриття з максимальними адгезійними і когезійними характеристиками з метою підвищення надійності експлуатації засобів транспорту.

1. Доведено, що при формуванні адгезійного шару захисних покриттів для деталей транспорту можна використовувати наповнювачі різної фізичної природи. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності у 1,4...1,6 разів, а залишкових напружень у 1,7...2,6 разів, що дозволить:

- при введенні часток АС ( $d = 10...12$  мкм) у кількості  $q = 30$  мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 36,8$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 2,4$  МПа;

- при введенні часток ВТ ( $d = 10...12$  мкм) у кількості  $q = 10$  мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 34,2$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 3,6$  МПа;

- при введенні часток ЗО ( $d = 60...63$  мкм) у кількості  $q = 60$  мас.ч. отримати матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві –  $\sigma_a = 39,8$  МПа; залишкові напруження –  $\sigma_3 = 3,6$  МПа.

2. Показано, що максимальними показниками фізико-механічних властивостей і теплостійкості серед композитів, наповнених частками із зернистістю  $d = 10...12$  мкм, відрізняються наступні матеріали:

- КМ, наповнений частками АС за вмісту  $q = 30$  мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 38,2$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 4,3$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 7,7$  кДж/м<sup>2</sup>, теплостійкість (за Мартенсом) –  $T = 361$  К;

- КМ, наповнений частками ВТ за вмісту  $q = 10$  мас.ч., що має характеристики: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{3z} = 45,2$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 4,0$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 7,9$  кДж/м<sup>2</sup>, теплостійкість (за Мартенсом) –  $T = 366$  К.

3. Встановлено, що введення у епоксидний зв'язувач залізної окалини дозволяє максимально (порівняно з іншими досліджуваними матеріалами) підвищити показники фізико-механічних властивостей матеріалів стосовно епоксидної матриці. Зокрема, встановлено, що введення дисперсних часток окалини за вмісту  $q = 60...80$  мас.ч. забезпечує, порівняно з полімерною

матрицею, підвищення показників фізико-механічних характеристик і теплостійкості композитів у 1,2...1,9 разів. При цьому, отримали порівняно з матрицею поліпшення наступних показників:

- руйнівних напружень при згинанні: від  $\sigma_{3\sigma} = 48,0$  МПа до  $\sigma_{3\sigma} = 54,6...56,5$  МПа;
- модуля пружності при згинанні: від  $E = 2,8$  ГПа до  $E = 4,4...5,3$  ГПа;
- ударної в'язкості: від  $W = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup> до  $W = 8,0...8,2$  кДж/м<sup>2</sup>;
- теплостійкості (за Мартенсом): від  $T = 341$  К до  $T = 364...366$  К.

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, можна констатувати, що введення досліджуваних наповнювачів у комплексі (за умови різної зернистості) дозволить отримати додаткове поліпшення властивостей композитних матеріалів з метою забезпечення надійності засобів транспорту внаслідок синергетичного ефекту. Такі дослідження авторами будуть проведені у майбутньому.

### 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. Букетов А.В. Епоксидні нанокompозити: монографія / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, В.Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.

5. Букетов А.В. Епоксидні композити, модифіковані височастотним імпульсним магнітним полем : монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В.О.Скирденко, В. Л. Алексенко, О.І. Скирденко. – Херсон : ХДМА, 2016. – 201 с.

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 «ХП». – 2016. - № 50 (1222). – С.42-46.

Стаття надійшла до редакції 03.12.2017

УДК 004.05(075.8)

**І.Є. Андрущак, Ю.Я. Матвійв***Луцький національний технічний університет***ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИЙОМИ СТРУКТУРНОГО ПІДХОДУ ДО ПРОГРАМУВАННЯ І ЙОГО ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ**

*В роботі проведено огляд та розглянуті основні етапи розвитку технологій програмування та проблеми, що виникають при розробці складних програмних систем, аналізуються підходи та послідовність розробки програмного забезпечення. Виділено ключові площини прийому структурного підходу до програмування і його основних концепцій: низхідній розробці, структурному і модульному програмуванню, а також наскрізного структурного контролю.*

*Ключові слова: програмування, структурне і модульне програмування.*

**И.Е. Андрущак, Ю.Я. Матвеев***Луцкий национальный технический университет***ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СТРУКТУРНОГО ПОДХОДА К ПРОГРАММИРОВАНИЮ И ЕГО ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ**

*В работе проведен обзор и рассмотрены основные этапы развития технологий программирования и проблемы, возникающие при разработке сложных программных систем, анализируются подходы и последовательность разработки программного обеспечения. Выделены ключевые плоскости приема структурного подхода к программированию и его основных концепций: нисходящей разработке, структурном и модульному программированию, а также сквозного структурного контроля.*

*Ключевые слова: программирование, структурное и модульное программирование.*

**I.Ye. Andruschak, Yu.Ya. Matviiv***Lutsk National Technical University***TECHNOLOGICAL ADJUSTMENTS OF THE STRUCTURAL APPROACH TO PROGRAMMING AND HIS MAIN CONCEPTS**

*The paper reviews and discusses the main stages of the development of programming technologies and problems arising in the development of complex software systems, analyzes the approaches and sequence of software development. The key areas for the adoption of a structured approach to programming and its main concepts are identified: descending development, structural and modular programming, as well as through structural control.*

*Keywords: programming, structural and modular programming.*

**Formulation of the problem.** Most modern software systems are objectively very complex. This complexity is caused by many reasons, the main of which is the logical complexity of the tasks they solve.

While the computing facilities were small and their capabilities were limited, computers were used in very narrow areas of science and technology, and, first of all, where the tasks to be solved were well-defined and required significant calculations. Nowadays, when powerful computer networks are created, it became possible to shift to them the solution of complex resource-intensive tasks, which nobody previously thought of computerizing. Now in the process of computerization completely new subject areas are involved, and for already mastered areas already established statements of tasks become more complicated.

Additional factors that increase the complexity of developing software systems are:

- the complexity of formal definition of requirements for software systems;
- the lack of satisfactory means of describing the behavior of discrete systems with a large number of states under a nondeterministic sequence of input actions;
- collective development;
- the need to increase the frequency of codes.

**Setting up tasks.** The complexity of determining the requirements for software systems is determined by two factors. First, when determining the requirements, it is necessary to take into account a large number of different factors. Secondly, the developers of software systems are not specialists in automated subject areas, and experts in the subject area, as a rule, can not formulate the problem in the proper foreshortening.

Absence of satisfactory means of formal description of the behavior of discrete systems. In the process of creating software systems, languages of relatively low level are used. This leads to early details of operations in the process of creating software and increases the volume of descriptions of the products

being developed, which, as a rule, exceeds hundreds of thousands of operators of the programming language. The means, which make it possible to describe in detail the behavior of complex discrete systems at a higher level than the universal programming language, do not exist.

**Analysis of recent researches and publications.** Due to the large volume of projects, software development is conducted by a team of specialists. Working in a team, individual professionals must interact with each other, ensuring the integrity of the project, which is difficult to achieve in the absence of satisfactory means of describing the behavior of complex systems mentioned above. Moreover, the larger the team of developers, the more difficult it is to organize the work process. The complexity of the software being developed is also affected by the fact that to increase productivity, companies are striving to create component libraries that could be used in further development. However, in this case, the components have to be made more universal, which ultimately increases the complexity of the development.

Taken together, these factors significantly increase the complexity of the development process. However, it is obvious that they are all directly related to the complexity of the development object - the software system.

**Basic material presentation.** Programming is a relatively young and rapidly developing branch of science and technology. The experience of conducting real developments and improving existing software and hardware is constantly being reinterpreted, resulting in new methods, methodologies and technologies that, in turn, serve as the basis for more modern software development tools. It is advisable to study the processes of creating new technologies and determine their main trends by comparing these technologies with the level of development of programming and the peculiarities of software and hardware available to programmers.

The technology of programming is called the set of methods and tools used in the software development process [1, 2]. Like any other technology, programming technology is a set of technological instructions, including:

- indication of the sequence of technological operations;
- enumeration of conditions under which this or that operation is performed;
- descriptions of the operations themselves, where for each operation, the initial data, results, as well as instructions, standards, criteria and methods of assessment, etc. were determined.

In addition to the set of operations and their sequence, the technology also determines the way of describing the projected system, more precisely the model used at a particular stage of development.

Distinguish the technologies used at specific stages of development or for the solution of individual tasks of these stages, and technologies that cover several stages or the entire development process. At the heart of the former, as a rule, lies a limitedly applicable method that allows solving a specific problem. The second is usually based on a basic method or approach that defines the set of methods used at different stages of development, or methodology.

When designing, implementing, and testing the components of the structural hierarchy obtained during the decomposition, two approaches are used:

- Ascending;
- downward.

In the literature, there is another approach, called the "expansion of the nucleus." He assumes that first of all they design and develop some basis - the core of the software, for example, the data structures and procedures associated with them. In the future, the nucleus is increased by combining the ascending and descending methods. In practice, this approach, depending on the level of the kernel, reduces to either a descending or an ascending approach.

**Ascending approach.** When using the bottom-up approach, first design and implement the components of the lower level, then the previous one, etc. As the testing and debugging of the components are completed, they are assembled, and the lower-level components are often placed in component libraries with this approach.

To test and debug components, special testing programs are designed and implemented. The approach has the following disadvantages:

- increase in the probability of inconsistency of components due to incompleteness of specifications;
- availability of costs for the design and implementation of testing programs that can not be converted into components;

- the later design of the interface, and accordingly the inability to demonstrate it to the customer to clarify the specifications, etc.

Historically, the ascending approach appeared earlier, which is due to the peculiarity of the thinking of programmers, who in the process of learning get used to writing small programs first to detail the components of the lower levels (subroutines, classes). This allows them to better understand the processes of the upper levels. With the industrial manufacture of software, the bottom-up approach is currently practically not used [3].

Top-down approach. A top-down approach assumes that the design and subsequent implementation of components is performed "top-down", i.e. first project components of the upper levels of the hierarchy, then the next and so on down to the lowest levels. In the same sequence, the components are also implemented. At the same time, during the programming process, the components of the lower, not yet implemented levels are replaced with specially designed debugging modules - "stubs", which allows testing and debugging the already implemented part.

When using the top-down approach, hierarchical, operational and combined methods of determining the sequence of design and implementation of components are used.

The hierarchical method assumes that the development is strictly level-based. Exceptions are allowed if there is a data dependency, i.e. if it is found that some module uses the results of the other, then it is recommended to program it after this module. The main problem of this method is a large number of rather complicated plugs. In addition, using this method, the bulk of the modules are developed and implemented at the end of the project, which makes it difficult to allocate human resources.

The operational method associates the execution sequence when the program is started. The application of the method is complicated by the fact that the order of execution of the modules can depend on the data. In addition, the output modules of the results, despite the fact that they are called up last, should be developed one of the first, so as not to design a complex stub that provides the output of the results during testing. From the point of view of the distribution of human resources, it is difficult to begin work until all the modules that are on the so-called critical path are completed.

The combined method takes into account the following factors that affect the development sequence:

- reachability of the module - availability of all modules in the chain of calls for this module;
- Data dependency - modules that form some data must be created before processing;
- ensuring the possibility of issuing results - output modules should be created before processing;
- availability of auxiliary modules - auxiliary modules, for example, file closing modules, program termination, must be created before processing;
- availability of necessary resources.

In addition, all other things being equal, complex modules must be developed before simple ones, as they may exhibit inaccuracies in the specifications, and the sooner this happens, the better.

A top-down approach allows for a disruption of the downstream sequence of component development in specially specified cases. So, if some component of the lower level is used by many components of higher levels, then it is recommended to design and develop earlier than the components causing it. And, finally, first of all, design and implement components that ensure the processing of the correct data, leaving the processing components of incorrect data for the end.

A top-down approach is usually used in object-oriented programming. In accordance with the recommendations of the approach, first design and implement the user interface of the software, then develop classes of some basic objects of the domain, and only then, using these objects, design and implement the remaining components [4].

In some cases, the coupling of modules can be reduced by removing unnecessary links and structuring the necessary connections. An example is object-oriented programming, in which instead of a large number of parameters, the method implicitly receives the address of the region (structure) in which the fields of the object are located, and explicitly additional parameters. As a result, the modules are linked by a pattern.

Connectivity is a measure of the strength of the connection between functional and information objects within a single module. If the coupling characterizes the quality of separation of modules, the connectivity characterizes the degree of interconnection of the elements realized by one module. The placement of strongly coupled elements in one module reduces the intermodule links and, accordingly, the mutual influence of the modules. At the same time, putting strongly interconnected elements in different modules not only enhances intermodule communications, but also complicates the

understanding of their interaction. The combination of loosely coupled elements also reduces the adaptability of modules, since such elements are more difficult to mentally manipulate.

With functional connectivity, all objects of the module are designed to perform one function: operations that are combined to perform one function, or data associated with a single function. A module whose elements are functionally connected has a clearly defined goal, when it is called, a single task is executed, for example, a subroutine for finding the minimum element of the array. Such a module has the maximum connectivity, the consequence of which are its good technological qualities: ease of testing, modification and maintenance. It is with this that one of the requirements of structural decomposition is "one module - one link between modules-resource libraries". For example, if you design an editing function for a text editor, it is better to organize a library of editing functions than to place part of the functions in one module and part of it in another.

With a sequential connection of functions, the output of one function serves as the initial data for another function. Typically, such a module has one entry point, i. E. implements one subroutine that performs two functions. It is believed that the data used by the sequential functions are also linked in series. A module with a serial connection of functions can be divided into two or more modules, both with sequential and with functional connectivity. Such a module performs several functions, and consequently its processability is worse: it is more difficult to organize testing, and when performing a modification, one mentally divides the functions of the module.

Information-related functions are considered that process the same data. When using structured programming languages, separate execution of functions can be performed only if each function is implemented by its subroutine.

Despite the combination of several functions, the information-related module has good performance indicators. This is because all functions that work with some data are gathered in one place, which allows you to adjust only one module when changing the data format. Information related is also considered data that is processed by one function.

Functionally linked functions or data that are part of a single process. Normally, modules with procedural connection of functions are obtained if functions of alternative parts of the program are combined in the module. With procedural coherence, the individual elements of the module are extremely weakly connected, since the actions they perform are related only to the general process, hence the manufacturability of this type of communication is lower than the previous one.

Temporary connectivity of functions implies that these functions are performed in parallel or for a certain period of time. Temporary data connectivity means that they are used in a certain time interval. For example, the temporary connectivity has the functions performed when initializing a certain process. A distinctive feature of the temporal connection is that the actions realized by such functions can usually be performed in any order. The content of a module with a temporary connectivity of functions tends to change: it can include new actions and / or exclude old ones. The high probability of modifying the function further reduces the performance of the modules of this type in comparison with the previous one.

A logical connection is based on the union of data or functions into one logical group. An example is text processing functions or data of the same type. A module with logical connectivity of functions often implements alternative versions of one operation, for example, addition of integers and addition of real numbers. From this module, one of its parts will always be called, while the calling and called modules will be linked by management. Understand the logic of the modules containing logically connected components, as a rule, more complicated than modules that use temporary connectivity, therefore, their performance indicators are even lower [5].

In the event that the link between the elements is small or absent, they consider that they have random connectivity. The module, whose elements are randomly connected, has the lowest performance indicators, since the elements combined in it are not connected at all.

In the three penultimate cases, the connection between several subroutines in the module is due to external causes, and in the latter, there is no connection at all. This is appropriately projected onto the technological characteristics of the modules

As a rule, with well-designed decomposition, the modules of the upper levels of the hierarchy have functional or consistent connectivity of functions and data. Data service modules are characterized by the informational connectivity of functions. The data of such modules can be related in different ways. So, the modules containing the description of classes under the object-oriented approach are characterized by the informational connection of methods and the functional connection of data. Obtaining in the process of decomposition of modules with other types of connectivity, most likely, means insufficiently thought-out design. The only exceptions are resource libraries [6].

There are two types of resource libraries: subroutine libraries and class libraries.

Libraries of subprograms implement functions that are similar in purpose, for example, a library of graphical information output. The connectivity of subprograms among themselves in such a library is logical, and the connectivity of the subroutines themselves is functional, since each of them usually implements one function [7].

Class libraries implement close-by-purpose classes. The connectivity of class elements is informational, the connectivity of classes among themselves can be functional - for related or associate classes and logical - for the rest.

As a means of improving the technological characteristics of resource libraries, the division of the module body into the interface part and the implementation area is now widely used [8].

The interface part in this case contains a set of resource declarations (subroutine headers, variable names, types, classes, etc.) that this library provides to other modules. Resources that are not advertised in the interface are not accessible from the outside. The implementation area contains the subprogram bodies and, possibly, the internal resources (subprograms, variables, types) used by these subroutines. With such an organization, any changes in the implementation of the library that do not affect its interface do not require revision of the modules associated with the library, which improves the technological characteristics of the library modules. In addition, such libraries, as a rule, are well-established and thought out, since they are often used by different programs.

**Conclusion.** Creating a software system is a very time-consuming task, especially in our time, when the amount of software code exceeds hundreds of thousands of operators. A future software development specialist should have an understanding of the methods for analyzing, designing, implementing and testing software systems, as well as focusing on existing approaches and technologies.

## References

1. Zhogolev E.A. Programming technology / E.A. Zhogolev. - M.: The scientific world, 2004. - 216 p.
2. Ivanova G.S. Programming technology: a textbook for universities / GS. Ivanova. - M.: Izd-vo MSTU them. N.E. Bauman, 2002. - 320 with.
3. Lippman S.B. Fundamentals of programming in C ++ / SB. Lippmann. - M.: Williams, 2002. - 256 p.
4. Shieldt G. C / C ++. Reference book of the programmer / G. Schildt. - M.: Williams, 2000. - 448 p.
5. Prata S. The programming language of C ++. Lectures and exercises / S. Prata. - M.: DiSoft, 2005. - 645 p.
6. Podbelsky V.V. C ++ language / V.V. Podbelsky. - M.: Finance and Statistics, 2003. - 562 p.
7. Strastrup B. The programming language of C ++. Special edition / B. Strastrup. - M.: Binom-Press, 2008. - 1104 p.
8. Davydov V.G. C ++ Programming Technologies / V.G. Davydov. - St. Petersburg. : BHV-Petersburg, 2005. - 672 p.



УДК: 620.179.16

**Я.С. Антоненко***Донбаська державна машинобудівна академія***НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ ЖОРСТКОСТІ СТАНИН ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ***Наведено експериментальні випробування станин важких токарних верстатів при прогині їх під власною вагою при вижимі двома середніми башмаками.**Ключові слова: жорсткість, станини важких верстатів, експериментальна станина токарного типу, супортна полиця, полиця задньої бабки, башмаки.***Я.С. Антоненко****НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕСТКОСТИ СТАНИН ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ***Приведены экспериментальные исследования станин тяжелых токарных станков при прогибе их под собственным весом при выжиме двумя средними башмаками.**Ключевые слова: жесткость, станины тяжелых станков, экспериментальная станина токарного типа, супортная полка, полка задней бабки, башмаки.***Y. Antonenko****NATURAL STUDIES OF HARDNESS OF HEAVY LATHES FRAMES***Experimental studies of the frames of heavy lathes are presented, while sagging stress under their own weight with the squeeze by two middle footplates.**Keywords: hardness, frames of heavy lathes, experimental frame of turning type, saddle shelf, tailstock shelf.*

**Постановка проблеми.** Підвищення точності важких токарних верстатів являє собою основну проблему сучасного машинобудування. Якість виробів залежить від точності виготовлення окремих деталей. Особливо треба виділити деталі типу нежорсткі вали, які по більшості працюють у важких умовах навантаження і навіть незначна неточність при їх виготовленні суттєво прискорює процес їх зношування та руйнування виробу. Силкові впливи в процесі різання призводять до відхилень як інструменту, так і заготовки від первинного положення, що призводить до деформацій геометричних характеристик поверхні деталей.

Основним методом підвищення точності виготовлення виробів на важких токарних верстатах є підвищення жорсткостних характеристик верстатних вузлів, підвищення точносних параметрів верстата, вірного встановлення опор верстата на несучій поверхні. В роботі проведено ряд досліджень несучих систем важких токарних верстатів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема дослідження точності виготовлення деталей була предметом багатьох досліджень, що розглядали масу моделей процесів та різні підходи до досягнення мети. Частіше за все вивчався вплив тієї чи іншої характеристики процесу різання на показники якості виготовлення деталей. Питаннями підвищення точності токарної обробки займалися Балакшин Б.С., Подпоркин В.Г., Плотников А.Л., Иванов В.В та ін. Однак, запропоновані засоби підвищення точності, не дивлячись на їх різноманіття, не в повному обсязі враховують вплив факторів, що призводять до пружного вижиму елементів технологічної системи та зростанню похибки обробки у радіальному напрямку.

**Постановка завдань.** Несуча система - найбільш специфічна система верстата, і її характеристики визначають взаємодію всіх його вузлів. Несуча система повинна забезпечувати і зберігати протягом терміну служби верстата можливість обробки з заданими режимами і необхідною точністю. Очевидно, що в загальному випадку розрахунковий критерій якості несучої системи повинен бути безпосередньо пов'язаний з вихідними показниками процесу обробки на верстаті і в першу чергу з точністю і продуктивністю.

Метою роботи є – забезпечення необхідної якості несучої системи на стадії проектування. Для досягнення мети було поставлено наступні завдання: проведення натурних досліджень, що дозволяють оцінювати вплив початкової жорсткості, точності станини на вихідні параметри верстата в цілому.

**Викладення основного матеріалу.** Незважаючи на те що в верстатобудуванні накопичений великий досвід по створенню різноманітних конструкцій елементів несучих систем, що позитивно зарекомендували себе на практиці, весь час йде напружена творча робота як по розробці нових конструкцій, так і щодо подальшого вдосконаленню існуючих.

Наведена методика проведення досліджень забезпечує цілком задовільну точність і надає можливість використання експериментальних даних по жорсткості станин і відповідних

методичних рекомендацій при проектуванні елементів несучої системи важких токарних верстатів.

Вижим станини двома башмаками проводиться за методикою, аналогічною вижиму одним башмаком (1). Станина вільно встановлена на всіх башмаках і виставлена по рівню на випробувальному стенді складального цеху ПАТ КЗВВ. Посередині довжини супортної полиці і полиці задньої бабки з фундаменту на дзеркало встановлено два індикатори. Середніми башмаками під супортною полицею і полицею задньої бабки проводиться вижим (підйом) станини на певну величину, по індикатору. Приладом ПКП-1М записується профіль дзеркала супортної полиці напрямних станини.

Прогин станини визначається як різниця величин відхилення від прямолінійності профілів напрямних до і після вижиму станини в відповідних точках.

Принциповою особливістю цього стенду є моделювання умов роботи несучої системи, які значною мірою впливають на похибку виготовлення деталі.

На рис.1 представлено прогини станини верстата 1А665Ф3 при вижимі її на 0,01; 0,02; 0,03; і 0,05 мм (по індикаторам).

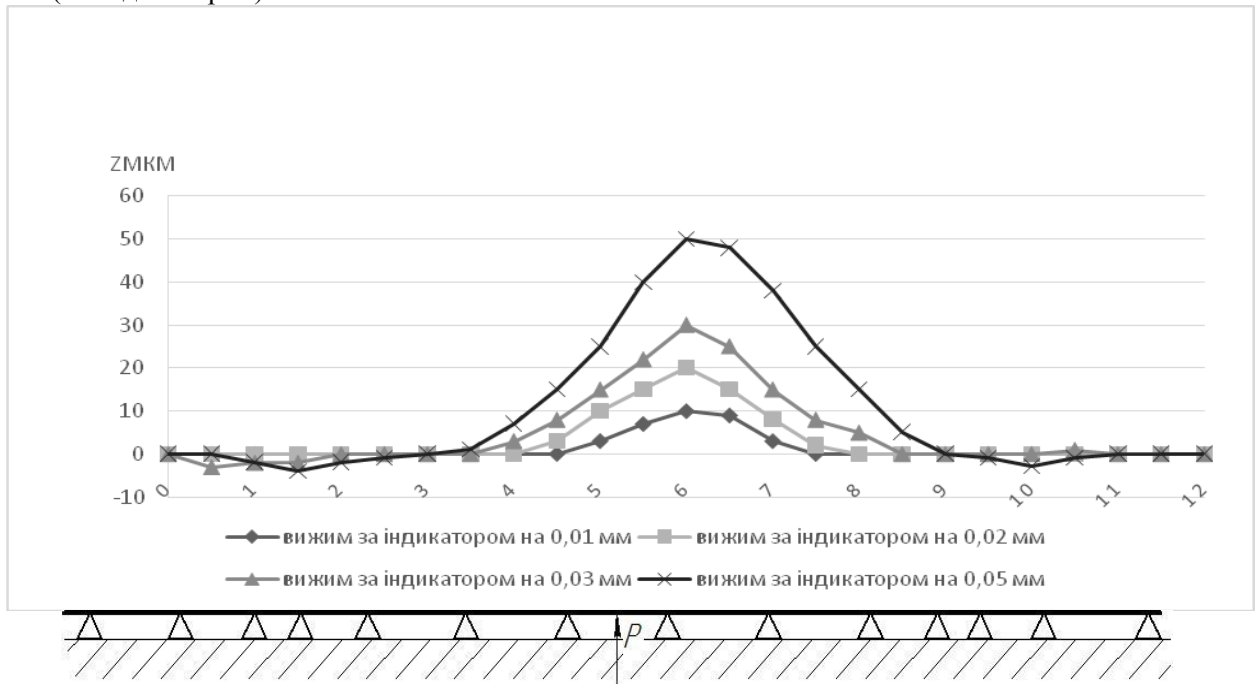


Рис.1 Прогин станини верстата 1А665.43 під власною вагою при вижиму її двома башмаками

Станина встановлена на башмаках, залитих в бетон фундаменту. На рис. 2 - прогини зварної станини розточувального типу верстата КЖ 1910. Станину встановлено на стендовій плиті і башмаках в верстатній лабораторії.

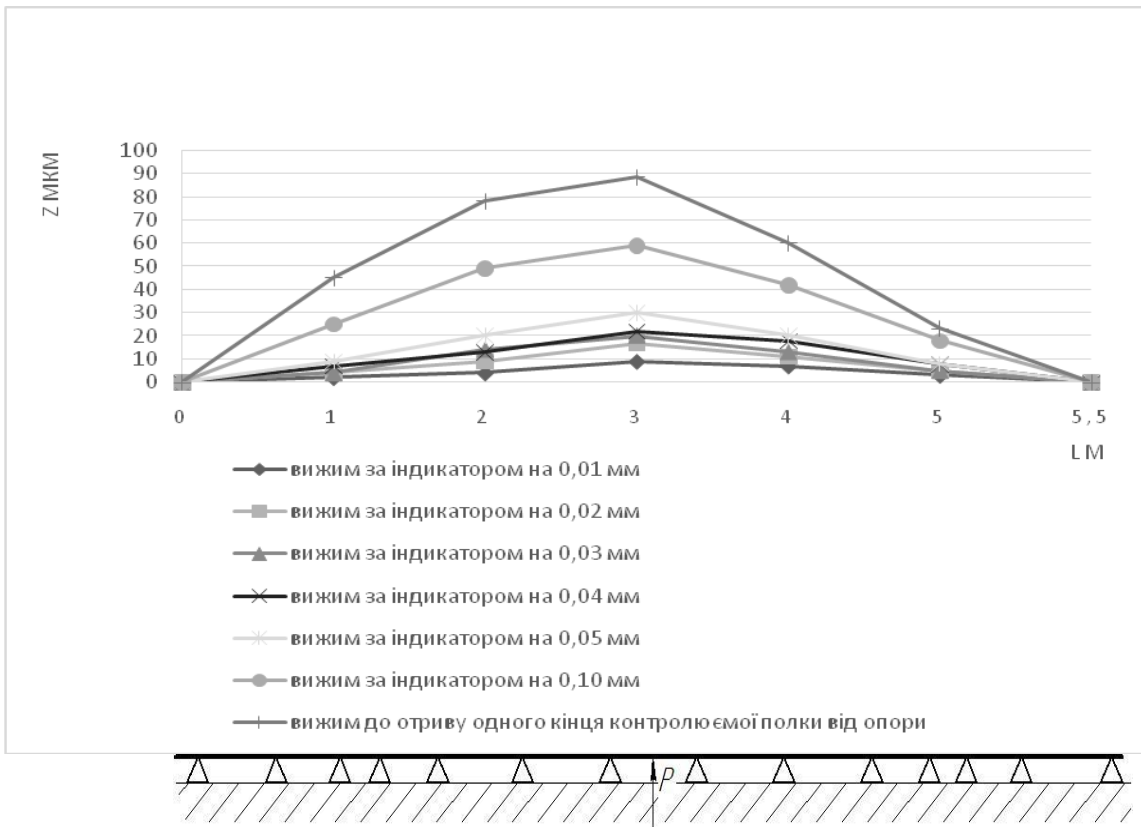


Рис.2 – Прогин станини верстата КЖ1910 під власною вагою при вижиму її двома башмаками

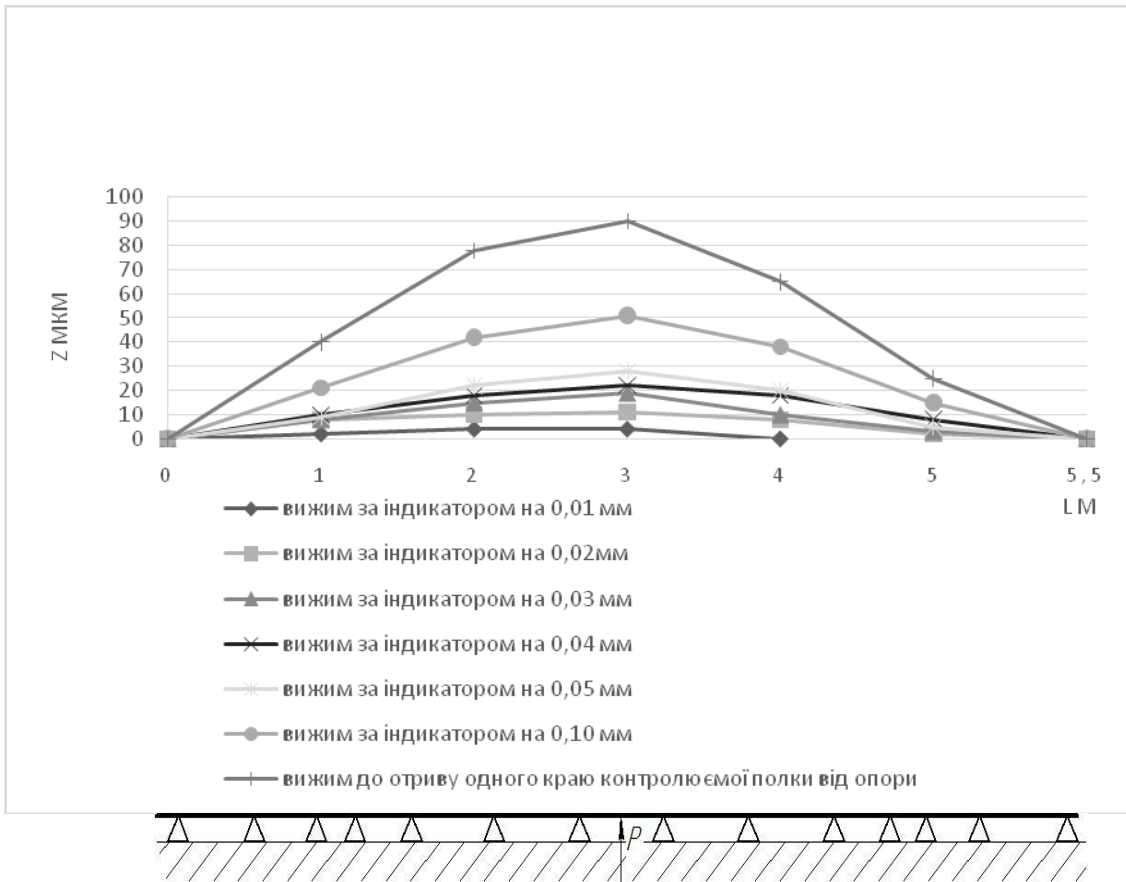
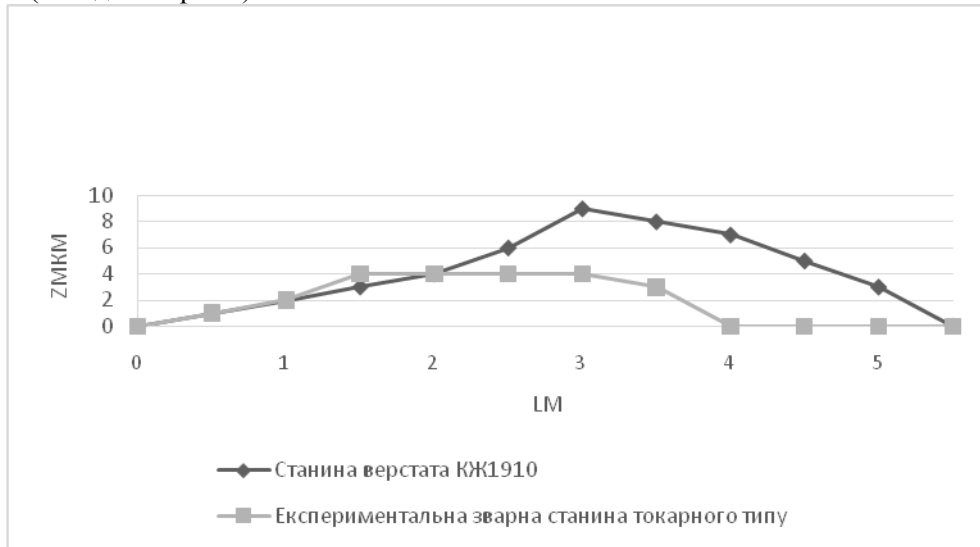


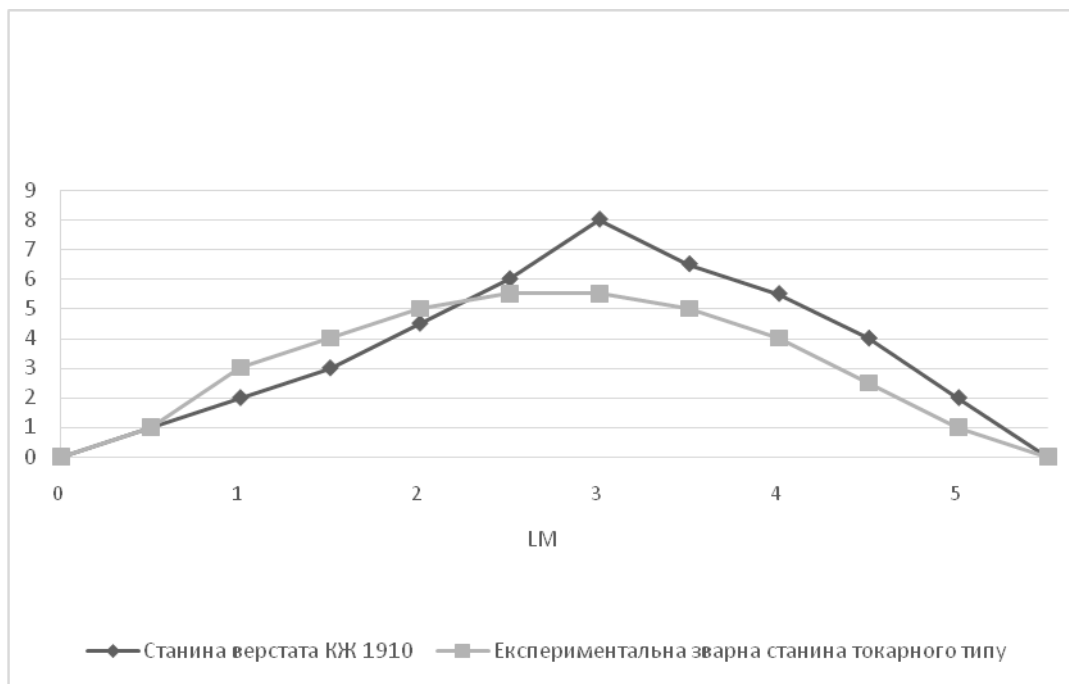
Рис 3 – Прогин зварної експериментальної станини токарного типу під власною вагою при вижиму її двома башмаками

На рис. 3 - прогини зварної експериментальної станини токарного типу, встановленої на стендовій плиті і башмаках в верстатній лабораторії.

На рис. 4 -10- представлено порівняння прогинів вищевказаних станин при вижимі їх на різні величини (за індикаторами).



**Рис.4 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками по індикатору на 0,01 мм**



**Рис. 5 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками по індикатору на 0,02 мм**

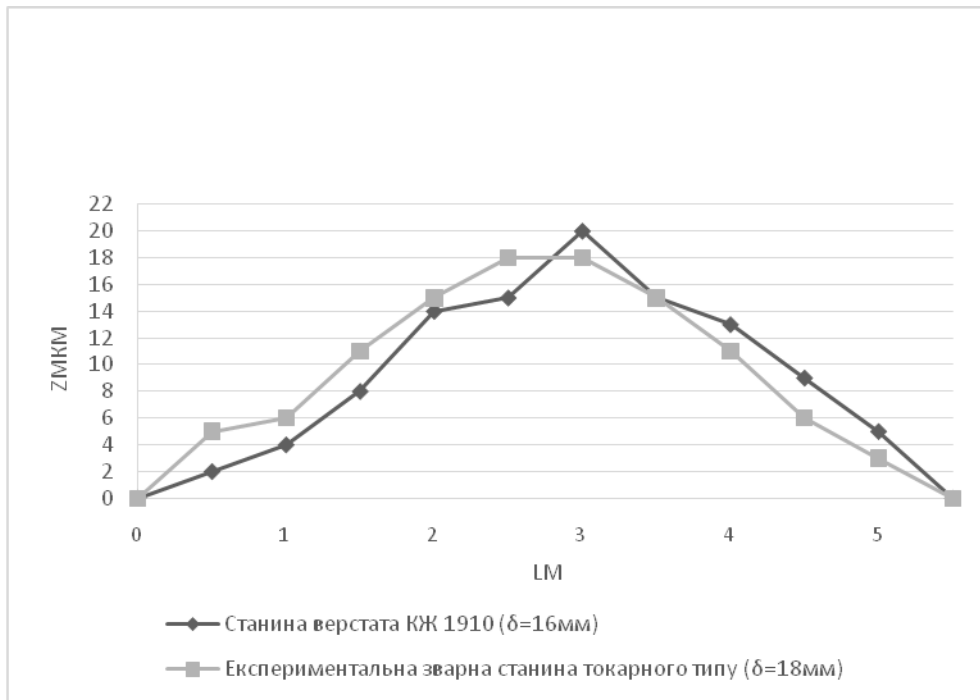


Рис. 6 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками по індикатору на 0,03 мм

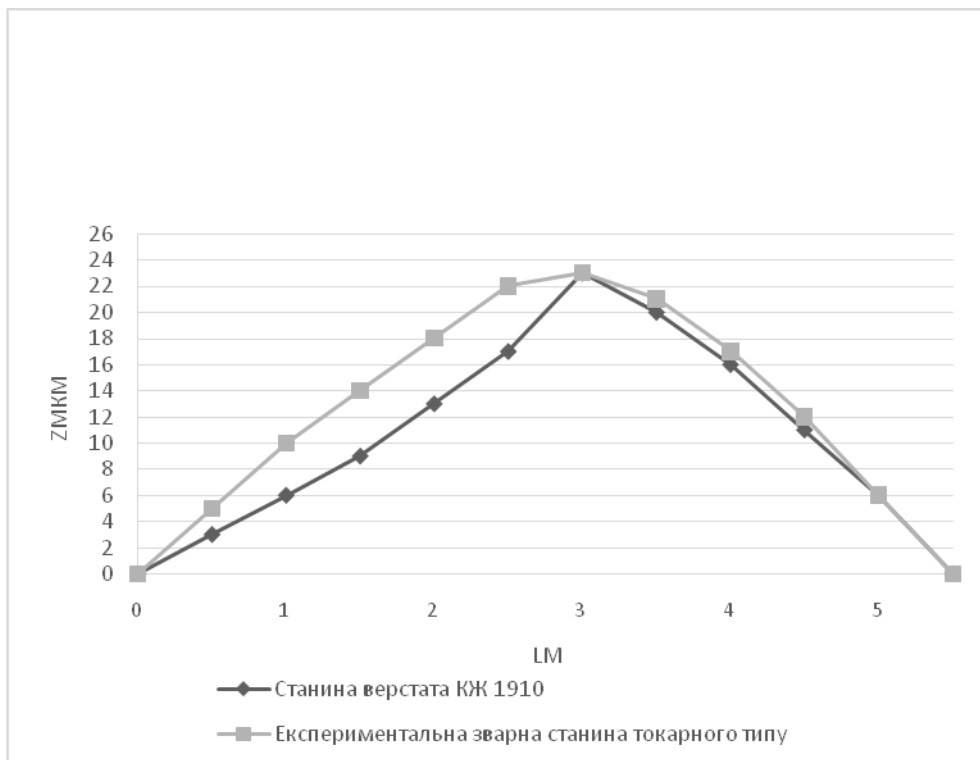


Рис. 7 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками по індикатору на 0,04 мм

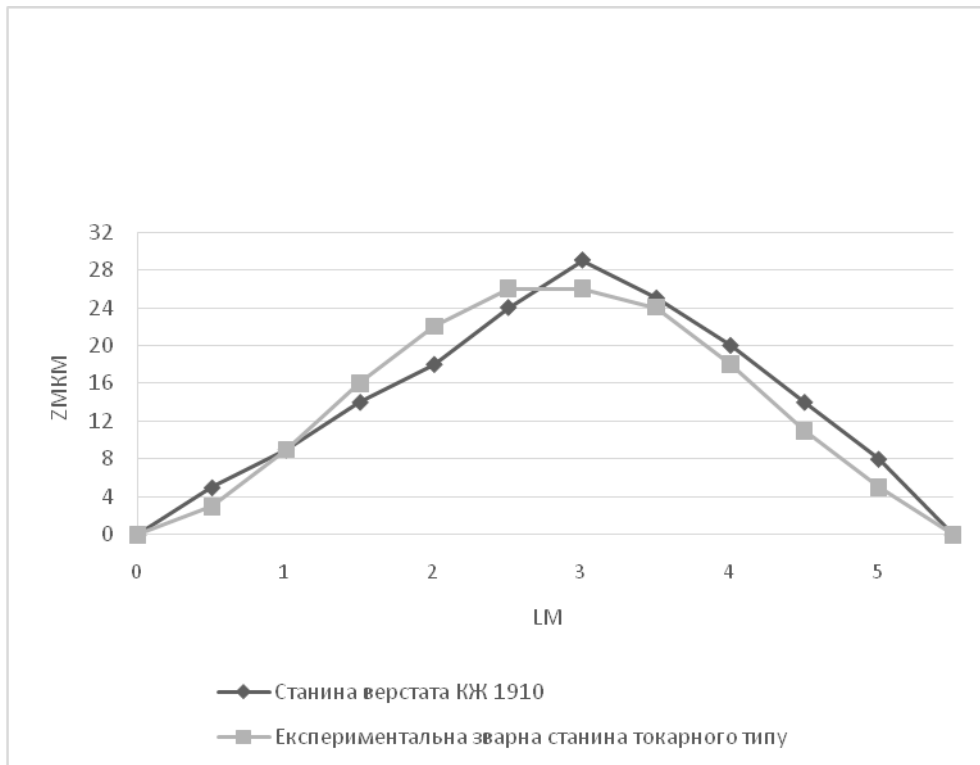


Рис. 8 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками по індикатору на 0,05 мм

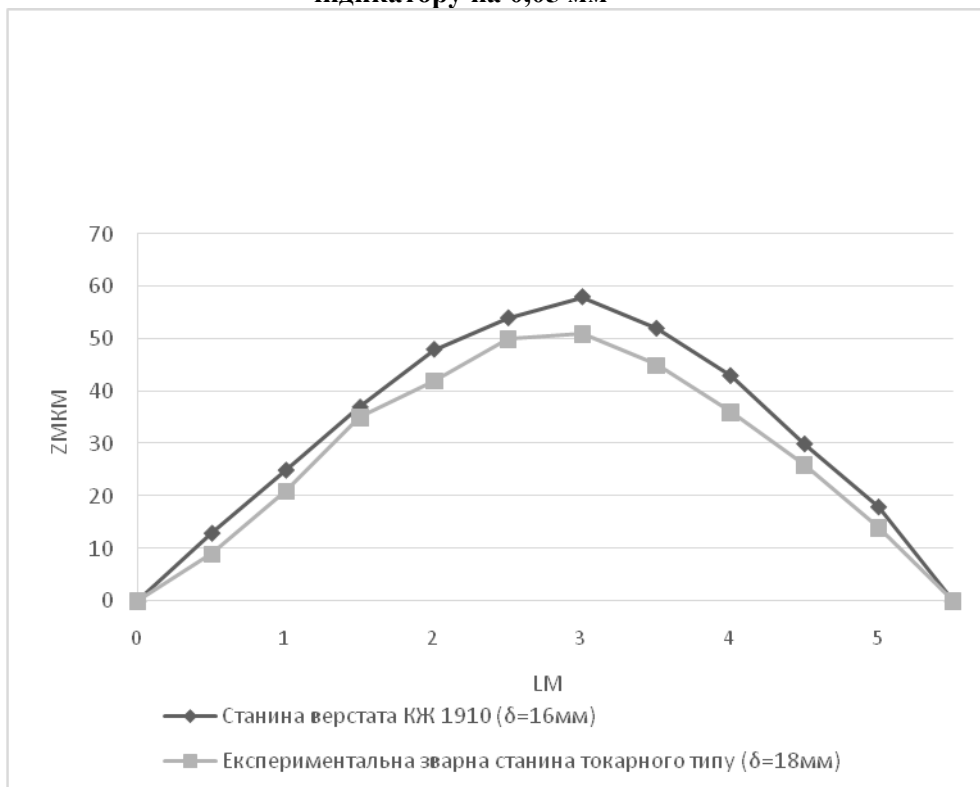


Рис. 9 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками по індикатору на 0,1 мм

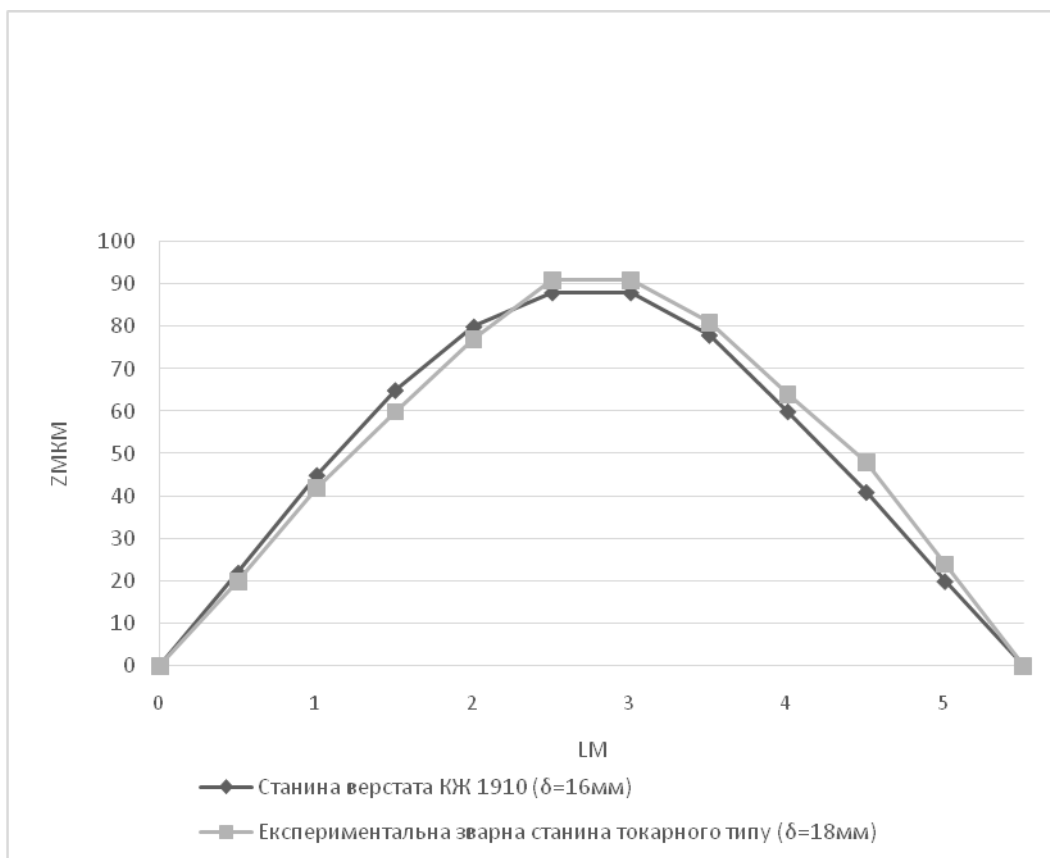


Рис. 10 – Прогин станин під власною вагою при вижиму двома башмаками до відриву одного кінця від опори

**Висновок.** Проблема забезпечення заданих показників якості в системах комп'ютеризованого автоматизованого виробництва багато в чому визначається якістю систем управління траєкторією формоутворюючих рухів інструмента відносно оброблюваної поверхні, що компенсується у часі з урахуванням похибок несучої системи. Специфіка промислового регіону і концентрація епіцентру важкого верстатобудування у м. Краматорськ надає можливість у рамках проведених досліджень робити висновки і рекомендації щодо проектування і модернізації важкого верстатного обладнання.

#### Список використаних джерел:

1. Тези доповіді на XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука-виробництво» 1-3 листопада 2017р. м. Чернігів. Проектування важких верстатів з урахуванням результатів експериментальних натурних досліджень Ковальов В.Д., докт. техн. наук, професор, Антоненко Я.С., асистент Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, 2017.
2. Проников А.С. и др. Проектирование металлорежущих станков и станочных комплексов Т2 Часть I Расчет и конструирование узлов и элементов станков – М.: Машиностроение, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1994. – 370С.
- 3 Ковалев В.Д., Гаков С.А., Пономаренко А.В., Белов Н.А. Исследование новой конструкции сварной станины тяжелого токарного станка повышенной точности с возможностью обработки деталей массой свыше 100 тонн // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 119–126. – ISBN 978-966-379-421-1

Стаття надійшла до редакції 15.12.2017

УДК 631.356.24

**В.М. Барановський, О.Ю. Скальський****Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОПУВАННЯ КРИХКИХ КОРЕНЕПЛОДІВ ЦИКОРІЮ**

*Розробка робочих органів, які забезпечують мінімальні пошкодження та задовільну повноту збирання коренеплодів цикорію кореневого є актуальним науковим завданням. Важливою передумовою ефективності розробки робочих органів для викопування коренеплодів цикорію є врахування їх агробіологічних і фізико-механічних властивостей. Вони суттєво корегують механіко-технологічні процеси та явища, які характерні для робочих процесів складних динамічних систем «коренеплід-робочий орган-грунтове середовище». Розвиток концепції та алгоритму побудови раціональних обрисів сучасних копачів можливий на основі подальшого аналізу технологічного процесу викопування коренеплодів. Це досягається на основі поглибленої ідентифікації функціонування робочих процесів і удосконалення робочих органів для викопування коренеплодів. В статті наведено результати теоретичного аналізу загальних принципів викопування крихких коренеплодів з умови мінімізації їх пошкодження. Отримано математичні моделі, які характеризують загальну умову викопування коренеплодів цикорію та умову викопування коренеплодів з мінімальними пошкодженнями. Встановлено, що сила викопування коренеплодів цикорію залежить від діаметра коренеплодів, висоти шару налиплого ґрунту і кута конуса росту коренеплоду та знаходиться у межах 25...39 Н. Результати досліджень є подальшим кроком розробки методології обґрунтування параметрів робочих органів копачів коренеплодів.*

*Ключові слова:* ґрунтове середовище, динамічна система, налиплий ґрунт, сила викопування, коефіцієнт тертя, пошкодження коренеплодів.

**В.Н. Барановский, А.Ю. Скальский****ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫКАПЫВАНИЯ ХРУПКИХ КОРНЕПЛОДОВ ЦИКОРИЯ**

*Разработка рабочих органов, обеспечивающих минимальные повреждения и удовлетворительную полноту уборки корнеплодов цикория корневого, является актуальной научной задачей. Важной предпосылкой эффективности разработки рабочих органов для выкапывания корнеплодов цикория есть учет их агrobiологических и физико-механических свойств. Они существенно корректируют механико-технологические процессы и явления, которые характерны для рабочих процессов сложных динамических систем «корнеплод-рабочий орган-почвенная среда». Развитие концепции и алгоритма построения рациональных очертаний современных копателей возможен на основе дальнейшего анализа технологического процесса выкапывания корнеплодов. Это достигается путем углубленной идентификации функционирования рабочих процессов и совершенствования рабочих органов для выкапывания корнеплодов. В статье приведены результаты теоретического анализа общих принципов выкапывания хрупких корнеплодов из условия минимизации их повреждения. Получены математические модели, характеризующие общее условие выкапывания корнеплодов цикория и условие выкапывания корнеплодов с минимальными повреждениями. Установлено, что сила выкапывания корнеплодов цикория зависит от диаметра корнеплодов, высоты слоя налипшей почвы и угла конуса роста корнеплода и находится в пределах 25...39 Н. Результаты исследований являются последующим шагом разработки методологии обоснования параметров рабочих органов копателей корнеплодов.*

*Ключевые слова:* почвенная среда, динамическая система, налипшая почва, сила выкапывания, коэффициент трения, повреждения корнеплодов.

**V. Baranovsky, O. Skalsky****THEORETICAL ASPECTS OF DIGGING OUT FRAGILE CHICORY ROOT CROPS**

*The development of working organs that ensure minimum damage and satisfactory completeness of the collection of roots of chicory root is an actual scientific task. An important prerequisite for the effective development of working organs for digging out the roots of chicory is the consideration of their agrobiological and physico-mechanical properties. They substantially correct the mechanical and technological processes and phenomena that are characteristic for working processes of complex dynamic systems "root crop-working organ-soil medium". The development of the concept and algorithm for constructing rational outlines of modern diggers is possible on the basis of further analysis of the technological process of digging out root crops. This is achieved on the basis of an in-depth identification of the functioning of working processes and the improvement of working organs for digging out root crops. The article presents the results of a theoretical analysis of the general principles of digging out fragile root crops from the condition of minimizing their damage. Mathematical models are obtained that characterize the general condition for digging out the roots of chicory and the condition for digging up root crops with minimal damage. It has been established that the power of digging out the roots of chicory depends on the diameter of the root crops, the height of the layer of adhered soil and the angle of the root growth cone, and is within 25...39 N. The results of the research are the next step in the development of a methodology for justifying the parameters of the working organs of diggers of root crops.*

*Keywords:* soil environment, dynamic system, adhered soil, digging force, coefficient of friction, root crop damage.

**Постановка проблеми.** У технологічному процесі виробництва коренеплодів цикорію кореневого, який є цінною лікарською, харчовою, технічною та кормовою культурою, однією з найбільш трудомістких операцій є механізоване збирання, на яке припадає близько 40...50 % усіх затрат праці [1]. Виробництво продукції переробки цикорію було провідною та традиційною галуззю



агропромислового комплексу України.

Корені цикорію використовують у фармацевтичній, кавовій, спиртовій та кондитерських галузях промисловості, а їх своєчасне збирання в оптимальні агротехнічні строки при мінімальних втратах і затратах праці – одна із важливих сучасних задач розробки збиральних машин. Основною причиною зниження виробництва цикорію є недосконалість техніки для їх збирання та невідповідність показників якості її роботи агротехнічним вимогам.

Механізоване збирання застарілими комплексами бурякозбиральних машин призводить до значних втрат коренів цикорію, які можуть становити 45...60 % і незадовільних показників якості очищення коренеплодів від домішок (12...18 %) залежно від ґрунтово-кліматичних умов збирання [2]. Застосування сучасних самохідних комбайнів провідних зарубіжних фірм на незначних посівних площах цикорію практично нерентабельне у зв'язку з значною купівельною вартістю таких машин – 650...800 тис. грн за одиницю.

Використання існуючих технічних засобів, призначених для викопування коренеплодів цикорію та застосування ручної праці на окремих технологічних операціях збирання, що характерно для колективних і фермерських господарств, значно збільшує використання енергоресурсів та суттєво знижує економічні показники і рентабельність умов господарювання.

Одним із резервів підвищення технологічних показників якості роботи коренезбиральних машин є удосконалення технологічного процесу викопування коренеплодів цикорію шляхом застосування комбінованих викопувальних робочих органів, які поєднують у собі систему сферичного диска з горизонтальним валом та встановленого за ним розрихлюючого пристрою, що дозволяє підвищити технологічну ефективність та інтенсифікувати процес викопування коренеплодів цикорію [3].

Поставлені завдання вирішуються на основі подальшого удосконалення методології та методики оптимізації технологічних показників процесу викопування і конструктивно-кінематичних параметрів та режимів роботи копачів коренеплодів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз сучасного стану функціонування гвинтових транспортних механізмів [3-8] показав, що існують значні передумови для проведення подальших наукових робіт, які спрямовані на розробку, дослідження та впровадження в виробництво енергозберігаючих, високотехнологічних комбінованих копачів, які забезпечують ефективне виконання суміжних функціональних операцій, як викопування, так і одночасного видалення залишків гички з головок коренеплодів.

Відсутність узагальнених аналітичних моделей процесу функціонування робочих елементів комбінованого копача, які одночасно виконують операції викопування та очищення головок коренеплодів від залишків гички зумовило проведення даних досліджень.

**Постановка завдань.** Метою досліджень є удосконалення методології та методів оптимізації параметрів і режимів роботи комбінованих викопувальних робочих органів з врахуванням умов ґрунтового середовища та фізико-механічних і агробіологічних властивостей коренеплодів цикорію кореневого.

**Викладення основного матеріалу.** На основі проведеного аналізу було встановлено, що вирішальне значення з точки зору фізико-механічних властивостей ґрунту під час процесу викопування коренеплодів цикорію має його твердість і вологість, а також зв'язок коренеплодів з ґрунтовым середовищем. Цей зв'язок характеризується силами, які необхідно прикласти для його руйнування і які залежать від погодних умов, способу обробки ґрунту, форми робочих органів, розмірно-масових параметрів коренеплодів тощо.

Під час проведення досліджень коренеплодів цикорію на міцність, або визначення величини зусилля на розтягування коренеплодів у вертикальній площині було встановлено, що допустиме навантаження коренеплодів цикорію на розрив знаходиться в межах від 55 до 84 Н/см<sup>2</sup> [6] Це свідчить про те, що без попереднього підкопування і інтенсивного руйнування зв'язків коренеплодів з ґрунтовым середовищем їх задовільне викопування з ґрунту практично неможливе, а в процесі викопування не повинно допускатися виникнення згинальних зусиль, які призводять до розламування тіла коренеплоду. Допустиме зусилля на згин коренів цикорію в середньому становить 3...9 Н [9], що характеризує корені цикорію, як одні з самих крихких коренеплодів.

З цією метою встановимо теоретичну залежність вказаної витяжної сили для двох основних випадків: перший – без попереднього підкопування коренів (невібраційні робочі органи) і другий – для вібраційних робочих органів (з попереднім руйнуванням зв'язку кореня з ґрунтом).

Для проведення теоретичних досліджень формалізується (моделюються) форма коренеплодів цикорію, щільність і вологість ґрунту, а також взаємодія між коренеплодом і

грунтовим середовищем.

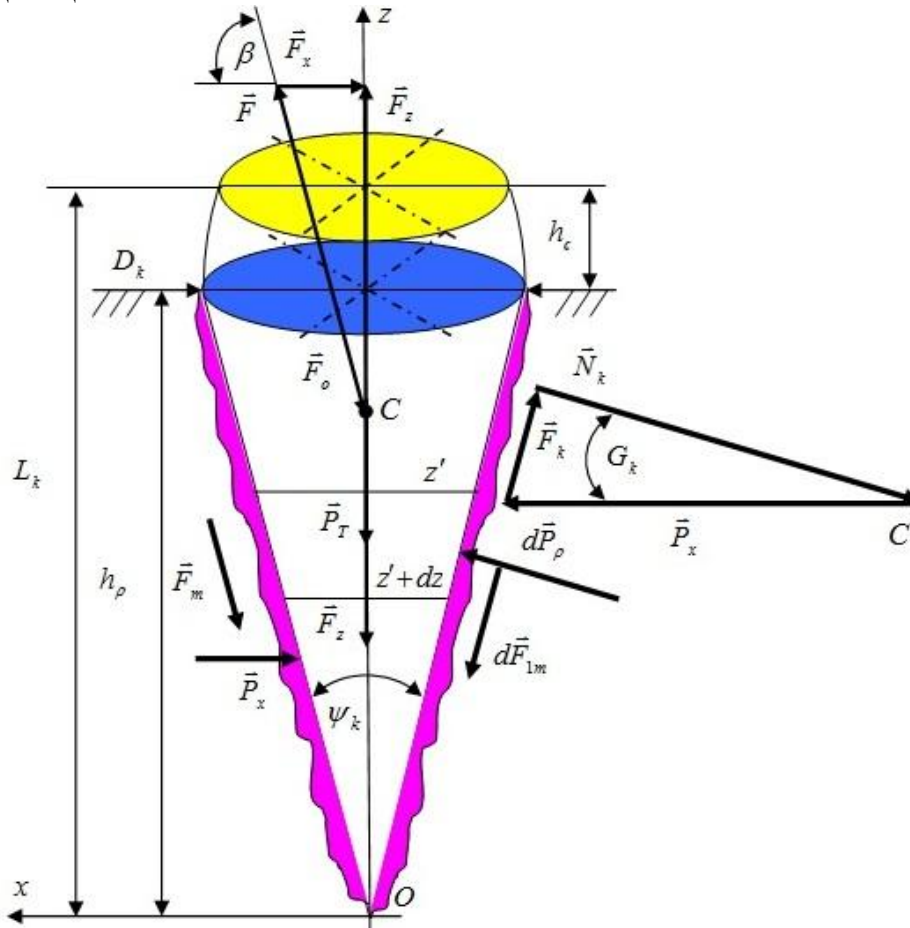


Рис. 1. Схема для розрахунку сили викопування конічних гладких коренеплідів

Схему для розрахунку сили викопування коренеплідів цикорію в загальному випадку наведено на рис. 1.

Віднесемо тіло коренеплоду з налиплим на його поверхні ґрунтом до системи координат  $xOz$  та позначимо всі вектори сил, які діють на нього в процесі викопування або витягування:

- $\vec{F}$  – вектор сили викопування (витягування) коренеплоду з ґрунтового середовища;
- $\vec{F}_o$  – вектор сили опору витягування коренеплоду з ґрунтового середовища;

– вектор сили опору  $\vec{F}_o$  витягування коренеплоду з ґрунтового середовища розкладемо на вектор сили опору  $\vec{F}_z$  вертикального переміщення коренеплоду та вектор сили опору  $\vec{F}_x$  горизонтального переміщенню коренеплоду.

Тому що викопування коренеплоду відбувається за поступального руху комбінованого копача в напрямку осі  $Ox$ , тоді вектор сили викопування  $\vec{F}$  буде направлений протилежно вектору сили опору  $\vec{F}_o$  та відхилений від вертикалі (осі  $Oz$ ) на відповідний кут, який позначимо буквеним виразом  $\beta$ .

Відомо [9], що витягування коренеплоду з ґрунтового середовища в загальному випадку описується залежністю

$$F \geq \frac{F_z}{\cos \beta} + \frac{m_k \left( g + \frac{d^2 z_k}{dt^2} \right)}{\cos \psi_k}, \quad (1)$$

де  $F$  – сила викопування коренеплоду з ґрунтового середовища, Н;  $F_z$  – сила опору вертикального переміщення коренеплоду, Н;  $\beta$  – кут відхилення вертикальної осі коренеплоду у

вертикальній площині, град.;  $m_k$  – маса чистого коренеплоду, кг;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $z_k$  – переміщення коренеплоду відносно осі  $Oz$ , м;  $d^2z_k/dt^2$  – прискорення коренеплоду відносно осі  $Oz$ , м/с<sup>2</sup>;  $\psi_k$  – кут конуса росту коренеплоду, град.

Умова викопування коренеплоду з ґрунтового середовища без пошкодження згідно з [7] записана наступним чином

$$F \leq \frac{[F_x]}{\sin \beta} + \frac{m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2}}{\beta}, \quad (2)$$

де  $F_z$  – сила опору горизонтальному переміщенню коренеплоду, Н;  $x_k$  – переміщення коренеплоду відносно осі  $Ox$ , м;  $d^2x_k/dt^2$  – прискорення коренеплоду відносно осі  $Ox$ , м/с<sup>2</sup>.

Проте у других доданках  $\frac{m_k \left( g + \frac{d^2 z}{dt^2} \right)}{\cos \psi_k}$  нерівності (1) і  $\frac{m_k \frac{d^2 x}{dt^2}}{\sin \psi_k}$  нерівності (2) враховано

безпосередньо тільки масу чистого коренеплоду  $m_k$ . Але під час витягування коренеплоду разом з його чистою масою підіймається також і шар налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду. Тобто в нерівності (1) і (2) не враховано масу налиплого ґрунту  $m_\rho$  на поверхні тіла коренеплоду цикорію, які мають доволі значні довжини  $L_k$ , по яких розподіляється додаткова маса  $m_\rho$ , що буде вносити суттєві корективи в значення сили опору  $F_o$  витягування коренеплоду з ґрунтового середовища, або на значення вектора сили опору вертикального  $\vec{F}_z$  та горизонтального  $\vec{F}_x$  переміщення коренеплоду.

Нехай сумарна сила ваги  $P_k$  тіла коренеплоду прикладена у точці  $C$ , або в центрі ваги тіла коренеплоду. При цьому сила опору  $F_o$  витягування коренеплоду з ґрунтового середовища безпосередньо та напряму залежить від сумарної сили ваги  $P_T$  тіла коренеплоду та сили тертя тіла коренеплоду по поверхні ґрунту  $F_m$ .

Сумарна сила ваги  $P_T$  тіла коренеплоду буде складатися з сили ваги чистого коренеплоду  $P_k$  та сили ваги  $P_\rho$  налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, тобто

$$P_T = P_k + P_\rho; \quad m_T = m_k + m_\rho; \quad P_k = m_T g = (m_k + m_\rho) g, \quad (3)$$

де  $P_T$ ,  $P_k$ ,  $P_\rho$  – відповідно, сумарна сила ваги тіла коренеплоду, чистого коренеплоду, налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду; Н;  $m_T$ ,  $m_\rho$  – відповідно сумарна маса тіла коренеплоду, маса налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, кг;

$$F_m = f_m N_k, \quad (3)$$

$f_m$  – коефіцієнт тертя;  $N_k$  – нормальна реакція коренеплоду, Н.

Якщо зробити припущення, що вектор сили викопування  $\vec{F}$ , який направлений протилежно вектору сили опору  $\vec{F}_o$  та відхилений від вертикалі (осі  $Oz$ ) на кут  $\psi/2$ , тоді нерівність (1) можна записати у наступному вигляді

$$F \geq \frac{F_z + (m_k + m_\rho) \left( g + \frac{dV_{zk}}{dt} \right)}{\cos(\psi_k / 2)}, \quad (4)$$

де  $V_{zk}$  – швидкість руху коренеплоду відносно осі  $Oz$ , м/с.

Умову викопування коренеплоду з ґрунтового середовища без його пошкодження можна записати наступним чином

$$F \leq \frac{[F_x] + (m_k + m_\rho) \frac{dV_{xk}}{dt}}{\sin(\psi_k / 2)}, \quad (5)$$

де  $V_{xk}$  – швидкість руху коренеплоду відносно осі  $Ox$ , м/с.

Для проведення подальшого аналізу запишемо, що:

- у загальному випадку маса коренеплоду  $m_k$  та налиплого ґрунту  $m_n$  на поверхні просторових форм коренеплодів визначаються за залежностями [10]

$$\left. \begin{aligned} m_k &= \rho_k V_k = \pi \int_a^b \rho_k(z) [f(z)]^2 dz; \\ m_\rho &= \rho V_\rho = \rho S_\rho \delta_\rho = 2\pi \int_a^b \rho(z) \delta_\rho(z) f(z) \sqrt{1 + [f'(z)]^2} dz \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де  $V_k, V_\rho$  – об'єм тіла коренеплоду та об'єм налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, м<sup>3</sup>;  $\rho_k, \rho$  – питома маса тіла коренеплоду та ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta_\rho$  – товщина шару налиплого ґрунту, м;  $S_\rho$  – площа поверхні налиплого ґрунту, м<sup>2</sup>.

При цьому згідно з [11] для наведеної просторової форми коренеплоду (рис. 1) маємо

$$m_k = \frac{\pi \rho_k}{3} [h_c (0,75 D_k^2 - h_c^2) + 0,25 D_k^2 (L_k - h_c)]; \quad (7)$$

$$m_n = \frac{\pi \rho h_\rho \delta_\rho}{3} (D_k + \delta_\rho), \quad (8)$$

де  $D_k$  – діаметр коренеплоду, м;  $L_k$  – довжина тіла коренеплоду, м;  $h_c$  – висота головки коренеплоду, м;  $h_\rho$  – висота налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, м.

Сила тертя тіла по поверхні ґрунту  $F_m$  визначається наступним чином:

$$F_z = 2(F_k - F_m) \cos(\psi_k / 2); \quad F_k = P_x \sin(\psi_k / 2); \quad F_m = f_m P_x \cos(\psi_k / 2), \quad (9)$$

де  $P_x$  – горизонтальна сила, яка виникає під час переміщення комбінованого копача, Н.

Тоді сила опору вертикального  $F_z$  переміщення коренеплоду згідно з залежностями (9) буде визначатися за формулою

$$F_z = 2[P_x \sin(\psi_k / 2) - f_m P_x \cos(\psi_k / 2)] \cos(\psi_k / 2). \quad (10)$$

З залежності (10) визначаємо коефіцієнт тертя  $f_m$  тіла коренеплоду по поверхні ґрунту, при цьому

$$f_m = \frac{\left[ 2P_x \operatorname{tg}(\psi_k / 2) - \frac{F_z}{\cos^2(\psi_k / 2)} \right]}{2P_x}. \quad (11)$$

Тоді сила тертя тіла коренеплоду по поверхні ґрунту  $F_m$  з врахуванням (9), (10) визначається за формулою

$$F_m = P_x \sin(\psi_k / 2) - \frac{2F_z}{\cos(\psi_k / 2)}. \quad (12)$$

Підставим у залежності (4) і (5) наступні складові:

- значення сила опору  $F_z$  вертикального переміщення коренеплоду  $F_z = 2P_x \cos^2(\psi_k / 2) [\operatorname{tg}(\psi_k / 2) - f_m]$ , яке визначено з рівняння (10);

- значення маси  $m_k$  чистого коренеплоду, яке визначено з рівняння (7) та значення маси  $m_\rho$  налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду, яке визначено з рівняння (8).

Після відповідних спрощень і перетворень отримаємо:

- загальну умову викопування коренеплодів цикорію з ґрунтового середовища

$$F \geq 2P_k \cos(\psi_k / 2) [\operatorname{tg}(\psi_k / 2) - f_m] + \frac{\pi}{3 \cos(\psi_k / 2)} (\rho_k [h_c (0,75 D_k^2 - h_c^2) + 0,25 D_k^2 (L_k - h_c)] + (0,5 D_k + \delta) \rho h_\rho \delta_\rho) \left( g + \frac{dV_{zk}}{dt} \right); \quad (13)$$

- умову викопування коренеплоду з ґрунтового середовища без його пошкодження

$$F \leq \frac{1}{\sin(\psi_k / 2)} \left\{ [P_x] + \frac{\pi}{3} \left( \frac{dV_{xk}}{dt} \right) \left( \rho_k [h_c (0,75D_k^2 - h_c^2) + 0,25D_k^2 (L_k - h_c)] + \right) \right\}. \quad (14)$$

Таким чином, отримані нерівності (13) і (14) в загальному випадку є аналітичними умовами які характеризують зміну загального зусилля, яке необхідно прикласти до коренеплодів для їх викопування та зміну максимально можливого зусилля, яке необхідно прикласти до коренеплоду для його викопування без пошкодження, або без зламу хвостової частини тіла коренеплоду цикорію.

За початкових умов  $\rho_k = 550 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ ,  $L_k = 0,15 \text{ м}$ ,  $h_c = 0,03 \text{ м}$ ,  $\delta_\rho = 0,005 \text{ м}$ ,  $\psi_k = \pi / 6 \text{ град.}$ ,  $[P_x] = 10 \text{ Н}$  в загальному випадку побудовано залежності зміни сили викопування коренеплодів цикорію з умови їх непошкодження:

- від діаметра коренеплоду і кута конуса росту коренеплоду у вигляді функціонала  $F = f_2(D_k, \psi_k)$ , рис. 2а;

- від діаметра коренеплоду і висоти шару налиплого ґрунту на поверхні тіла коренеплоду у вигляді функціонала  $F = f_1(D_k, h_\rho)$ , рис. 2б.

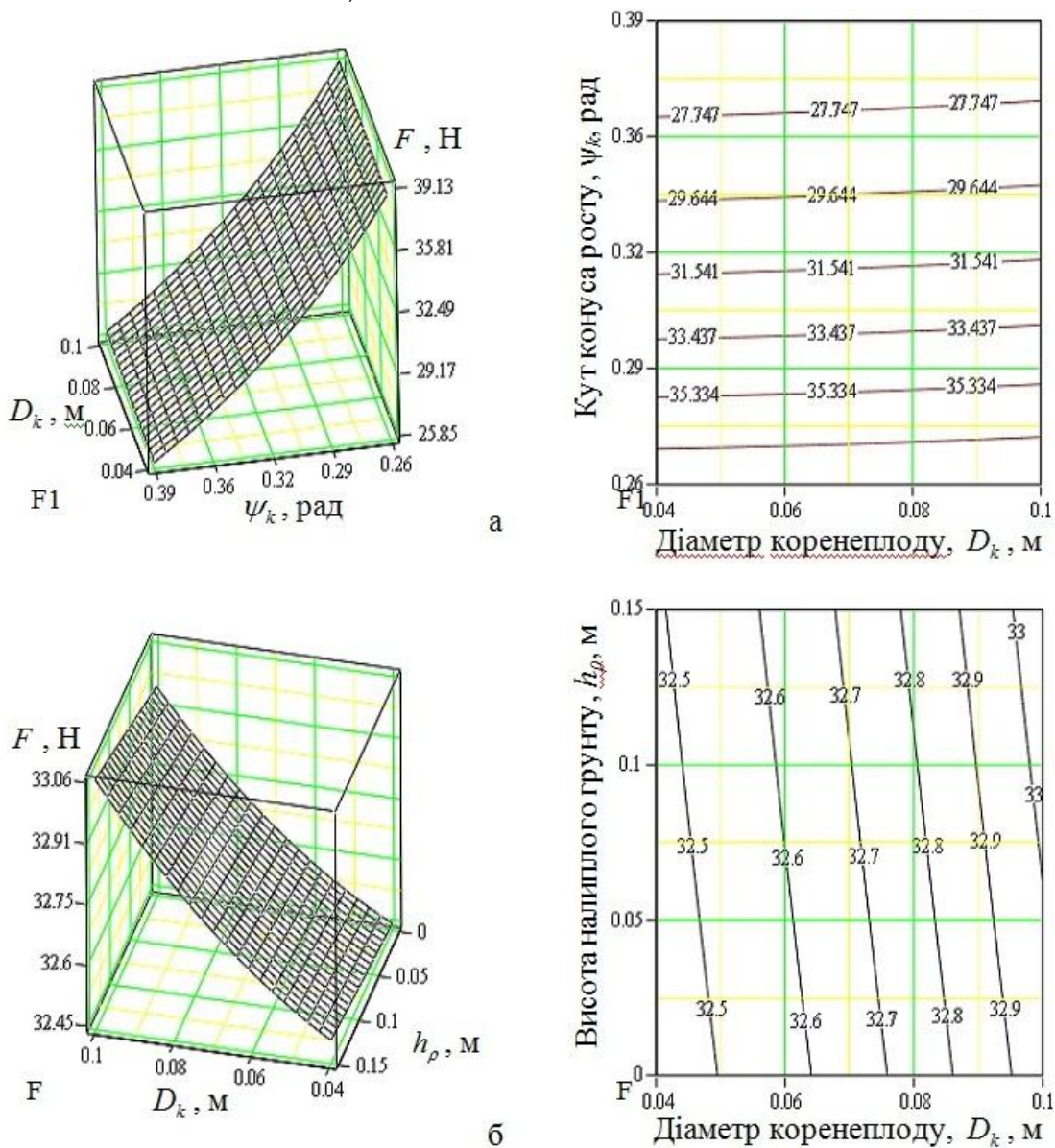


Рис. 2. Залежність зміни сили викопування коренеплодів з умови непошкодження:

а –  $F = f_1(D_k; h_\rho)$ ; б –  $F = f_2(D_k; \psi_k)$

Аналіз графічних побудов (рис. 2) показує, що зміна сили викопування коренеплодів цикорію залежно від діаметра коренеплодів  $D_k$ , висоти шару налиплого ґрунту  $h_p$  та кута конуса росту коренеплоду  $\psi_k$  має прямо пропорційний характер – зі збільшенням  $D_k$ ,  $h_p$  і  $\psi_k$  сила викопування  $F$  коренеплодів цикорію з умови їх непошкодження збільшується та знаходиться у межах 25...39 Н, рис. 2а.

За усередненого значення кута конуса росту коренеплодів цикорію  $\psi_k = 30...35$  град. сила викопування  $F$  коренеплодів з умови їх непошкодження коливається у незначних межах і становить приблизно 32,5...33,0 Н, рис. 2б.

**Висновки.** Отримані залежності (13) і (14) є теоретичними моделями, які дозволяють на етапі проектування визначити необхідні зусилля для викопування коренеплодів в загальному контексті та максимально допустимі зусилля викопування крихких коренеплодів цикорію за умови їх непошкодження, або за умови мінімізації їх пошкодження.

#### Список використаних джерел:

1. Яценко О.Я. Цикорій коренеплідний: Біологія, селекція, виробництво і переробка коренеплодів: Навчальний посібник. – Умань: ФІЦБ УААН, 2003. – 161 с.
2. Стельмах В.М. Вивчення основних розмірних параметрів і фізико-механічних характеристик цикорію кореневого / В.М. Стельмах // Науково-технічний бюлетень Хмельницької держ. с.-г. дослідної станції. – К., 1996. – № 4. – С. 72 – 80.
3. Дубровин В. Идентификация процесса разработки адаптированной корнеуборочной машины / Валерий Дубровин, Геннадий Голуб, Виктор Барановский, Виктор Теслюк // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. – Lublin-Rzeszow, 2013. – Vol. 15. – № 3. – С. 243–255.
4. Погорілий М. Л. Механічні характеристики ґрунтово-коренеплідного середовища цукрових буряків в умовах динамічного навантаження / М. Л. Погорілий // Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград : КНТУ, 1995. – С. 150–158.
5. Гументик М.Я. Особливості цикорію кореневого і агротехніка його вирощування / М.Я. Гументик // Зб. наук. праць ПЦБ УААН. – К., 2003. – С. 339–341.
6. Борисюк В.О. Методика визначення глибини ходу викопувальних робочих органів для збирання цикорію / В.О. Борисюк, М.М. Зуев, М.Я. Гументик // Цукрові буряки. – 2003. – № 4. – С. 14.
7. Романишин О.Ю. Стан та перспективи органічного виробництва цикорію / О.Ю. Романишин // Органік, 2016. – С. 78–84. [http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/5186/1/Organik\\_2016\\_78-84.pdf](http://ir.znau.edu.ua/bitstream/123456789/5186/1/Organik_2016_78-84.pdf).
8. Скальський А.Ю. Агробиологические и физико-механические характеристики цикория корневого / А.Ю. Скальський, Н.В. Потапенко, В.Н. Барановский // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. – РУП Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства. – Минск, 2016. – Вып. 50. – Т. 1. – С. 158–162.
9. Андреев А.О. Розрахунки витяжної сили агрегатів для збирання коренеплодів цикорію / А.О. Андреев, В.М. Стельмах // Наук.-техн. бюлетень. – К. 1996. – № 4. – С. 56–59.
10. Бронштейн И.Н., Семедяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семедяев. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 706 с.
11. Барановський В.М. Основи розробки адаптованих транспортно-технологічних систем коренезбиральних машин : монографія / В.М. Барановський, М.І. Підгурський, М.Р. Паньків, В.В. Теслюк, В.Б. Онищенко. – Тернопіль : ТНТУ, 2014. – 351 с.

#### Рецензенти:

**Пилипець Михайло Ількович**, доктор технічних наук, професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

**Головач Іван Володимирович**, доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017

UDC 631.361.22

**E.B. Berezhenko, V.M. Baranovsky**  
*Ternopil Ivan Puluj National Technical University*  
**TECHNOLOGY OF HARVESTING OF ROOT CROPS**

*The development of energy-saving technologies for agricultural crops production is a strategic and priority direction for further balanced development of the agro-industrial complex in Ukraine. In this aspect, an important task of scientific research is the development of the concept of a significant reduction in energy demands, which is spent during the technological process of harvesting the main mass of the tops of root crops. On the basis of the identification of technological processes and structural models of existing devices for harvesting tops of root crops, a new technology for harvesting the main mass of the tops of root crops and a device for its implementation is proposed – an improved energy saving module of root harvesters. The energy saving method, in contrast to the existing technology of stacking the cut and crushed tops with a screw conveyor on the collected field into a roll, involves the stacking the tops between rows of the root crops. Reducing energy demands is achieved by eliminating the operation of moving the tops with a screw conveyor.*

*Keywords: module, rotary top cutter, guide channel, dividing plate, hinged baffle, energy demands.*

**Є.Б. Береженко, В.М. Барановський**  
**ТЕХНОЛОГІЯ ЗБИРАННЯ ГИЧКИ КОРЕНЕПЛОДІВ**

*Розробка енергозберігаючих технологій виробництва сільськогосподарських культур є стратегічним і пріоритетним напрямком подальшого збалансованого розвитку агропромислового комплексу України. В цьому аспекті важливим завданням наукових досліджень є розробка концепції значного зменшення затрат енергії, які витрачаються під час технологічного процесу збирання основного масиву гички коренеплодів. На основі ідентифікації технологічних процесів і структурних моделей існуючих пристроїв для збирання коренеплодів запропоновано нову технологію збирання основного масиву гички коренеплодів і пристрій для його реалізації - вдосконалений енергозберігаючий модуль коренезбиральних машин. Енергозберігаючий спосіб, на відміну від існуючої технології укладання зрізаної і подрібненої гички шинковим транспортером на зібраній полі в валок, передбачає укладання гички в міжряддя коренеплодів. Зменшення витрат енергії досягається шляхом усунення операції переміщення гички шинковим конвеєром.*

*Ключові слова: модуль, роторний гичкоріз, направляючий канал, ділильний диск, фартук, енергозатрати.*

**Е.Б. Береженко, В.Н. Барановский**  
**ТЕХНОЛОГИЯ УБОРКИ БОТВЫ КОРНЕПЛОДОВ**

*Разработка энергосберегающих технологий производства сельскохозяйственных культур является стратегическим и приоритетным направлением дальнейшего сбалансированного развития агропромышленного комплекса Украины. В этом аспекте важной задачей научных исследований является разработка концепции значительного уменьшению затрат энергии, которые расходуются во время технологического процесса уборки основного массива ботвы корнеплодов. На основе идентификации технологических процессов и структурных моделей существующих устройств для уборки ботвы корнеплодов предложена новая технология уборки основного массива ботвы корнеплодов и устройство для его реализации – усовершенствованный энергосберегающий модуль корнеуборочных машин. Энергосберегающий способ, в отличие от существующей технологии укладки срезанной и измельченной ботвы шинковом транспортером на собранный поле в валок, предусматривает укладку ботвы в междурядья корнеплодов. Уменьшение затрат энергии достигается путем устранения операции перемещения ботвы шинковом конвейером.*

*Ключевые слова: модуль, роторный ботворез, направляющий канал, делительный диск, фартук, энергозатраты.*

**Formulation of the problem.** The root crops of sugar, fodder beet and root chicory are important technical crops of agricultural production. Sugar beet is the primary source for obtaining raw materials, from which sugar is produced as a strategic food product, which is in great demand in the world market and other important minor products of its processing. The root crops of fodder beet and tops are valuable components of the feed ration of farm animals. Fodder beet, in the feeds of the autumn-winter period, is the main type of juicy feed stuff that has a large amount of carbohydrate nutrients, especially useful for dairy cattle. Introduction in the diet of dairy cows of fodder beet helps to increase feed intake by 8...11%, increase the milk production of animals by 10%, assimilation of organic substances by 5...8% [1].

The roots of chicory are used in the pharmaceutical, coffee, alcohol and confectionery industries. The value of chicory is determined by the content of various kinds of saccharin's in root crops that is inulin, fructose, glucose, various kinds of acids and vitamins useful for the organism and rare in natural products, vitamins, and also trace nutrients including iron, copper, zinc, chromium. The products of two processing plants in Ukraine, which are loaded at 15...25% of the production capacity, are exported to France, Belgium, Hungary, Russia, the Republic of Belarus, the United States. Despite the growing demand for raw processing products of root chicory, the acreage of this strategically important



agricultural crop in Ukraine is annually reduced by 20...30% due to unsatisfactory provision of harvesting tools for root crops, such as harvesting of the tops and digging of root crops [2].

**Analysis of recent research and publications.** Analysis of well-known scientific works (3-6) showed that the existing technologies for harvesting the leaves are energy-consuming. The increase in energy costs occurs at the stage of transportation of the cut-off haul by a transverse screw conveyor. Significant cost reduction is achieved by eliminating this intermediate operation and laying the cut tops not in the cleaned field, but in between.

**Setting goals.** The purpose of the work is to reduce the energy costs of the technological process of harvesting the main body of root crops. The achievement of the goal is realized on the basis of the improvement of the technology and design of the module for harvesting the leaves.

**Statement of the main material.** In addition, the tops of sugar, fodder beet and root chicory are also one of the sources nutrient return to the soil after spreading the severed tops to the harvested field. Due to increase in energy prices in recent years, both in the world and in Ukraine in particular, as energy resources began to use biological fuel, which is produced from high-performance energy crops. One of the most advanced alternative sources of energy today is a solid biological mass of organic origin including vegetable, which is an environmentally friendly renewable energy source. The raw material for the production of such energy is agricultural and food products. The most important varieties of this fuel are biodiesel and bioethanol.

For the production of bioethanol, any raw materials containing a significant amount of sugar or materials that can be reformed to sugar, for example starch or cellulose, is used. Common sugar crops that are used as raw materials for bioethanol production are sugar and fodder beet, root chicory, sugar cane, sugar sorghum etc.

A special place in this list belongs to root crops, which for their agrobiological properties have a sufficiently high and stable energy potential among agricultural crops. With proper cultivation techniques, they can provide yields of up to 100 t/ha, and sometimes much more. Modern varieties and hybrids of root crops with a high yield potential give a large yield of clean energy and biogas. After the processing of root crops, energy carriers are obtained in the form of sugar, bioethanol or biogas, fig. 1 [7].

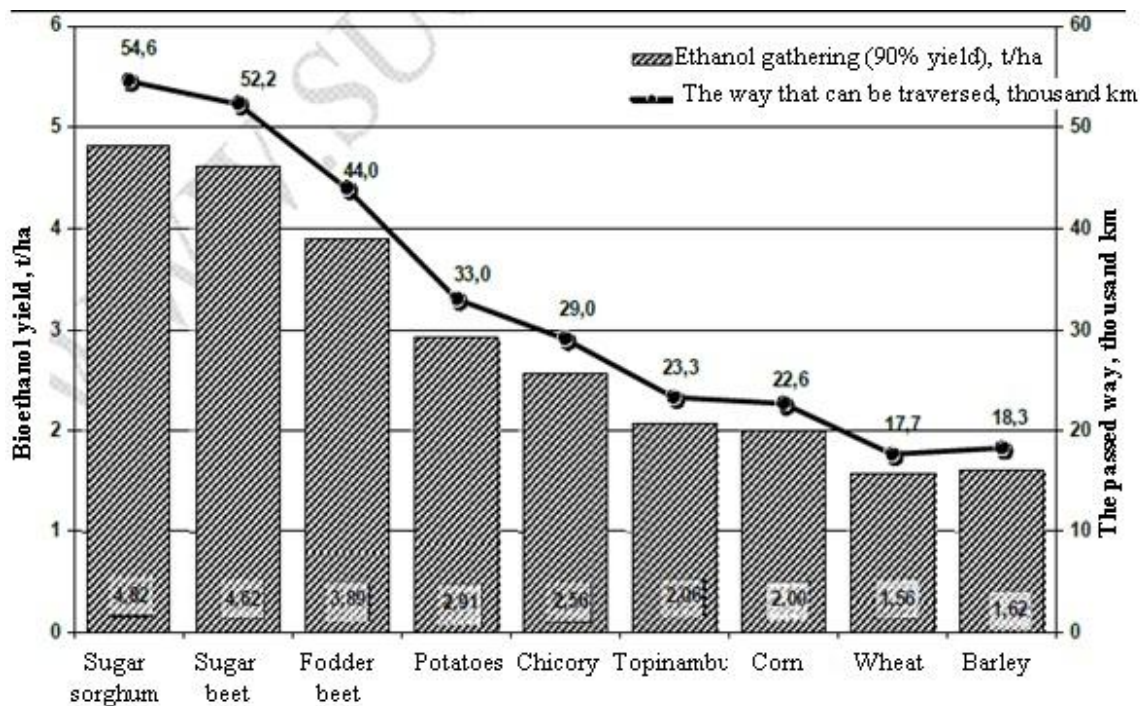


Fig. 1. Potential yield of bioethanol per 1 hectare of crops

An important criterion of obtaining benign raw materials for the processing and food industries of the agro-industrial complex is timely harvesting of root crops in accordance with established agricultural quality indicators. Both late and early harvesting of root crops result in significant losses of many types of structural natural components, or a decrease in the quality of raw materials for its processing [8]. The sustainable development of the world agro-industrial complex is impossible without



the development of new progressive approaches to the creation of effective technologies and technical means for harvesting crops.

The mechanized harvesting of sugar root crops, fodder beet and root chicory is one of the most labor intensive and energy-consuming operations in the general context of crop production and processing raw materials not only in Ukraine but also in highly developed countries of the world community.

The choice of perspective layout schemes and the development of new designs of working bodies and technical means for harvesting the tops should in general be based on the world experience of reducing energy resources, considering the special aspects of domestic agrotechnical, technical and economic, ecological and other production requirements.

On the basis of the research of technological processes that realize the cutting of the tops of root crops and technological schemes of top harvesters and technical equipment of domestic and foreign production, it can be stated that at the modern stage the top harvesters compete harvesting of the tops without gauging capitulum of root crops [8].

The presence of a wide variety of layout schemes for the top harvesting mechanisms is directly related to both the top harvesting techniques (Fig. 2) or the use of tops (the use of haulm for food or as organic fertilizer by spreading it onto a harvested field) and with technological operations that realize Every single technology of its harvesting.

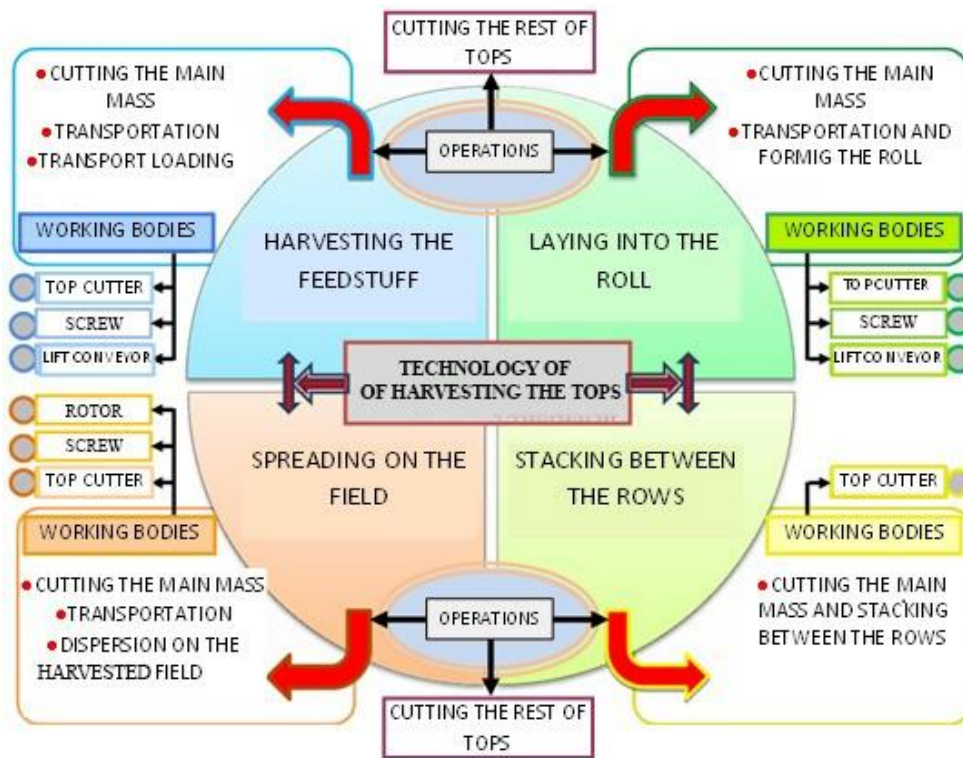


Fig. 2. Technology and operations of harvesting the root crops

Considering the specific biological characteristics of the tops of root crops (significant yields), mechanized harvesting of the tops can provide for five main adjacent technological operations: cutting the main mass of the tops, transporting the cut tops with forming into the roll or spreading it onto the harvested field, cutting off the deads of the tops from the capitulum of root crops, loading into the transport.

At this stage, cutting the main mass of tops is carried out without gauging capitulum of root crops, or by method of non-retaining cutting of the chisel blade with the use of working bodies of the rotor type (rotary top cutter) with a horizontal axis rotation of the rotor. Subsequently depending on the technology of harvesting the tops, the cut tops with the knives of the rotary top cutter used for appointment:

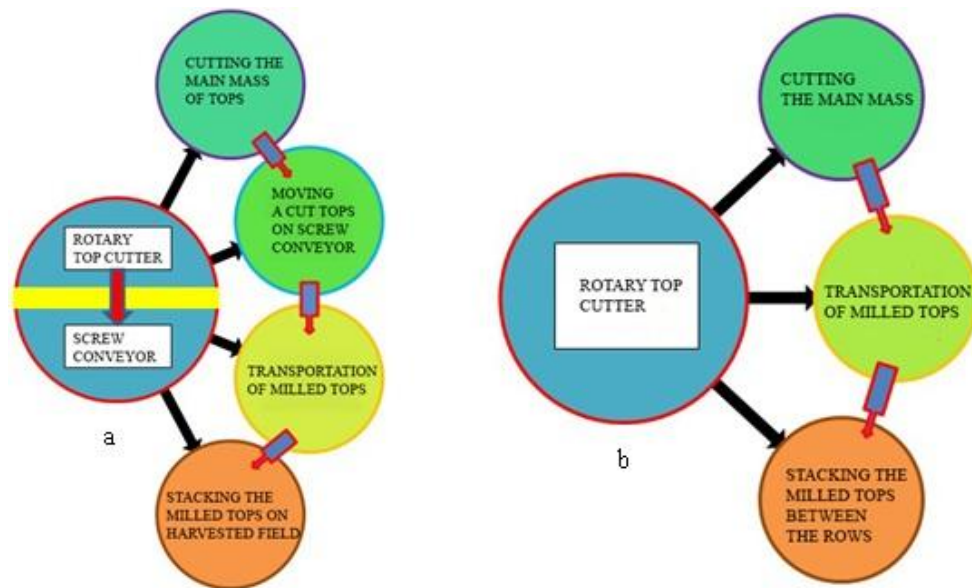
- for forming the roll of cut tops, a screw conveyor is used, which detain the tops on the harvested field;
- for the spreading the cut tops onto the harvested field, a rotary top thrower is used which is installed at the similar end point of the screw conveyor;

- for loading the cut tops into the vehicle (when using the tops for feed) use a loading slat conveyor.

The first stage of single-phase harvesting of root crops, which is mainly used in the countries of the European Union and in most cases in Ukraine and the Russian Federation, is a two-stage harvesting tops by top harvester modules in composition of self-mobile hopper combine harvester: the first stage is the cutting the main mass of tops; second stage is the cutting the deads of tops from the capitulum of root crops

At the first stage, such operations are performed, Fig. 3a:

- cutting of the main mass of the tops with knives of the rotary top cutter withits with its simultaneous grinding;
- feeding the milled tops by the motion path to screw conveyor;
- transportation of milled tops with spiral by spiral turns of the screw conveyor
- delivering the tops by spiral turns through the discharge ring of the screw conveyor into the roll or spreading the tops to the harvested field by rotary top thrower which is installed behind the discharge ring of the screw conveyor.



**Fig. 3. The operations of harvesting the main mass of the tops:  
a - the existing technology; b - advanced technology**

In the second consecutive stage, the deads of the tops from the capitulum of root crops are trimmed with various designs cutters which are made as a “passive passive-feeler chisel”

The disadvantage of this method of harvesting the tops are high energy costs for additional transport operations by the screw conveyor and spreading the milled tops by a rotary tops thrower.

Therefore, the development of new designs of technical means for harvesting tops of root crops should be based on world experience in reducing energy resources, taking into account the peculiarities of domestic agrotechnical, technical-economic, ecological and other production requirements.

The working hypothesis is based on the solution of the scientific task of reducing energy costs during the harvesting the main mass of tops, which provides for the elimination intermediate link in the design-layout scheme of the module for harvesting the tops in the form of transport element made in the form of a screw conveyor and installed in the guide channel.

Considering the world trend of a single-phase method of harvesting root crops by modern self-mobile vehicles, which provide for the block-modular principle of their construction, we proposed an improved method of harvesting the main body of root crops.

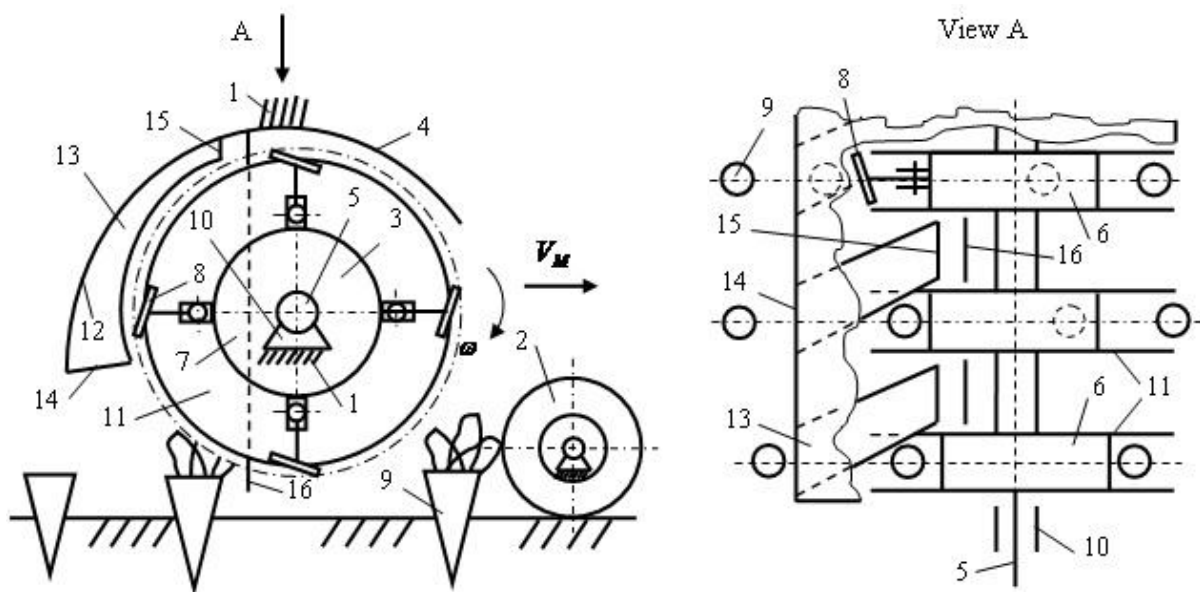
The method of harvesting involves three adjacent operations, Fig. 3b:

- cutting the main mass of the tops with chisel and with its simultaneous grinding;
- transportation of the milled tops in the guiding channels of the arcuated shell;
- stacking the milled tops between the rows of root crops to the area of the dividing plates.

Herewith the cutting of the main mass of tops and spreading the milled tops between the rows of root crops is carried out by one working body. To implement the method, we proposed an improved module for harvesting the main mass of root crops tops, Fig. 4.

The top harvesting module consists of a base 1, on which the support wheels 2 are sequentially installed, rotary top cutter 3 with a horizontal axis of rotation and an arcuated shell 4 is located at the rear and above the top part of the rotary top cutter.

The rotary top cutter is made in the form of a horizontal shaft 5 on which the sections 6 are mounted. Each section is made in the form of a roller 7, on which the chisel 8 are fixed. Each roller with a T-shaped chisels is located above a row of root crops 9. The rotary top cutter is installed in supports 10, that are mounted on base of the module. On each roller between the chisel are installed dividing plates, which are located between the rows relative to two adjacent rows of root crops. On the inner surface 12 of the arcuate shell guide channels 13 for transporting the milled tops, which have an input 14 and an output 15 throat, are installed. The hinged baffle is installed behind the output throat of each guide channel, and the output throat of each guide channel and hinged baffle is located between adjacent dividing plates. The horizontal shaft rotates at an angular velocity  $\omega$ , the direction of movement is opposite to the direction of movement of the module for harvesting the tops of root crops.



**Fig. 4. The constructive scheme of the improved module for harvesting the tops, side view:**  
**1 – base; 2- support wheel; 3 – rotary top cutter; 4 – arcuated shell; 5 – horizontal shaft of top cutter; 6 – section; 7 – roller; 8 – chisel; 9 – row of root crops; 10 – support;**  
**11 – dividing plate; 12 – inner surface of arcuated shell; 13 – guide channel; 14, 15 – input and output throat of guide channel; 16 – hinged baffle**

During movement of the harvesting module along rows, the chisels due to rotating the rotary cutter 3, cut the main mass of the tops and feed it along the path of movement to the input throat 14 of the guide channel 13. Due to T-shaped form air flow created by the rotation of the chisels, the cut and milled tops are transported along the guide channel 13 to its output throat 15, and then transported to the hinged baffle 16, where the milled tops are spreading between the rows to the location of dividing plates.

**Conclusions.** Thus, by eliminating the intermediate operation of transporting the cut and milled tops with a screw conveyor and then delivering it onto the harvested field the energy consumption for the implementation of the technological process for harvesting the main mass of the root crops tops is significantly reduced.

Therefore, a promising direction is the subsequent carrying out of in-depth theoretical and experimental studies to justify the rational parameters and operating modes of the improved top harvester module.

Complex evaluation of the parameters and operating modes of the module are prerequisites for the subsequent intensification of the energy consumption of the harvesting process for the main mass of root

crops tops, or optimization of the constructive-kinematic parameters and working conditions of the root harvester as a whole.

**References:**

1. Baranovsky V.M. Methodological and constructive-technological aspects of the development of adapted root cavity machines / V.M. Baranovsky, M.I. Pidhursky, M.R. Pankiv // Scientific Magazine. Bulletin of TNTU. – Ternopil, 2014. – Vol. 2 (74). – P. 106–113.
2. Gomenik M. Ya. Features of chicory root and agrotechnics of its cultivation / M. Ya. Gomenik // Sb. sciences works of the Ukrainian Central Bank. – K., 2003. – P. 339–341.
3. Adamchuk V. About the development and creation in Ukraine of modern agricultural machinery / V. Adamchuk, V. Bulgakov, V. Ivanyshyn // Scientific works of Vinnitsa National Agricultural University. – 2002. - Vol. 66 (11). – P. 8–14.
4. Baranovsky V.M. Through the development of adapted transport and technological systems root crop machinery: monograph / V.M. Baranovsky, M.I. Pidhursky, M.R. Pankiv, V.V. Tesljuk, V.B. Onithenko. – TNTU, Ternopil, 2014. – 402 p.
5. Bulgakov V.M. Theory of beet-lifting machines: monograph / V.M. Bulgakov, M.I. Chernovol, N.A. Sviren. – Kirovograd, 2009. – 186 p.
6. Storozhuk I.M. Pankiv V.R. (2015), Research results of harvesting haulm remnants of root crops / I.M. Storozhuk, V.R. Pankiv. // INMATEH-Agricultural Engineering, Bucharest. – 2015. - Vol. 46. – No. 2. – P. 101–108.
7. Kurilo V.L. Methodical recommendations on pre-sowing tillage and sowing of seeds of energy fodder beet / V.L. Kurilo, O.M. Ganzhenko O.B. Hivrich and others. – K., 2012. – 16 p.
8. Pogorel'y L.V. Beet harvesting machines: history, construction, theory, forecast / L.V. Pogorel'y, M.V. Tatyanko. – K.: Phoenix, 2004. – 232 p.

**Рецензенти:**

**Пилипець Михайло Ількович**, д.т.н., професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

**Головач Іван Володимирович**, д.т.н., професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України.

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017

УДК 622.331

**В.І. Бодак, М.В. Бодак, І.О. Павлова, Д.О. Сомов***Луцький національний технічний університет***ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ РІЗНИХ ФОРМ ЗАБІРНИХ ЧАСТИН ШНЕКОВИХ НАСОСІВ**

*У статті викладено результати порівняльних характеристик демпферних зон різних конструкцій забірних частин шнекових насосів. Встановлено, що для добування сапропелів слід застосовувати шнек у формі свердла, оскільки сапропелева маса не відбивається від забірної частини насоса.*

*Ключові слова:* шнековий насос, сапропель, демпферна зона, змулення, водойма.

**В.И. Бодак, М.В. Бодак, И.О. Павлова, Д.А. Сомов****ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ЗАБОРНОЙ ЧАСТИ ШНЕКОВОГО НАСОСОВ**

*В статье изложены результаты сравнительных характеристик демпферных зон различных конструкций заборных частей шнековых насосов. Установлено, что для добычи сапропелей следует применять шнек в форме сверла, поскольку сапропелевая масса не отбивается от заборной части насоса.*

*Ключевые слова:* шнековый насос, сапропель, демпферная зона, змулення, водоем.

**V. Bodak, M. Bodak, I. Pavlova, D. Somov****ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DIFFERENT FORMS OF SIDE PARTS OF MECHANICAL PUMPS**

*The article presents the results of comparative characteristics of damping zones of different designs of assembled parts of screw pumps. It is established that for the production of sapropel, a screw in the form of a drill should be used, since the sapropel mass does not affect the sampling part of the pump.*

*Keywords:* screw pump, sapropel, damping zone, formation, reservoir.

**Постановка проблеми.** На Західному Поліссі України переважають неродючі дерново-підзолисті ґрунти. Родючість цих ґрунтів можна підвищити за рахунок внесення органічних добрив, яких не вистачає. Отримати органічні добрива можна з сапропелів— органічних відкладів прісноводних водойм. Внесення сапропелевих добрив покращує структуру ґрунту, зменшує частку радіонуклідів які переходять з ґрунту в рослини. При очищенні озер від донних відкладів відбувається відновлення водного, хімічного та біологічного режимів заболочених водойм.

В останні роки очищенням водойми від сапропелів починають займатися дрібні та середні приватні підприємства, які до вибору способу добування підходять тільки з економічних міркувань. Більшість цих підприємств добувають сапропель грейферним або екскаваторним способом, так як ці способи є найдешевшими. Але вищевказані способи негативно впливають на екологію водойми, так як в процесі добування проходить інтенсивне змивання сапропелевої маси з ковша. В період проведення добувних робіт в воді проходить значне збільшення біохімічної та хімічної потреби кисню (БПК та ХПК), колірності, вмісту завислих речовин, заліза, азоту, фосфатів, міді, хрому, зменшення розчинного кисню, прозорості. Через ці причини недопустимо проведення добувних робіт серійними ковшами, особливо, на малих по площі водоймах. Добування сапропелів можливо тільки ковшами, які можуть герметично закриватись.

З метою зменшення впливу на оточуюче середовище необхідно створювати на об'єктах по добуванню сапропелів вертикальні, захисні пливочні екрани, які б відділяли зону розробки від водойми.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Добування сапропелів на даний час проводиться переважно гідромеханізованим та грейферним способами. При гідромеханізованому способі добуванні відкачується велика кількість води з водойми і сапропель отримують високої вологості. При грейферному способі добування має місце високий ступінь замулення водойми та велика кількість перевалочних операцій.

Вищезгаданих недоліків немає у шнекового способу добування сапропелів.

Створення раціональних форм і вибір параметрів забірних частин шнекових механізмів призводить до підвищення ефективності добування сапропелів.

В результаті пред'явлення високих вимог щодо екологічності шнековий спосіб добування набуває все ширшого використання [1]. При роботі шнекового насоса, просочування сапропелевої маси з закритої забірної частини незначний. Як наслідок, - значно нижчі показники вмісту

завислих речовин, розчинення у воді азоту, фосфатів, БПК, ХПК, більше розчинного кисню, менша зміна прозорості, не спостерігається у воді змін по вмісту міді, хрому, цинку, нікелю. Отже, екологічно вдалим для використання на малих та середніх по площі озерах є шнековий спосіб добування сапропелю.

**Метою дослідження** є покращення екологічних показників на місці добування при невисоких матеріальних затратах, збереженні низької собівартості продукції, та достатній для середнього бізнесу продуктивності. Екологічні переваги добування за допомогою шнекових насосів свідчать про необхідність подальших розробок цих механізмів, особливо їх забірних частин[2].

**Результати досліджень.** Нами запропоновано метод розрахунку процесу добування сапропелів механізмами шнекового типу з конічною забірною частиною, визначення їх основних параметрів, необхідного крутного моменту на валу шнека, його продуктивності та затрачуваної потужності на транспортування добутого сапропелю. В результаті використання системного підходу, розроблена багатоваріантна структура схем забірних частин шнекових механізмів, які дозволяють підвищувати ефективність роботи при добуванні сапропелів.

Екологічні переваги добування за допомогою шнекових насосів[3] свідчать про необхідність подальших розробок цих механізмів, особливо, їх забірних частин.

Для синтезу раціональних форм забірної частини було проведено аналіз її можливих конструкцій. Найвдалішими було визнано три форми конструкцій забірних частин.

При параболічній формі твірної кожухата конічній формі твірної шнека об'єм демпферної зони визначається за формулою

$$V_{\delta} = \pi h \left( \frac{h}{2k} - \frac{2}{3} D_2 \sqrt{\frac{h}{k} + \frac{D_2^2}{4} - \frac{d_2^2 + d_1^2 + d_2 d_1}{12}} \right) \quad (1)$$

Внаслідок малого об'єму демпферної зони, шнек зі змінним діаметром від  $d_1$  до  $d_2$ , при обертанні буде відбивати масу, що негативно впливає на продуктивність насоса.

При параболічній формі твірної кожуха та циліндричній формі твірної шнека об'єм демпферної зони визначається за наступною залежністю

$$V_{\delta} = \pi h \left( \frac{h}{2k} - \frac{2}{3} D_1 \sqrt{\frac{h}{k} + \frac{D_1^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right) \quad (2)$$

Робота цієї конструкції є кращою від попередньої внаслідок збільшення демпферної зони забірної частини.

Найбільш вдалою конструкцією забірної частини є конічна форма твірної кожуха та параболічна форма твірної шнека.

При конічній формі твірної кожуха та параболічній формі твірної шнека об'єм демпферної зони визначається згідно залежності

$$V_{\delta} = \pi h \left( \frac{D_2^2 + D_1^2 + D_2 D_1}{12} - \frac{h}{2k} - \frac{2d_2 \sqrt{h}}{\sqrt{k}} - \frac{d_2^2}{4} \right) \quad (3)$$

Остання конструкція забірної частини шнекового насоса є найпродуктивнішою, оскільки об'єм демпферної зони є найбільшим. Шнек, завдяки своїй формі інтенсивніше втягує сапропелю масу та не відбиває її при високих обертах.

**Висновки.** В результаті аналізу об'ємів демпферних зон встановлено, що для добування сапропелів слід застосовувати в забірній частині шнек у формі свердла, оскільки не відбувається відбивання перекачуваного матеріалу, а отже при високих обертах насоса процес замулення водойми є мінімальним.

## Література

1. Хайліс Г.А., Бодак В.І. Аналіз роботи шнекових пристроїв при добуванні сапропелів. В сб. наук.статей «Сільськогосподарські машини». ВО ІАУ, Луцьк, 1995, С.258-271.
2. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры.-М.: Машиностроение, 1972.- С.184
3. Бодак В.І. Аналіз руху сапропелю в шнековому насосі. – 2009.Наукові нотатки. Міжвуз. зб. вип.26.–Луцьк, 2009. С.10-13

Стаття надійшла до редакції 13.11.2017

УДК 667.64:678.026

**М.В. Браїло<sup>1</sup>, А.В. Букетов<sup>1</sup>, С.В. Якущенко<sup>1</sup>, Ludmila Dulebova<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна<sup>2</sup>Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ З ПОЛІПШЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ У ЗАСОБАХ ТРАНСПОРТУ**

*Досліджено вплив двокомпонентного дисперсного наповнювача на руйнівні напруженні при згинанні та теплостійкість (за Мартенсом) модифікованої епоксидно-поліефірної матриці методом математичного планування експерименту. Проведено теоретичний аналіз результатів розрахунків функціональних залежностей та отримано модель, що адекватно описує поведінку досліджуваного матеріалу. За допомогою отриманих рівнянь регресії встановлено оптимальні концентрації основного та додаткового наповнювачів у композиті для кожної властивості. Експериментально доведено, що оптимальними показниками характеризується композиція зі вмістом: слюда – 20...30 мас.ч., оксид (II) міді – 60 мас.ч.*

*Ключові слова:* композит, епоксидно-поліефірна матриця, бідисперсний наповнювач, метод математичного планування експерименту, рівняння регресії.

Рис. 6. Літ. 8

**Н.В. Браило<sup>1</sup>, А.В. Букетов<sup>1</sup>, С.В. Якущенко<sup>1</sup>, Ludmila Dulebova<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина<sup>2</sup>Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СРЕДСТВАХ ТРАНСПОРТА**

*Исследовано влияние двухкомпонентного дисперсного наполнителя на разрушительные напряжения при сгибании и теплостойкость (по Мартенсу) модифицированной эпоксидно-полиэфирной матрицы методом математического планирования эксперимента. Проведен теоретический анализ результатов расчетов функциональных зависимостей и получена модель, которая адекватно описывает поведение исследуемого материала. С помощью полученных уравнений регрессии установлены оптимальные концентрации основного и дополнительного наполнителей в композите для каждого свойства. Экспериментально доказано, что оптимальными показателями характеризуется композиция с содержанием: слюда - 20 ... 30 мас.ч., оксид (II) меди - 60 мас.ч.*

*Ключевые слова:* композит, эпоксидно-полиэфирная матрица, бидисперсный наполнитель, метод математического планирования эксперимента, уравнение регрессии.

**M. Brailo<sup>1</sup>, A. Buketov<sup>1</sup>, S. Yakushchenko<sup>1</sup>, Ludmila Dulebova<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine<sup>2</sup>Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic**THE APPLICATION OF THE METHOD OF EXPERIMENT PLANNING IN CREATING A POLYMERIC COMPOSITE WITH IMPROVED PERFORMANCE FOR ITS USE IN TRANSPORT**

*The influence of the two-component disperse filler on the destructive tensions during the flexion and heat resistance (by Martens) of the modified epoxy-polyester matrix by the method of mathematical planning of the experiment was investigated. A theoretical analysis of the results of the calculations of functional dependences is carried out and a model that adequately describes the behavior of the investigated material is obtained. With the help of the obtained regression equations, optimal concentrations of the main and additional fillers in the composite for each property were determined. It has been experimentally proved that by the optimum parameters is characterized the composite with the content: mica - 20...30 mas.fr., Copper oxide (II) - 60 mas.fr.*

*Keywords:* composite, epoxy-polyester matrix, bidisperse filler, method of mathematical planning of the experiment, regression equation.

**Постановка проблеми.** Створення конструкційних полімерних матеріалів, з наперед відомим комплексом властивостей, є важливим завданням при поліпшенні технічних та експлуатаційних характеристик засобів транспорту, у тому числі морського та річкового, які працюють в умовах впливу агресивного середовища і значних знакозмінних навантажень [1, 2]. При розробленні композитного матеріалу встановлення необхідних фізико-механічних, теплофізичних властивостей, які б задовольняли критерії до кінцевого продукту, супроводжується значними економічними та часовими затратами. Одним із способів зменшення вищезазначених параметрів є застосування математичної моделі, яка достовірно описує характеристики



досліджуваного матеріалу з різними змінними факторами. Для ефективного проведення експериментальних досліджень, мінімізації відхилень експериментальних даних і розрахункових значень доцільним є використання методу ортогонального центрального композиційного планування експерименту [3,4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальновідомо [5], що дієвим методом підвищення показників властивостей композитних матеріалів (КМ) на основі полімерної матриці є введення у зв'язувач різних за природою та дисперсністю наповнювачів. Актуальними є дослідження епоксидно-поліефірної матриці, наповненої частками різної природи і дисперсності. На попередньому етапі нами було досліджено вплив наповнювачів слюда та оксид (II) міді на когезійні властивості КМ. Встановлено оптимальний вміст дрібнодисперсних (8...10 мкм) та дисперсних (20...40 мкм) часток наповнювачів різної природи для виготовлення захисних покриттів різного функціонального призначення. Одночасне поєднання наповнювачів різної дисперсності забезпечує рівномірний розподіл часток в об'ємі зв'язувача і створення матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Застосування методу математичного планування дозволяє встановити сукупність впливу незалежно розподілених наповнювачів та визначити їх концентрації у розробленій модифікованій епоксидно-поліефірній матриці.

**Мета роботи** – використовуючи метод ортогонального центрального композиційного планування експерименту, встановити оптимальний вміст двокомпонентного наповнювача різної фізичної природи і дисперсності для формування КМ з поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Використовували активний експеримент і досліджували руйнівні напруження при згинанні та теплостійкість за (Мартенсом) КМ з двокомпонентним наповнювачем, що містить різні за природою та дисперсністю частки. Вміст двокомпонентного наповнювача у вигляді основних та додаткових часток вибрано на основі попередніх результатів досліджень когезійних властивостей КМ. У табл. 1 наведено основні діапазони вмісту інгредієнтів, які вводили у епоксидно-поліефірний зв'язувач для отримання КМ з поліпшеними руйнівними напруженнями при згинанні та теплостійкістю. Це, зокрема: слюда марки МС-20-80 з дисперсністю 20...40 мкм – основний наповнювач. Мінеральний склад: слюда-мусковіт  $KAl_2[(OH, F)_2AlSi_3O_{10}]$ , хімічний склад згідно з ТУ 5725-005-40705684-2001: оксид кремнію ( $SiO_2$ ) – 44...50 %, оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ ) – 27...35 %, оксид заліза ( $Fe_2O_3$ ) – менше 5 %, оксид магнію ( $MgO$ ) – менше 2 %, оксид калія ( $K_2O$ ) – більше 8 %, водорозчинні солі – менше 0,2 %. Додатковий наповнювач – оксид міді (Cu (II) оксид). Це бінарна неорганічна сполука з хімічною формулою CuO, амфотерний оксид двовалентного Cu з дисперсністю 8...10 мкм.

Таблиця 1

Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, $q$ , мас.ч.	Крок варіювання, $\Delta q$ , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
Основний наповнювач – слюда	$x_1$	30	10	20	30	40
Додатковий наповнювач – оксид (II) міді	$x_2$	40	20	20	40	60

Відповідно до схеми планування експерименту було проведено 9 дослідів ( $N = 9$ ), кожний з яких повторювали тричі ( $p = 3$ ) з метою виключення системних помилок (табл. 2). Для того, щоб матриця планування була ортогональною [6], вводили коректовані значеннями рівня  $x'_i$ , які обчислювали за формулою:

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



Розширену матрицю планування повного факторного експерименту (ПФЕ) та його результати наведено у табл. 3.

Таблиця 2

Схема планування експерименту

№ Дослід (u)	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3 = x_1^2 - d$	$x_4 = x_2^2 - d$	$x_1 x_2$
1	1	-1	-1	0,33	0,33	+1
2	1	+1	-1	0,33	0,33	-1
3	1	-1	+1	0,33	0,33	-1
4	1	+1	+1	0,33	0,33	+1
5	1	0	0	-0,67	-0,67	0
6	1	+1	0	0,33	-0,67	0
7	1	-1	0	0,33	-0,67	0
8	1	0	+1	-0,67	0,33	0
9	1	0	-1	-0,67	0,33	0
$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2$	9	6	6	2	2	4

Таблиця 3

Результати дослідження руйнівних напружень при згинанні та теплостійкості КМ

№ дослід	Вміст компонентів, q, мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{3z}$ , МПа	Теплостійкість (за Мартенсом), T, К
	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$
1	20	20	38,9	341
2	40	20	41,2	344
3	20	60	45,5	354
4	40	60	43,6	347
5	30	40	44,2	348
6	40	40	40,4	343
7	20	40	43,1	346
8	30	60	48,3	357
9	30	20	44,4	349

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (2)$$

Коефіцієнти регресії визначали за формулою:

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

Таблиця 4

Коефіцієнти рівняння регресії

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
44,91	-0,38	2,15	-3,52	1,08	-1,05

У результаті при аналізі руйнівних напружень при згинанні отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 44,91 - 0,38x_1 + 2,15x_2 - 3,52x_1^2 + 1,08x_2^2 - 1,05x_1x_2.$$

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

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

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

$m$  – кількість паралельних дослідів;

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

Дисперсії адекватності визначали за формулою:

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

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

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

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

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

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

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

Значення дисперсій наведено у табл. 5.

Таблиця 5

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

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{u1}^2$	0,84	$\sigma^2\{y\}_1$	1,68
2	$S_{u2}^2$	0,91	$\sigma^2\{y\}_2$	1,82
3	$S_{u3}^2$	2,11	$\sigma^2\{y\}_3$	4,22
4	$S_{u4}^2$	0,84	$\sigma^2\{y\}_4$	1,68
5	$S_{u5}^2$	0,31	$\sigma^2\{y\}_5$	0,62
6	$S_{u6}^2$	0,57	$\sigma^2\{y\}_6$	1,14
7	$S_{u7}^2$	0,04	$\sigma^2\{y\}_7$	0,08
8	$S_{u8}^2$	0,84	$\sigma^2\{y\}_8$	1,68
9	$S_{u9}^2$	0,49	$\sigma^2\{y\}_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 6,95$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,77$$

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

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

$$G_{розр} = \frac{2,11}{6,95} = 0,304$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [7] для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів:  $S_{u_{\max}}^2 = 2,11$ . Розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,304$ .

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

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розр} = 0,304 \leq G_{табл} = 0,478.$$

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

Таблиця 6

### Експериментальні результати дослідження руйнівних напружень при згинанні матеріалів

№ досліду	Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{3z}$ , МПа			Середнє значення, $\sigma_{3z}$ , МПа
	1	2	3	
1	37,9	39,7	39,1	38,9
2	41,8	40,1	41,7	41,2
3	44,1	45,4	47	45,5
4	42,6	43,8	44,4	43,6
5	43,7	44,8	44,1	44,2
6	39,6	40,5	41,1	40,4
7	43,3	42,9	43,1	43,1
8	49,3	48,1	47,5	48,3
9	44,1	45,2	43,9	44,4

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

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

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента [7,8]. При цьому визначали табличний ( $t_m$ ) і розрахунковий критерій ( $t_p$ ) критерію Стьюдента (табл. 7).

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

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

Причому:

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

Таблиця 7

### Дисперсії коефіцієнтів регресії ( $S_b^2$ ) і розрахункові значення критерію Стьюдента ( $t_p$ )

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умвне позначення	Значення	Умвне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,086	$t_{0p}$	148,39
2	$S_{b_1}^2$	0,129	$t_{1p}$	1,07
3	$S_{b_2}^2$	0,129	$t_{2p}$	5,99

4	$S_{b_{11}}^2$	0,386	$t_{11p}$	5,66
5	$S_{b_{22}}^2$	0,386	$t_{22p}$	1,74
6	$S_{b_{12}}^2$	0,193	$t_{12p}$	2,4

Розрахункові значення критерію Стюдента  $t_{0p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{12p}$  є більшими від  $t_T$ , тому вважали, що коефіцієнти рівняння регресії є значущими. Значення  $t_{1p}, t_{22p}$  є меншим від  $t_T$ , тому коефіцієнти  $b_1$  і  $b_{22}$  не є значущими. В результаті відкидання незначущих коефіцієнтів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 44,91 + 2,15x_2 - 3,52x_1^2 - 1,05x_1x_2$$

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

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

де  $S_{u \max}^2 = 2,11$  – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5);

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

$S_y^2 = 0,772$  – дисперсія відтворення;

Тоді:  $F_p = 2,73$ .

$F_{(0,05; f_{ao}; f_u)}$  – табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості ( $f_l = N - (k + 1) = 9 - (4 + 1) = 4, f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$ ). Тоді:  $F_{(0)} = 2,93$  [7, 8].

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

Процес інтерпретації отриманої математичної моделі, як правило, не зводиться тільки до визначення впливу факторів. Просте порівняння за абсолютною величиною лінійних коефіцієнтів не визначає відносну ступінь впливу факторів, оскільки при цьому присутні ще й квадратичні члени та парні взаємодії. При детальному аналізі отриманої адекватної моделі потрібно враховувати і те, що для квадратичної моделі ступінь впливу фактора на зміну вихідної величини не є постійним.

Залежності, що пов'язують нормалізовані і натуральні значень змінних факторів, мають наступний вигляд:

$$x_i = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i} \quad (13)$$

де:  $q_i$  - значення  $i$ -го фактора експерименту,  $q_{i0}$  - значення нульового рівня,  $\Delta q_i$  - інтервал варіювання [8].

Підставивши дані значення згідно формули (13) у рівняння регресії і провівши його перетворення, отримали наступне рівняння регресії з натуральним значенням змінних параметрів:

$$\sigma_{3z} = 2,63 + 2,322q_1 + 0,265q_2 - 0,0352q_1^2 - 0,00525q_1q_2$$

Наведене рівняння в натуральних значеннях дозволяє лише передбачити значення вихідної величини для будь-якої точки в середині області варіювання факторів. Однак, з його допомогою можна побудувати графіки залежності вихідної величини (руйнівних напружень при згинанні композитів) від будь-якого фактору (чи двох факторів). Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 1-3.

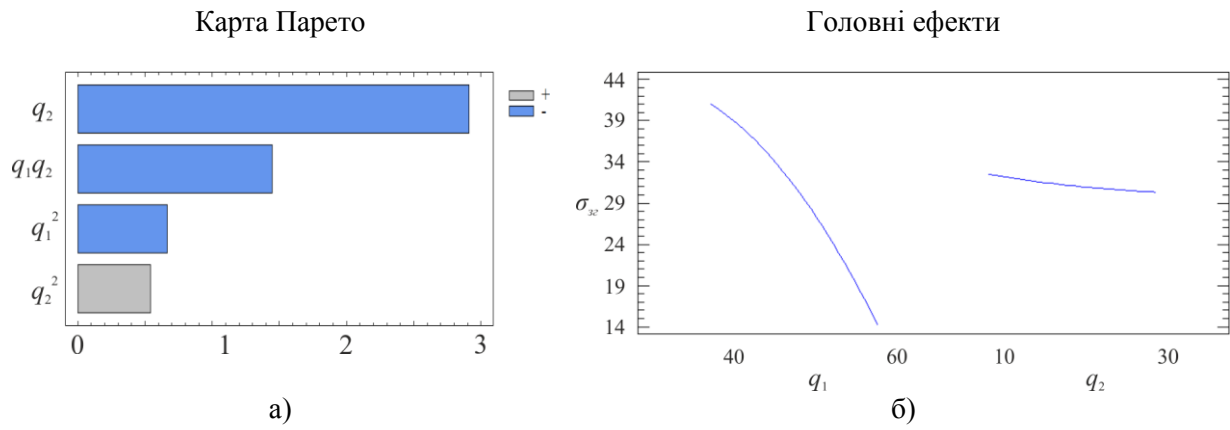


Рис. 1. Карта Парето (а) і головні ефекти  $\sigma_{3z}$  (б)

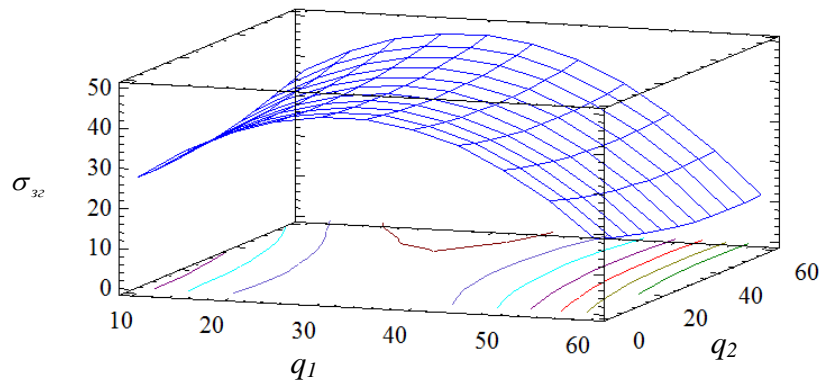


Рис. 2. Поверхня відгуку  $\sigma_{3z} = f(q_1, q_2)$

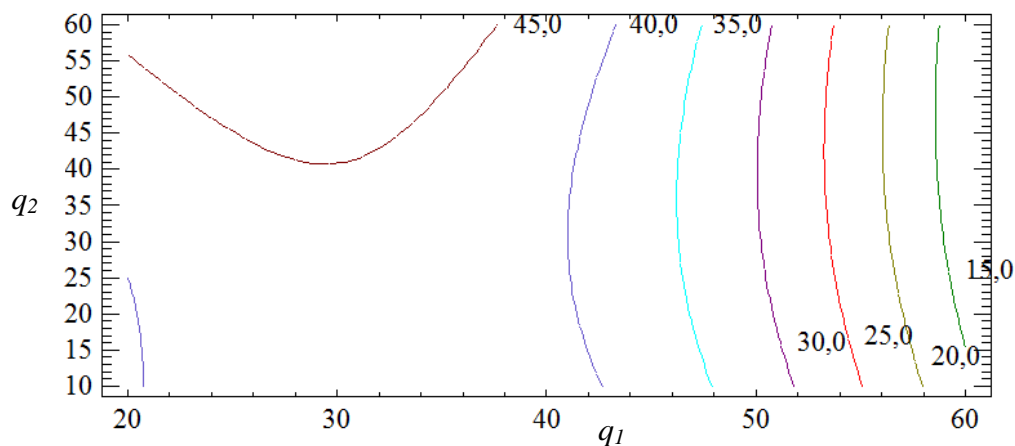


Рис. 3. Контурний графік

На основі експериментальних досліджень доведено, що обидва фактори є значущими. Встановлено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні відрізняється епоксидно-поліефірний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – слюда (20...30 мас.ч.), додатковий наповнювач – оксид (II) міді (60 мас.ч.). Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

Аналогічно до наведеної вище схеми розрахунків оптимізували склад композиції за показниками теплостійкості за Мартенсом. Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах та схема планування експерименту вибрано згідно табл. 1 і табл. 2.

При аналізі результатів дослідження теплостійкості композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 8).

Таблиця 8

**Коефіцієнти рівняння регресії для модуля пружності при згинанні**

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
349,33	-1,17	4,00	-5,50	3,00	-2,50

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 349,33 - 1,17x_1 + 4x_2 - 5,5x_1^2 + 3x_2^2 - 2,5x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [7].

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

Таблиця 9

**Значення дисперсії адекватності ( $S_u^2$ ) і дисперсії відтворення ( $\sigma^2(y)$ )**

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

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 13$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 1,444$$

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

$$G_p = \frac{3}{13} = 0,231$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [7] для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на  $i$ -му поєднанні рівнів факторів:  $S_{u \max}^2 = 3$ . Розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,231$ .

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

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,231 \leq G_{табл} = 0,478$$

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

Таблиця 10

## Експериментальні результати дослідження теплостійкості КМ

№ досліду	Теплостійкість (за Мартенсом) $T$ , К			Середнє значення, $E$ , ГПа
	1	2	3	
1	340	341	342	341
2	345	343	344	344
3	353	354	355	354
4	348	346	347	347
5	348	347	349	348
6	344	341	344	343
7	348	345	345	346
8	357	356	358	357
9	348	349	350	349

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 11) за формулами (9-10). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить  $t_T = 2,1$  [6, 8]. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 11.

Таблиця 11

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

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,160	$t_{0p}$	865,32
2	$S_{b_1}^2$	0,241	$t_{1p}$	2,38
3	$S_{b_2}^2$	0,241	$t_{2p}$	8,15
4	$S_{b_{11}}^2$	0,722	$t_{11p}$	6,47
5	$S_{b_{22}}^2$	0,722	$t_{22p}$	3,53
6	$S_{b_{12}}^2$	0,361	$t_{12p}$	4,20

Розрахункові значення критерію Стьюдента  $t_{0p}$ ,  $t_{1p}$ ,  $t_{2p}$ ,  $t_{11p}$ ,  $t_{22p}$ ,  $t_{12p}$  є більшими від  $t_T$ , тому вважали, що всі коефіцієнти рівняння регресії є значущими. В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 349,33 - 1,17x_1 + 4x_2 - 5,5x_1^2 + 3x_2^2 - 2,5x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [6, 8].

Розрахункове значення дисперсії адекватності:  $S_{u_{\max}}^2 = 3$  (табл. 9).

Дисперсія відтворення:  $S_y^2 = 1,444$ .

Тоді:  $F = 2,077$ .

$F_{(0,05; f_T; f_u)}$  – табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості ( $F_{(0,05)} = 3,55$ ) [6, 8].

Розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (11). Отже, рівняння адекватно описує склад композиції.

Провівши перетворення згідно формули (13), отримали наступне рівняння регресії з натуральним значенням змінних параметрів:

$$T = 292,34 + 3,683q_1 - 0,025q_2 - 0,055q_1^2 + 0,0075q_2^2 - 0,0125q_1q_2$$

Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 4-6.

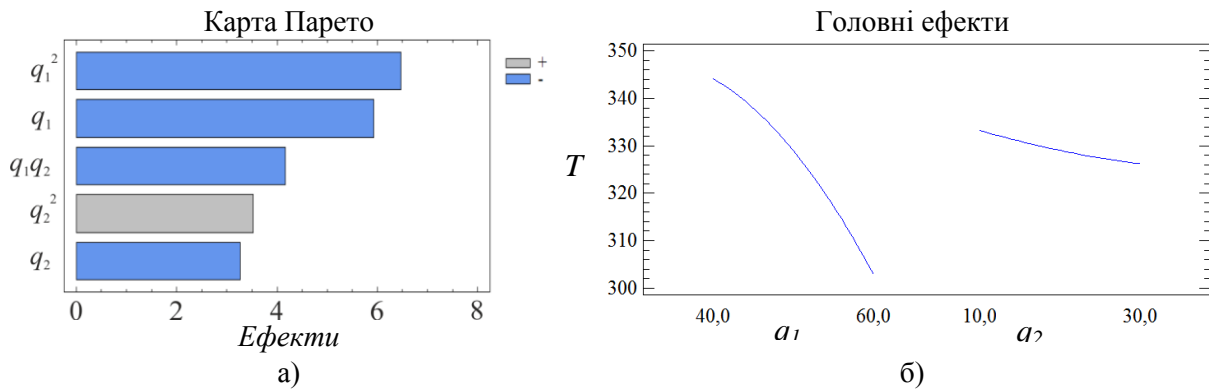


Рис. 4. Карта Парето (а) і головні ефекти  $T$  (б)

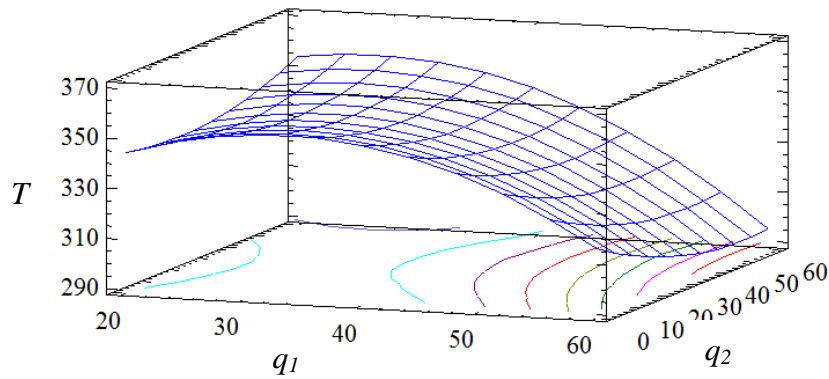


Рис. 5. Поверхня відгуку  $T = f(q_1, q_2)$

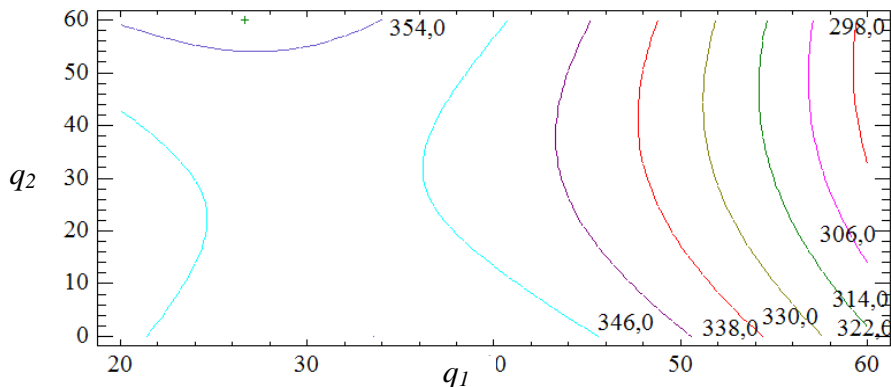


Рис. 6. Контурний графік

На основі експериментальних досліджень доведено, що обидва фактори є значущими. При цьому встановлено (табл. 3), що максимальними показниками теплостійкості за Мартенсом характеризується епоксидно-поліефірний композит з двокомпонентним дисперсним наповнювачем наступного складу: основний наповнювач – слюда (20...30 мас.ч.), додатковий наповнювач – оксид (II) міді (60 мас.ч.). Збільшення вмісту часток оксид (II) міді понад 60 мас.ч. не є доцільним з технологічної точки зору формування композитних матеріалів. Такий склад композиції доцільно використовувати для формування матеріалу з поліпшеними теплофізичними властивостями.

**Висновки.** Методом ортогонального центрального композиційного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного дисперсного наповнювача у епоксидно-поліефірному композиті з поліпшеними когезійними властивостями. Композицію слід формувати наступного складу: епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), поліефірна смола ENYDYNE H 68372 TAE (10 мас.ч.), твердник ПЕПА (10 мас.ч.), твердник Butanox-M50 (1,5 мас.ч.), модифікатор MDI (0,25 мас.ч.), основний наповнювач – слюда (20...30 мас.ч.), додатковий наповнювач – оксид (II) міді (60 мас.ч.). Такий матеріал відрізняється наступними



властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{zc} = 45,5 \dots 48,3$  МПа, показники теплостійкості –  $T = 354 \dots 357$  К.

На наступному етапі заплановано дослідити триботехнічні властивості розроблених матеріалів.

Автори висловлюють щире подяку за можливість мобільності та за фінансову підтримку під час дослідницької роботи у Technical University of Košice (Slovak Republic) згідно Національної стипендіальної програми Словацької Республіки (National Scholarship Programme of the Slovak Republic – SAIA Programmes).

### Список літератури

1. Duleba Branislav, Greškovič František, Dulebová Ludmila, Jachowicz Tomasz. Possibility of Increasing the Mechanical Strength of CarbonEpoxy Composites by Addition of Carbon Nanotubes // Materials Science Forum : Surface Engineering and Materials in Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 818. – P. 299-302.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учебное пособие / [Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др.]; под. общ. ред. А.А. Берлина. – М: Профессия, 2008. – 557 с.
3. Букетов А.В. Применение методов математической статистики для оптимизации состава защитных покрытий / А.В. Букетов, А.В. Акимов, В.Д. Нигалатий, Н.В. Браило, Аль-Джавахири Али Андан Мансур // Вестник Карагандинского государственного университета. – 2017. – №1 (85). – С. 17-27.
4. Сапронов О.О. Оптимізація складу захисного покриття методом математичного планування експерименту // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ. – 2013. – № 43. – Ч. II. – С. 260-267.
5. Chawla, Krishan Kumar. Composite materials: science and engineering / Krishan K. Chawla. – 2<sup>nd</sup> ed. – Springer New York, 1998. – 483 p.
6. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи): учебн.[для студ. высш.учеб.завед.]. – К.:Вища школа,1976. – 184 с.
7. Грушко И.М., Попов В.В. и др.; Под ред. Крутова В.И., Попова В.В. Основы научных исследований: Учебник для технических вузов – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.
8. Математические методы планирования эксперимента / под ред. Пененко В.В. – Новосибирск: Наука, 1981. – 250 с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017

УДК: 667.64:678.026

А.В. Букетов, В.Г. Кулініч, С.О. Сметанкін, В.А. Андрійчук, В.Л. Алексенко

*Херсонська державна морська академія***ВПЛИВ МОДИФІКАТОРУ  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  НА АДГЕЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ**

Для регулювання властивостей та структури полімерів та полімерних композитів одним із оптимальних способів є їхня фізична модифікація. Відомо, що покращення, або погіршення тих або інших властивостей матеріалу можливо досягти за допомогою введення у сполучне пластифікаторів, наповнювачів, та інших домішок. Вагомих результатів для поліпшення адгезійних властивостей композитних матеріалів можливо досягти за допомогою модифікації активною домішкою навіть у незначній кількості.

У роботі досліджували вплив модифікатора  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  (КГХН) на адгезійні властивості епоксидних композитів, а саме – адгезійну міцність на розривання та зсув, а також залишкові напруження. У процесі експерименту було встановлено, що введення в епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) модифікатора КГХН у кількості  $q = 0,25$  мас.ч. призводить до формування матеріалу із наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві від сталльної основи марки Ст 3 –  $\sigma_a = 17,7$  МПа, адгезійна міцність при зсуві сталльної основи марки Ст 3 –  $\tau = 8,9$  МПа. Залишкові напруження  $\sigma_{ocm} = 1,10$  Мпа модифікованих покриттів при концентрації КГХН  $q = 0,50$  мас.ч.

Проведений порівнювальний аналіз результатів вихідної матриці (контрольного зразку) і модифікованих матеріалів показав, що введення даного модифікатора суттєво погіршує адгезійні властивості матеріалу. Показано, що даний модифікатор не доцільно використовувати в якості добавки, яка покращує адгезійні властивості композитних матеріалів.

**Ключові слова:** композиційні матеріали, адгезійні властивості, матриця, модифікатор.

**А.В. Букетов, В.Г. Кулинич, С.А. Сметанкин, В.А. Андрейчук, В.Л. Алексенко**  
**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРА  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ**

Для регулирования свойств и структуры полимеров и полимерных композитов одним из оптимальных способов является их физическая модификация. Известно, что улучшения либо ухудшения тех или иных свойств материала возможно достигнуть с помощью введения в связующее пластификаторов, наполнителей и прочих добавок. Существенных результатов для улучшения адгезионных свойств композитных материалов возможно добиться с помощью модификации активной добавкой даже в незначительном количестве.

В работе исследовали влияние модификатора  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  (КГХН) на адгезионные свойства эпоксидных композитов, а именно - адгезионная прочность на разрыв и при сдвиге, а также остаточные напряжения. В процессе эксперимента было установлено, что введение в эпоксидный олигомер ЭД-20 (100 масс.ч.) модификатора КГХН в количестве  $q = 0,25$  масс.ч. приводит к формированию материала со следующими свойствами: адгезионная прочность при отрыве от сталльной основы марки Ст 3 –  $\sigma_a = 17,7$  МПа, адгезионная прочность при сдвиге сталльной основы марки Ст 3 –  $\tau = 8,9$  МПа. Остаточные напряжения  $\sigma_{ocm} = 1,10$  МПа модифицированных покрытий при концентрации КГХН  $q = 0,50$  масс.ч.

Проведенный сравнительный анализ результатов исходной матрицы (контрольного образца) и модифицированных материалов показал, что введение данного модификатора существенно ухудшает адгезионные свойства материала. Показано, что данный модификатор не целесообразно использовать в качестве добавки, улучшающей адгезионные свойства композитных материалов.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, адгезионные свойства, матрица, модификатор.

**A.V. Buketov, V.G. Kulinich, S.A. Smetankin, V.A. Andreychuk, V.L. Aleksenko**  
**THE INFLUENCE OF THE  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  MODIFIER ON THE ADHESIVE CHARACTERISTICS OF EPOXY MATRIX**

For polymers and polymer composites structure and characteristics regulation one of the best ways is it's physical modification. It is well known, that improvement, or deterioration of material's characteristics is possible to achieve by filling the matrix by plasticizers, fillers and other extrudants. Significant results for adhesive characteristics of composite materials is possible to improve by modification with active extrudant even in small quantity.

In work it was explored an influence of the modifier  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  (KGHN) on adhesive characteristics of epoxy composites, more specifically – adhesive strength of bruise and shifting, also frozen-in stresses. During experiment it was established, that filling the epoxy oligomer ED-20 (100 mass fr.) by KGHN modifier in quantity  $q = 0.25$  mass fr. is forming the material with the following characteristics: adhesive strength of bruise from steel foundation St-3  $\sigma_a = 17,7$  MPa, adhesive strength of shift of steel foundation St-3  $\tau = 8,9$  MPa. Frozen-in stresses  $\sigma_{ocm} = 1,10$  MPa of modified surfaces with KGHN concentration  $q = 0.50$  mass.fr.

Comprehensive result's analyses of initial matrix (control specimen) has shown, that using of current modifier makes significant deterioration of material's adhesive characteristics. It was shown, that current modifier is not preferred, as an extrudant, which composite materials adhesive characteristics.

**Key words:** composite materials, adhesive characteristics, matrix, modifier.

**Постановка проблеми.** Различные отрасли техники постоянно развиваются, что вызывает ряд потребностей, сводящихся к созданию новых материалов для конструкций и разнообразных деталей с повышенными эксплуатационными свойствами. Это возможно осуществить с помощью изготовления композиционных материалов (КМ) на полимерной основе. В мире современных технологий существует постоянная необходимость создания новых и улучшенных КМ, которые обладают хорошим соотношением цены и качества. Изделия из эпокси-компози-тов широко используют в различных областях промышленности. Преимуществами таких компози-тов является их достаточно высокая износостойкость, например, при трении в агрессивных средах, повышенные физико-механические свойства, и в то же время относительная простота формирования изделия. Также, благодаря высоким адгезионным и антикоррозионным свойствам покрытия на их основе используют в химической, газотранспортной, нефтеперерабатывающей и различных других промышленности [1]. Одним из способов формирования подобных материалов является их модифицирование различными добавками, с помощью чего задаются требуемые технические параметры материалов [2-4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Среди существующих полимеров можно отдельно выделить материалы на основе эпоксидного связующего, так как они обладают комплексными улучшенными характеристиками [5, 7]. Для улучшения свойств материалов на основе эпоксидной матрицы используют разнообразные модификаторы и наполнители, отличающиеся физической природой и дисперсностью [6-11]. Улучшенные свойства КМ приводят к увеличению межремонтного периода эксплуатации, в свою очередь обеспечивая экономию материалов и средств на их производства. Поэтому важно разрабатывать КМ с улучшенными эксплуатационными свойствами.

**Цель работы** – исследовать влияния модификатора  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  на адгезионные свойства эпоксидной матрицы к стальной основе марки Ст 3.

**Материалы и методика исследования.** В качестве матрицы использовали эпоксидную диановую смолу марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84). Для сшивания эпоксидных композиций в качестве отвердителя применяли полиэтиленполиамин ПЭПА (ТУ 6-05-241-202-78). Данный отвердитель позволяет полимеризовать композиции при обычной комнатной температуре. Для предполагаемого улучшения эксплуатационных характеристик композиции использовали модификатор со следующей химической формулой –  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  (КГХН) (карбон-13-водород-12-хлор-2-нитроген-2). Модификатор вводили в матрицу в следующем диапазоне концентраций:  $q = 0,10 \dots 2,0$  масс.ч. Структурная формула КГХН выглядит следующим образом (рис. 1):

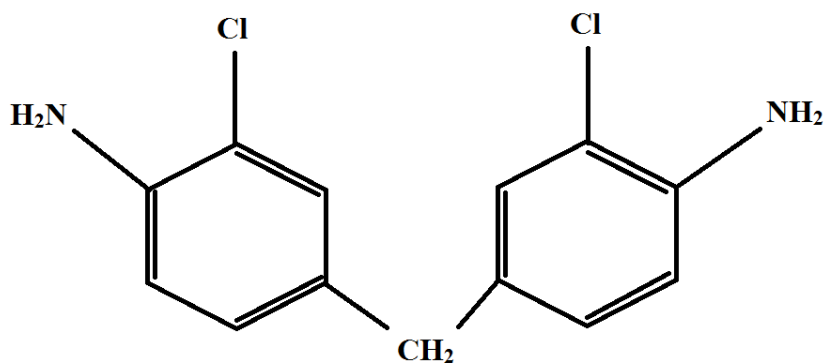


Рис. 1. Структурная формула модификатора  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$

Эпоксидный КМ формировали по следующей технологии: предварительное дозирование эпоксидной диановой смолы ЭД-20, подогрев смолы до температуры  $T = 353 \pm 2$  К и ее выдержка при данной температуре в течение времени  $\tau = 20 \pm 0,1$  мин; дозирование модификатора и дальнейшее введение его в эпоксидный олигомер; гидродинамическое совмещение олигомера ЭД-20 и модификатора в течение времени  $\tau = 1 \pm 0,1$  мин; ультразвуковая обработка (УЗО) композиции в течение времени  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  мин; охлаждение композиции до комнатной температуры в течение времени  $\tau = 60 \pm 5$  мин; введение отвердителя ПЭПА и перемешивание композиции в течение времени  $\tau = 5 \pm 0,1$  мин. В дальнейшем формировали КМ по экспериментально установленным режимам: формирование образцов и их выдерживание в течение времени  $\tau = 12,0 \pm 0,1$  ч при температуре  $T = 29 \pm 2$  К, нагрев со скоростью  $v = 3$  К/мин до температуры  $T = 393 \pm 2$  К, выдерживание КМ в течение времени  $\tau = 2,0 \pm 0,05$  ч, медленное охлаждение до температуры

$T = 293 \pm 2$  К. С целью стабилизации структурных процессов в КМ образцы выдерживали в течение времени  $\tau = 24$  ч на воздухе при температуре  $T = 293 \pm 2$  К с последующим проведением экспериментальных испытаний.

Экспериментальная часть:

1. Адгезионная прочность к стальной основе ( $\sigma_a$ , МПа) была исследована методом грибков - равномерным разрывом пары склеенных образцов согласно ГОСТ 14760-69 на автоматизированной разрывной машине УМ-5 со скоростью нагрузки  $v = 10$  Н/с (рис.1)[11]. Диаметр рабочей части стальных образцов при разрыве составляет  $d = 25 \pm 0,1$  мм.

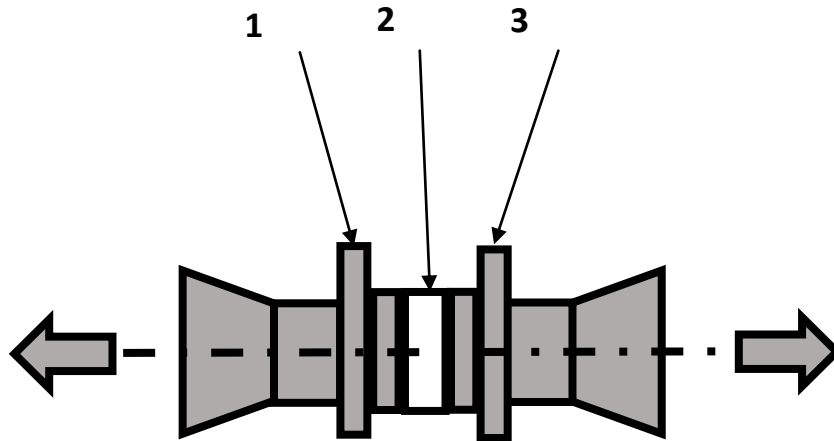


Рис.2 Исследование адгезионной прочности композитов на разрыв:  
1, 3 – основание, 2 – композиция

2. Адгезионная прочность при сдвиге (рис.3) [11] исследовали согласно ГОСТ 14759-69.

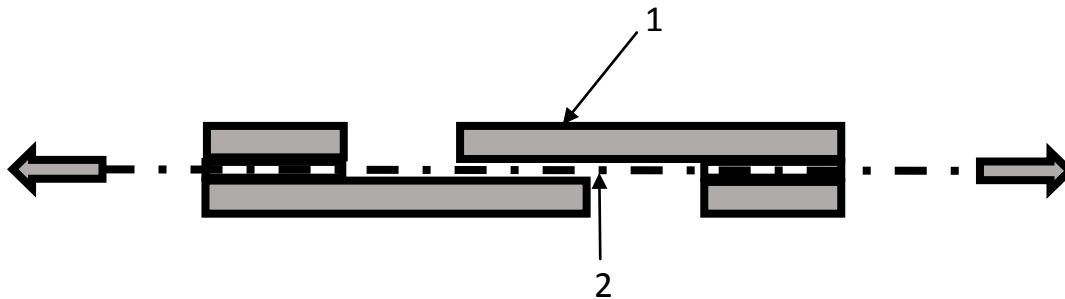


Рис.3. Исследование адгезионной прочности композитов на сдвиг:  
1 – основание, 2 – композиция

**Результаты исследования и их обсуждение.** Экспериментально установлено, что адгезионная прочность при отрыве исходной эпоксидной матрицы к стальной основе марки Ст 3 (контрольные образцы) составляет:

- нормальные напряжения:  $\sigma_a = 24,8$  МПа;
- тангенциальные напряжения  $\tau = 8,5$  МПа.

Введение в эпоксидный олигомер модификатора КГХН в количестве  $q = 0,10$  масс.ч. приводит к существенному уменьшению от  $\sigma_a = 24,8$  МПа до  $\sigma_p = 14,9$  МПа показателей адгезионной прочности при отрыве КМ от стальной основы марки Ст 3. Дальнейшее введение модификатора в количестве  $q = 0,25 \dots 0,50$  масс.ч. позволяет незначительно повысить показатели адгезионной прочности до  $\sigma_a = 17,5 \dots 17,7$  МПа. Последующее увеличение концентрации модификатора до  $q = 1,00$  масс.ч. приводит к снижению показателей адгезии до  $\sigma_a = 15,2$  МПа.

Формирование КМ с содержанием КГХН в количестве  $q = 1,25$  масс.ч. обеспечивает создание материала с максимальными показателями адгезионной прочности при разрыве ( $\sigma_a = 20,6$  МПа). Однако, этот показатель является меньшим, чем экспериментально установленные значения

для исходной эпоксидной матрицы (контрольной точки) – 24,8 МПа. Это свидетельствует о том, что структурные элементы модификатора активно взаимодействуют как с эпоксидным связующим, так и с металлической основой. Считали, что именно наличие модификатора ослабляет влияние сил межмолекулярного взаимодействия на границе раздела фаз «полимер - модификатор», «полимер - стальная основа марки Ст 3».

Последующее введение модификатора в количестве  $q = 1,50 \dots 2,00$  масс.ч. также приводит к существенному снижению результатов до  $\sigma_a = 14,6 \dots 15,5$  МПа относительно исходной матрицы.

Зависимость адгезионной прочности КМ при сдвиге от количества модификатора показала аналогичную тенденцию. В частности, при введении модификатора КГХН при содержании  $q = 0,10$  масс.ч. наблюдали существенное ухудшение показателей адгезионной прочности при сдвиге от  $\tau = 8,5$  МПа (для исходной матрицы) до  $\tau = 4,2$  МПа. Дальнейшее увеличение концентрации модификатора не привело к улучшению результатов, а лишь показало скачкообразный и неравномерный характер влияния модификатора на свойства эпоксидного связующего относительно концентрации добавки. При последующем введении модификатора в количестве  $q = 0,25; 1,00$  и  $2,00$  масс.ч. показатели адгезионной прочности при сдвиге наблюдали в пределах статистической погрешности (фактически не изменились) по сравнению с исходной матрицей и составляют  $\tau = (8,5 \dots 8,9) \pm 0,4$  МПа. Композиты с количеством вводимой добавки –  $q = 0,50; 1,25$  и  $1,50$  масс.ч. показали наихудшие результаты с существенно пониженной адгезионной прочностью при сдвиге соответственно:  $\tau = 6,2; 5,7; 5,5$  МПа.

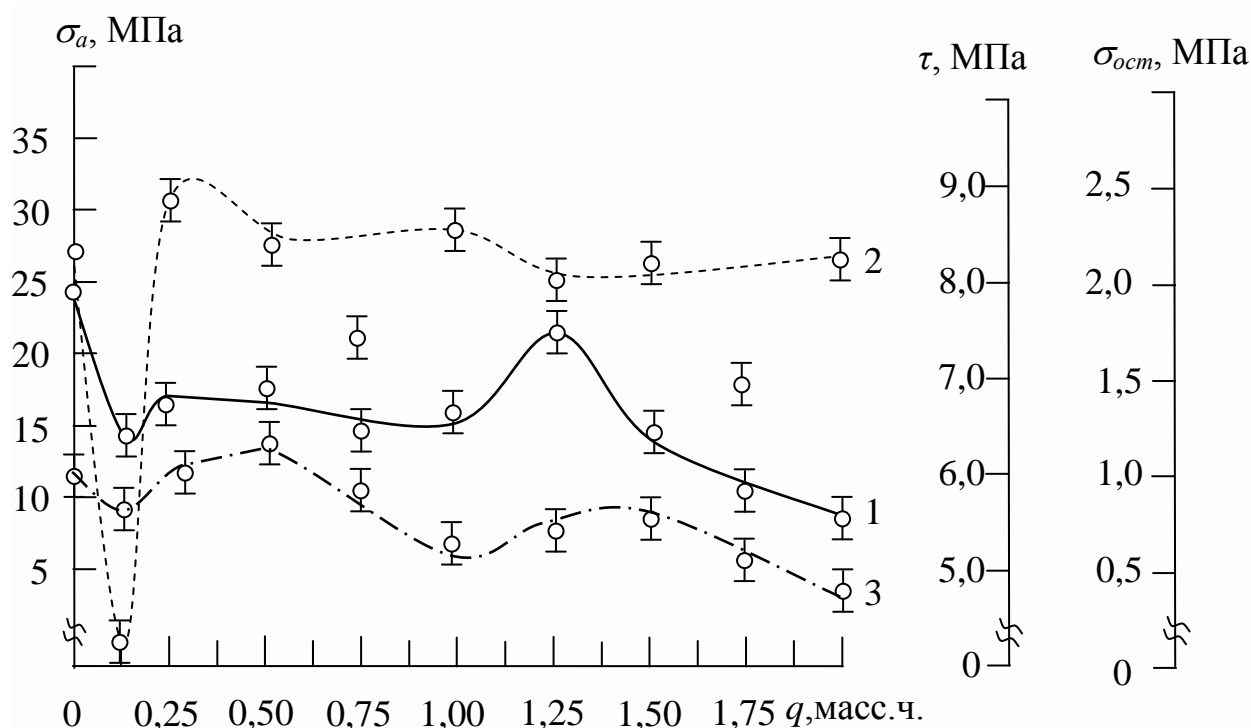


Рис. 3. Зависимость адгезионной прочности и остаточных напряжений КМ от содержания модификатора КГХН ( $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$ ): 1 – адгезионная прочность при разрыве ( $\sigma_a$ ); 2 – адгезионная прочность при сдвиге ( $\tau$ ); 3 – остаточные напряжения ( $\sigma_{ост}$ ). Материал основы - сталь марки Ст 3.

Известно [12], что прочность клеевых соединения существенно зависит от величины и характера распределения внутренних (остаточных) напряжений, возникающих при формировании клеевого соединения. Эти напряжения, как и внешние механические усилия, прикладываемые к клеевому соединению, снижают энергию активации разрушения клеевого соединения. Поэтому не менее важным с практической и теоретической точки зрения является экспериментальное исследование остаточных напряжений в структуре модифицированных композитных материалов.

При введении модификатора КГХН в количестве  $q = 0,10$  масс.ч. остаточные напряжения снижаются, относительно показателей матрицы (1,4 МПа) до 0,89 МПа. В данном случае следует

подчеркнуть, что кривая адгезионной прочности на разрыв (рис. 1, кривая 1) и адгезионной прочности на сдвиг (рис.1, кривая 2) также демонстрирует схожую тенденцию, что говорит о некой корреляции полученных результатов. Дальнейшее введение КГХН в количестве  $q = 0,25 \dots 0,50$  масс.ч. привело к незначительному повышению результатов остаточных напряжений в КМ и составляет  $\sigma_{ост} = 1,05 \dots 1,10$  МПа. Отметим, что данный диапазон введённого модификатора приводит к существенному снижению адгезионной прочности на разрыв ( $\sigma_a = 17,5 \dots 17,7$  МПа). Вместе с тем, адгезионная прочность на сдвиг в точке  $q = 0,25$  масс.ч. показывает в пределах погрешности значение исходной матрицы  $\tau = 8,5 \pm 0,4$  МПа, в совокупности демонстрируя оптимальный результат, а в точке  $q = 0,50$  масс.ч. существенно снижается до  $\tau = 6,2$  МПа. Напротив, увеличение концентрации модификатора до  $q = 1,00$  масс.ч. привело к существенному снижению ( $\sigma_{ост} = 0,57$  МПа) остаточных напряжений (рис.3, кривая 3). Заметим обратную тенденцию с вышеописанными результатами, которая показывает, что адгезионная прочность при отрыве существенно снижается (рис.3, кривая 3) в то время, как адгезионная прочность при отрыве сохраняет показатели исходной матрицы (рис.3, кривая 2). Дальнейшее увеличение количества модификатора до  $q = 1,25 \dots 1,50$  масс.ч. снова приводит к незначительному росту остаточных напряжений до  $\sigma_{ост} = 0,71 \dots 0,75$  МПа. Следует подчеркнуть, что в точке  $q = 1,25$  масс.ч. на кривой зависимости « $\sigma_a - q$ » (рис. 3, кривая 1) адгезионная прочность при отрыве достигает своего максимума, в то же время адгезионная прочность при сдвиге как в этой, так и в следующей точке демонстрирует в пределах погрешности результат одно из наименьших значений (рис. 3, кривая 2). Формирование КМ с содержанием КГХН в количестве  $q = 2,00$  масс.ч. обеспечивает создание КМ с наименьшими остаточными напряжениями в структуре материала (рис. 3, кривая 2), однако, как и в вышеописанных данных не обладает повышенными адгезионными характеристиками по сравнению с исходной матрицей (контрольной точкой).

Исходя из вышеописанного, можно констатировать, что увеличение концентрации модификатора привело к снижению остаточных напряжений в материале, однако показало скачкообразный, неравномерный характер влияния модификатора на эпоксидное связующее относительно его концентрации. Динамика неравномерности влияния модификатора на матрицу хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований адгезионной прочности при отрыве и сдвиге, подтверждая достоверность полученных данных. Установлено, что снижение остаточных напряжений в КМ с помощью данного модификатора приводит к сохранению свойств адгезионной прочности на сдвиг исходной матрицы (контрольной точки) и к уменьшению адгезионных свойств на отрыв. В то же время следует отметить, что максимальное значение адгезионных свойств в комплексе ( $\sigma_a = 17,7$  МПа,  $\tau = 8,9$  МПа) наблюдали для КМ с количеством модификатора  $q = 0,25$  масс.ч. При этом такой материал характеризуется незначительным показателем остаточных напряжений –  $\sigma_z = 1,05$  МПа. Подчеркнем, что результаты данной оптимальной точки не показывают заметного улучшения при сравнении с результатами исходной матрицы. На основе чего, можно сделать вывод, что использование модификатора КГХН в качестве улучшающей адгезионные свойства добавки является не совсем целесообразным.

**Выводы.** Доказано, что введение в эпоксидный олигомер ЭД-20 (100 масс.ч.), модификатора КГХН в количестве  $q = 0,25$  масс.ч. приводит к формированию материала со следующими оптимальными свойствами: адгезионная прочность при отрыве от стальной основы марки Ст 3 –  $\sigma_a = 17,7$  МПа, адгезионная прочность при сдвиге стальной основы марки Ст 3 –  $\tau = 8,9$  МПа. Остаточные напряжения материала  $\sigma_{ост} = 1,05$  МПа.

Установлено, что снижение остаточных напряжений в КМ с помощью данного модификатора приводит к сохранению свойств адгезионной прочности на сдвиг исходной матрицы (контрольной точки) и к уменьшению адгезионных свойств на отрыв.

После проведения сравнительного анализа результатов исходной матрицы (контрольного образца) и модифицированных материалов, была доказана нецелесообразность использования модификатора КГХН в качестве добавки, улучшающей адгезионные свойства эпоксидной матрицы. Поэтому интересными с научной точки зрения, на наш взгляд, будут результаты исследований физико-механических свойств модифицированных материалов.

#### Список использованных источников:

1. Тхір І.Г. Фізико-хімія полімерів: навч. посібник [Текст] / Тхір І.Г, Гуменецький Т.В. – Львів: Вид. нац. універ. «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.

2. Brooker R.D. The morphology and fracture properties of thermoplastic-toughened epoxy polymers / R.D. Brooker, A.J. Kinloch, A.C. Taylor // Journal of Adhesion, vol. 86, 2010. – P. 726-741.
3. Privalko V.P., Gorodilov B.Ya., Baibak V.V., Privalko E.G. at all // Komposits. Polim. Mater.- 2001.- 23, '1.-P. 61-68.
4. Букетов А.В. Вплив ультразвукової обробки на фізико-механічні і теплофізичні властивості епоксидних нанокомпозитів / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, М.В. Браїло, Алексенко В.Л. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 5. – С. 126-132.
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. 8-17.
6. Чернин И.З. Эпоксидные полимеры и композиции / И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердяев. – М.: Химия, 1982. – С. 53-101
7. А.В. Букетов. Исследование влияния 1,4-бис (п,п-диметилдитиокарбамато) бензена на механические свойства эпоксидной матрицы А. В. Букетов [и др.] // Пластические массы. – 2014. – № 3-4. – С. 26-34.
8. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В. Букетов, П. Д. Стухляк, Є.М.Кальба. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.
9. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий [Текст] / М. И. Корякина. – М. : Химия, 1988. – 272 с.
10. Стухляк П.Д. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості [Текст] / П.Д. Стухляк, А.В.Букетов, О.І.Редько. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
11. Оценки эффекта усиления при наполнении эпоксидных связующих наноразмерными частицами различной природы (компьютерные прогнозы)/ Яновский Ю.Г., Никитина Е.А., Никитин С.М., Карнет Ю.Н. // Механика композиционных материалов и конструкций. Т.20. – Москва. :Институт прикладной механики РАН, 2014. — №1. – С.34-57.
12. Бартнев Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М.Бартнев, Ю.С. Зуев. – М.: Химия, 1964. – С.28-76

Стаття надійшла до редакції 20.11.2017

УДК: 656.025.2

**В.О. Вдовиченко***Харківський національний автомобільно-дорожній університет***ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ПРІОРИТЕТНОГО РУХУ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ З ПОЗИЦІЙ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСУ ПРИБУТТЯ В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИЙ ТЕРМІНАЛ**

*Запропоновано розглянути процедуру впровадження пріоритетного руху міського громадського транспорту з позицій оцінки його впливу на умови скорочення флуктуації прибуття транспортних засобів у транспортно-пересадочний термінал. Представлена форма оцінки доцільності впровадження пріоритетного руху міського громадського пасажирського транспорту дозволила обґрунтувати загальну структуру процесу визначення умов її реалізації та забезпечила можливість формування передумов підвищення системної ефективності в умовах його інтеграції до загальної транспортної середовища міста.*

*Ключові слова:* міський громадський пасажирський транспорт, транспортно-пересадочний термінал, пріоритет руху, флуктуація прибуття.

**В.А. Вдовиченко****ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИОРИТЕТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА С ПОЗИЦИЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫЙ ТЕРМИНАЛ**

*Предложено рассматривать процедуру внедрения приоритетного движения городского общественного транспорта с позиций оценки его влияния на условия сокращения флуктуации прибытия транспортных средств в транспортно-пересадочный терминал. Представленная форма оценки целесообразности внедрения приоритетного движения городского общественного пассажирского транспорта позволила обосновать общую структуру процесса определения условий ее реализации и обеспечила возможность формирования предпосылок повышения системной эффективности в условиях его интеграции в общий транспортной среды города.*

*Ключевые слова:* городской общественный пассажирский транспорт, транспортно-пересадочный терминал, приоритет движения, флуктуация прибытия.

**V. Vdovychenko****AN ESTIMATION OF EXPEDIENCY OF PRIORITY MOTION OF URBAN PUBLIC PASSENGER TRANSPORT FROM POSITIONS OF STABILIZING OF ARRIVAL TIME TO THE TRANSPORT-TRANSPLANTATION TERMINAL**

*It is suggested to examine procedure of introduction of priority motion of urban public transport from positions of estimation of its influence on the terms of reduction of fluctuation of arrival of transport vehicles to the transport-transplantation terminal. The presented form of estimation of expediency of introduction of priority motion of urban public passenger transport allowed to ground the general structure of process of determination of terms of its realization and provided possibility of forming of prerequisites of increase of system efficiency in the conditions of its integration to a general transport environment of the city.*

*Keywords:* urban public passenger transport, transport-transplantation terminal, the priority of motion, fluctuation.

**Постановка проблеми.** Міський громадський пасажирський транспорт (МГПТ) представляє собою складну функціональну організаційну структуру в якій значна роль у забезпеченні стабілізації технологічних процесів належить вузловим елементам. Сьогодні транспортно-пересадочні термінали (ТПТ) стають основоположними каркасними структурним елементом МГПТ на основі якого формується його загальний технологічний процес. Ритмічність та надійність роботи ТПТ у значній мірі визначає функціональний стан суб'єктів МГПТ та оказує безпосередній вплив на тривалість непродуктивних простоїв, ресурсну ефективність та рівень негативних наслідків його роботи пов'язаних з транспортною та екологічною небезпекою. Проведений технологічний аудит ТПТ м. Харкова показав, що основною причиною дестабілізації їх роботи є наявність значного рівня флуктуації прибуття транспортних засобів яка викликана складними умовами руху по відповідним ділянкам вулично-дорожньої мережі маршрутів. Створення умов скорочення розподілу часу прибуття можливо реалізувати шляхом виділення окремих смуг руху для МГПТ. Виділення окремих смуг руху для МГПТ оказує негативні наслідки на умови рух немаршрутного транспорту (НМТ) та вимагає проведення попередньої оцінки доцільності прийняття такого рішення. Облік впливу організації пріоритетності МГПТ на умови руху НМТ реалізується шляхом формування області допустимих рішень виходячи з умов багаторівневої системної оцінки ефективності МГПТ [1].



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Слід відмітити, що задача оцінки доцільності впровадження пріоритетного руху МГПТ давно представляє для фахівців відповідний науково-прикладний інтерес. На основі аналізу робіт [2-9] виділена структурна єдність підходів щодо обґрунтування виділення пріоритетних полос руху МГПТ, яка дозволила розподілити їх за наступними ознаками:

- за рівнем допустимої інтенсивності руху НМТ [2-3];
- за швидкістю руху транспортних засобів [4-5];
- за оцінкою стану транспортних потоків [6-7];
- в межах єдиної інтелектуальної системи керування рухом [8-9].

Визначення доцільності впровадження пріоритетного руху МГПТ за умов забезпечення відповідності рівня завантаження смуг руху НМТ реалізовано у роботах [2-3] шляхом виділення гранично допустимих меж інтенсивності руху для відповідних смуг. В якості критерію прийняття рішення виступає максимально допустима інтенсивність руху НМТ яка визначається виходячи з умов її рівномірного розподілу між доступними смугами руху та загальної інтенсивності руху МГПТ по ділянках мережі. Встановлено, що допустимою є межа інтенсивності руху НМТ яка складає не більше 400 авт/год. При цьому нижня межа встановлюється для МГПТ та складає не менше 40 авт/год. Використання такого підходу дозволяє реалізувати обґрунтування доцільності виділення смуг для МГПТ у спрощеному вигляді лише на основі оцінки архітектурно-планувальної структури вулично-дорожньої мережі та характеристик транспортних потоків. Така форма обґрунтування набула поширення при обмеженості інформаційного простору але не дозволяє врахувати інші аспекти розгляду цієї задачі які виходять за межі вулично-дорожньої компоненти функціонування МГПТ. Для визначення доцільності впровадження пріоритетного руху на ділянках МГПТ у роботі [4] представлені емпіричні моделі зміни швидкості руху транспортних засобів які дозволяють визначити умови забезпечення сталості режимів руху всіх типів транспорту. Отримані в результаті модельного експерименту данні про допустимий діапазон швидкісного режиму руху дозволяють сформулювати уявлення про доцільність виділення смуг МГПТ але вони не враховують умов простою транспортних засобів на зупиночних пунктах. Розгляд доцільності впровадження пріоритетного руху МГПТ через оцінку стану транспортних потоків реалізовано у роботах [6-7]. Пошук області допустимих рішень на основі представленого алгоритму передбачає покрокове виділення можливих зон їх впровадження. Комплексність розгляду цього процесу дозволяє реалізувати багатокритеріальність прийняття рішення однак у представлених правилах відбору не передбачена оцінка цього рішення відносно умов формування стабілізації процесу прибуття в ТПТ. В межах створення інтелектуальних систем управління транспортом які сьогодні набувають все більшого поширення також розглядаються питання впровадження пріоритетного руху МГПТ. У роботах [8-9] процедуру організації пріоритетного МГПТ руху розглядають з позицій динамічності процесів через облік часових параметрів реалізації переміщення транспортних засобів вулично-дорожньою мережею (ВДМ) міста. Такий підхід має значні переваги які полягають у використанні екстенсивних форм вирішення задач стабілізації руху МГПТ. Однак існуючі алгоритми за своєю суттю у значній мірі дублюють попередні підходи та не мають спрямованості на забезпечення стабілізації прибуття транспортних засобів у ТПТ.

**Постановка завдань.** На основі виділеної проблемної області та проведеного огляду існуючих підходів до організації пріоритетного руху МГПТ можна зробити висновок про те, що існує потреба в розробці методів оцінки доцільності з позицій стабілізації роботи ТПТ та скорочення в них флуктуаційних процесів.

У зв'язку з цим **метою роботи** є розробка методу визначення області допустимих рішень щодо впровадження пріоритетного руху МГПТ з позицій оцінки його впливу на стабілізацію параметрів взаємодії в ТПТ. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

– сформувати структуру алгоритму визначення доцільності впровадження пріоритетного руху МГПТ;

– формалізувати моделі оцінки впливу пріоритетного руху на часові параметри взаємодії в ТПТ.

**Викладення основного матеріалу.** Використання методології системного підходу при вирішенні задачі підвищення ефективності МГПТ передбачає впровадження механізмів стабілізації технологічних процесів як основного інструмента забезпечення його сервісно-ресурсної сталості. В умовах змішаного транспортного потоку на формування флуктуації руху маршрутних транспортних засобів значний вплив оказує рівень завантаження рухом ВДМ. Одним

з джерел підвищення ефективності взаємодії в ТПТ є забезпечення безперешкодних умов руху по ділянках маршрутів МГПТ шляхом виділення окремих смуг руху. Визначення форм розподілу ресурсних можливостей міської транспортної мережі (МТМ) має своєю метою створення відповідних умов для скорочення флюктуаційних процесів прибуття транспортних засобів у ТПТ шляхом відокремлення полос ВДМ для пріоритетного використання МГПТ. У роботах [4-5] обґрунтований вплив рівня завантаження ВДМ на швидкість руху транспортного потоку який дозволив використати встановлені закономірності для опису причино-наслідкових процесів формування флюктуації прибуття транспортних засобів МГПТ у ТПТ. Така форма представлення характеру причино-наслідкових зв'язків дозволяє виділити конкретні вимоги до результатів впровадження пріоритетного руху МГПТ з позицій стабілізації часу прибуття транспортних засобів у ТПТ та об означити структурну послідовність локальних рішень які повинні бути для цього виконані. Логічна структура рішень дозволила визначити їх послідовність відносно оцінки доцільності впровадження пріоритету МГПТ (рис. 1).

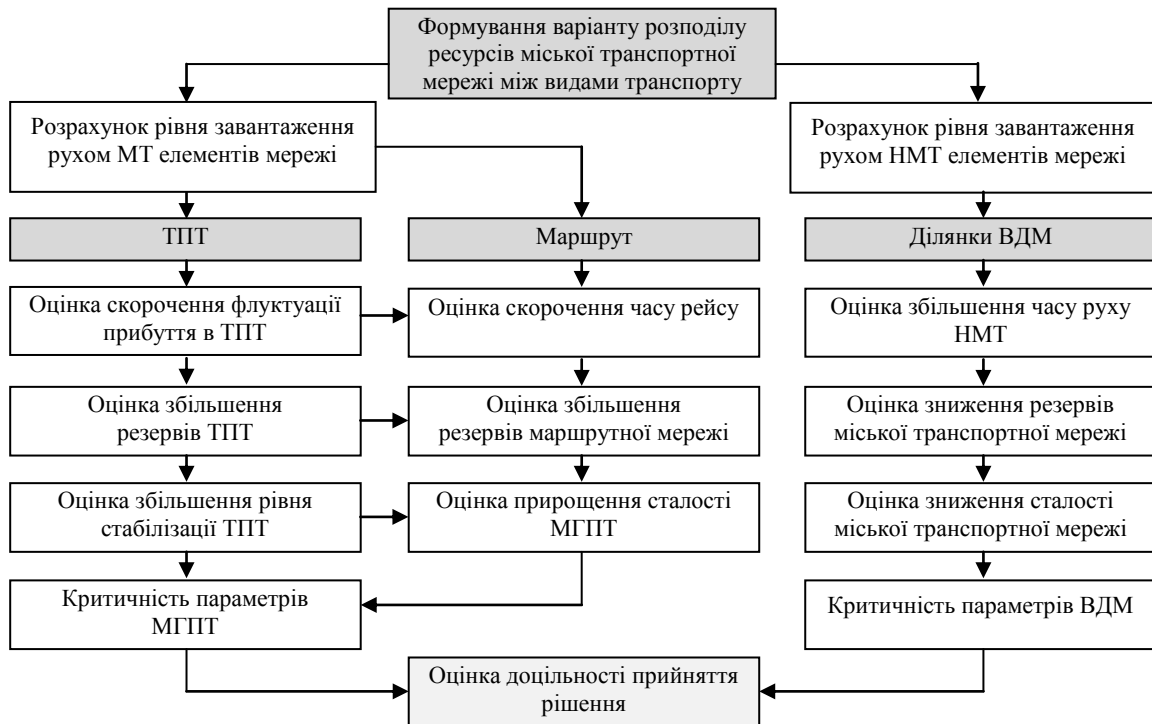


Рис. 1. Етапи оцінки доцільності впровадження пріоритетного руху МГПТ

В основу визначення рівня скорочення часу флюктуації покладена закономірність яка відображає накопиченого в момент часу ( $\tau$ ) сумарного відхилення часу прибуття транспортного засобу в ТПТ. Питома вага зменшення діапазону флюктуації прибуття в ТПТ визначається умовами можливості прийняття рішення про впровадження пріоритетного руху МГПТ. Для окремого маршруту питома вага скорочення діапазону флюктуації прибуття в ТПТ визначається за формулою:

$$SgFl(\tau_{ar}) = \int_{\tau_{sv}}^{\tau_{ar}} \frac{Ca_l(\tau) \cdot Ffl_l(\tau)}{Ca_l(\tau) \cdot Ffl_l(\tau) + Ca_{in}(\tau) \cdot Ffl_{in}(\tau)} \cdot d\tau, \quad (1)$$

де  $Ca_l(\tau)$  - параметр, що відображає наявність механізмів управління чинниками флюктуації які не залежать від рівня завантаження рухом;  $Ca_{in}(\tau)$  - параметр, що відображає наявність механізмів управління чинниками флюктуації які залежать від рівня завантаження рухом;  $Ffl_l(\tau)$  - функція виникнення флюктуації від чинників які не залежать від рівня завантаження рухом;  $Ffl_{in}(\tau)$  - функція виникнення флюктуації від чинників рівня завантаження рухом.

Для визначення рівня зміни флюктуації прибуття транспортних засобів у ТПТ при впровадженні пріоритетного руху МГПТ необхідно на основі інформованого пошуку визначити потенційну можливість його скорочення виходячи з оцінки можливих вільних та фактичних умов руху по кожній ділянці траси маршруту на ділянках перед ТПТ. У разі можливості прийняття рішення про виділення пріоритетного руху МГПТ параметр  $Ca_{in}$  в залежності від ділянки

маршруту в момент часу ( $\tau$ ) приймає значення 0 (при впровадженні пріоритетного руху) та 1 при відсутності такого рішення. Прийняття рішення про доцільність впровадження пріоритетного руху по кожній ділянці ВДМ маршруту приймається окремо і вимагає попередньої оцінки ступені критичності умов руху НМТ відносно меж зони забезпечення ресурсної сталості МТМ. Умовою відповідності вимогам критичності є забезпечення їх фактичного значення в межах мінімально допустимого рівня їх резервів. Зміна рівня завантаження та обсяг фактичних резервів ресурсів МТМ визначається за структурними компонентами сервісно-ресурсної моделі функціонування МГПТ на основі перерозподілу наявної інтенсивності руху всіх типів транспорту між відповідними смугами. Оцінка доцільності впровадження пріоритетного руху на елементах ВДМ визначається через визначення показника зміни рівня резервів ресурсів кожної ділянки МТМ:

$$\Delta RR_u(t) = \min(0, RR_u^{al}(\tau_i) - RR_u^f(\tau_i)), i = (\overline{0}, t), \quad (2)$$

де  $RR_u^{al}(\tau_i)$  - критичний рівень резервів пропускної можливості  $u$  - ої ділянки ВДМ у момент часу ( $\tau$ );  $RR_u^f(\tau_i)$  - фактичний рівень резервів пропускної можливості  $u$  - ої ділянки ВДМ у момент часу ( $\tau$ ).

За рахунок створення умов вільного руху МГПТ на виділених ділянках ВДМ відбувається скорочення діапазону можливого прибуття транспортних засобів у ТПТ. Діапазон прибуття в умовах обмежених ресурсних можливостях ТПТ є визначальним чинником у формуванні черги транспортних засобів та їх непродуктивного простою. Відповідно до виділених у роботі [10] умов формування черги можливі різні варіанти стану функціонування ТПТ які визначають його потенціал відносно сервісно-ресурсних умов сталості технологічних процесів. Зміна стану ТПТ яка є складовою частиною оцінки ефективності МГПТ визначається на основі обліку зміни загального часу його роботи в умовах стабілізації тривалості його технологічних операцій:

$$\Delta S_{TH}(t) = \frac{\sum_{i=1}^t S_{TH_{cf}}^{bs}(\tau_i)}{t} - \frac{\sum_{i=1}^t S_{TH_{cf}}^{ps}(\tau_i)}{t}, \quad (3)$$

де  $S_{TH_{cf}}^{bs}(\tau_i)$  - базовий стан ТПТ у момент часу ( $\tau$ );  $S_{TH_{cf}}^{ps}(\tau_i)$  - очікуваний стан ТПТ у момент часу ( $\tau$ ).

Для визначення тривалості часу стабілізації роботи ТПТ використовується блок *TransportHub* сервісно-ресурсної моделі МГПТ. У межах цього блоку моделюються відповідні сукупності альтернативних рішень функціонування всіх рівнів представлення МГПТ в межах загальної міської системи. У ході проведеного пілотного імітаційного експерименту на ТПТ «вул. Г.Широнинців – вул. Валентинівська» м. Харкова для варіанту впровадження пріоритетного руху по всім ділянкам маршрутів отримані результати які відображають розподіл часу флуктуації прибуття транспортних засобів (рис. 2.).

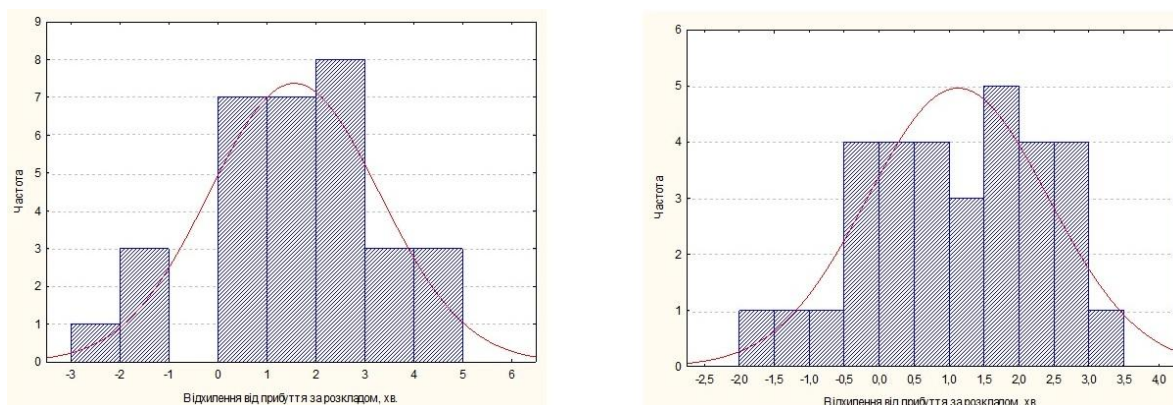


Рис. 2. Розподіл часу прибуття транспортних засобів у ТПТ

Загальний вигляд умов прийняття рішення про впровадження пріоритетного руху МГПТ на елементах ВДМ визначається виходячи з приналежності отриманих показників області допустимих значень:

$$KRU = \left\{ \Delta RR_u(t) \mid \Delta RR_u(t) \in K_{RRu} \right\}, t = (\overline{1, T}), \quad (4)$$

$$KRTH = \left\{ \Delta S_{TH}(t) \mid \Delta S_{TH}(t) \in K_{TH} \right\}, t = (\overline{1, T}), \quad (5)$$

Межі множини  $KRU$  визначаються діапазоном допустимих значень  $K_{RRu}$  який знаходиться в межах  $\{-1, 0\}$ , а множини  $KRTH$  визначаються діапазоном допустимих значень  $K_{TH}$  який знаходиться в межах  $\{-1, 0\}$ . Рішення про доцільність впровадження технологічних заходів щодо виділення пріоритетної смуги руху для МГПТ приймається за умов входження отриманих показників  $\Delta RR_u(t)$  та  $\Delta S_{TH}(t)$  до простору допустимих значень, яке визначається об'єднанням підмножин, які відображають відповідні області допустимих рішень:

$$KRP = KRU \cap KRTH, \quad (6)$$

Рівень допустимих резервів пропускну здатності МТМ визначається прийнятим я якості норми рівнем обслуговування який прийнятий в якості нормативного для відповідних частин міста.

**Висновки.** Встановлено, що забезпечити приріст стабілізації технологічного процесу роботи ТПТ можливо шляхом впровадження пріоритетного руху МГПТ на ділянках ВДМ маршрутів. На основі виділеного контуру причинно-наслідкових зв'язків виділена структурна послідовності оцінки доцільності впровадження пріоритетного руху МГПТ яка в умовах впровадження принципів формування сталого розвитку міського середовища дозволяє забезпечити реалізацію методології системності та багаторівневості оцінки прийняття управлінських рішень.

Представлені моделі оцінки впливу пріоритетного руху на параметри взаємодії в ТПТ дозволяють забезпечити логічну обґрунтовану реалізацію процедури інформованого пошуку варіанту впровадження пріоритетного руху МГПТ шляхом виділення області допустимих рішень з позиції забезпечення їх відповідності граничним умовам ресурсної критичності елементів МТМ та суб'єктів пасажирської транспортної інфраструктури.

#### Список використаних джерел:

1. Vdovychenko V. Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency [Text] / V. Vdovychenko, Y. Nagorny // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – №3/3. – P. 44-51.
2. Мирончук А. А. Граничные условия организации приоритетного движения автобусов с использованием метода разнесенных стоп-линий [Текст] / А. А. Мирончук // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №22. – с. 4-1.
3. Смирнов С. И. Совершенствование организации приоритетного движения средств маршрутного пассажирского транспорта в городах: дис. канд. техн. наук: 05.22.10 [Текст] / С. И. Смирнов: – М.: МАДИ, 1984. – 193 с.
4. Зырянов В.В., Мирончук А.А. Приоритетное движение общественного транспорта: развитие методов организации [Текст] / В. В.Зырянов, А. А. Мирончук // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. - 2012.- №3-4(40-41). - С. 22-25.
5. Жиркова А. А. Обоснование введения выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта [Текст] / А. А. Жиркова, К. А. Басов, В. Ю. Ивлев, П. А. Титова // Евразийский союз ученых. – 2016. – №1-2. – С. 52-55.
6. Вікович І. А. Розробка основного критерію впровадження спецсмуг на перегонах вулиць для громадського транспорту [Текст] / І. А. Вікович, Р. М. Зубачик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №6/4. – С. 28-34.
7. Дмитриченко М. Ф. Розробка алгоритму дій щодо впровадження спеціальних смуг на перегонах вулиць для громадського транспорту [Текст] / М. Ф. Дмитриченко, І. А. Вікович, Р. М. Зубачик // Вісник Національного транспортного університету. – 2011. – №24(2). – С. 15-22.
8. Balke K. Development and evaluation of intelligent bus priority concept [Text] / K. Balke, C. Dudek, T. Urbanik // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2000. – №1727. – С. 12-19.
9. Eichler M. Bus lanes with intermittent priority: Strategy formulae and an evaluation [Text] / M. Eichler, C. Daganzo // Transportation Research Part B: Methodological. – 2006. – №40/9 – С. 731-744.
10. Vdovychenko V. Analysis of the formation of fluctuations of service time of vehicles in transport-transfer stations of urban passenger transport [Text] // Технологічний аудит та резерви виробництва, 2017 - №4/2(36) – с. 37-43.

#### Рецензенти:

**Нагорний Євген Васильович**, завідувач кафедри транспортних технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, д.т.н., професор

**Альошинський Євген Семенович**, професор кафедри транспортних систем і логістики Українського державного університету залізничного транспорту, д.т.н., професор

Стаття надійшла до редакції 08.11.2017

УДК 621.312

**А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк**  
**МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З РІЗКОЗМІННИМ**  
**НАВАНТАЖЕННЯМ**

*Отримана модель різкозмінного навантаження; встановлено, що для дослідження роботи приймачів з різкозмінним навантаженням доцільно використовувати метод визначення потужностей, які розраховані за складовими прямої послідовності.*

*Ключові слова* реактивна потужність, різкозмінне навантаження, модель.

*Рис. 10. Літ. 7.*

**А.В. Гадай, Ю.В. Грицюк**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ**  
**НАГРУЗКОЙ**

*Получена модель резкопеременной загрузки; установлено, что для исследования работы приемников с резкопеременной нагрузкой целесообразно использовать метод определения мощностей, рассчитанных по составляющим прямой последовательности.*

*Ключевые слова:* реактивная мощность, резкопеременная нагрузки, модель.

**A. Hadaj, Yu. Hrytsiuk**  
**MODELING OF ELECTRIC ENERGY RECEIVERS WITH CUTTING VARIABLE**  
**LOADING**

*The paper presents the study of the mode of operation of the electric network with a include suddent load. The results are obtained by SIMULINK simulation. The conducted studies have shown that in order to evaluate the work of receivers with include suddent load, it is expedient to use the method of determining the capacities calculated by the components of the direct sequence. The conclusions and the results obtained lead to further scientific and practical research.*

*Keywords:* reactive power, cutting variable load, model.

**Постановка проблеми.** Мережа електропостачання України була побудована ще в 70-х раках минулого століття і до нашого часу постійно експлуатується. На основі іноземного досвіду, в перспективі планується використання розподіленої генерації в мережі, збільшення можливостей керування параметрами використовуючи сучасні системи комп'ютерного моделювання, що має покращити надійність роботи та якість параметрів електроенергії. Оскільки електричне навантаження постійно ускладнюється, а електричні мережі залишаються незмінними постає гостра проблема у визначенні параметрів навантаження, яке здатне забезпечити мережа, функціонуючи в нормальних умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час дослідження різкозмінних режимів роботи електроприймачів достатньо точні результати дають чисельні методи. Одним із параметрів навантаження, який можна регулювати, збільшуючи пропускну здатність мережі є реактивна потужність, визначення величини якої і впливу на яку розглядаються в роботах Кузьміна В.В. [1], Саєнко Ю.Л. [2], Зіміна Е.Н. [3], а також в міжнародних стандартах DIN 40110-2 [4], відомий як метод FBD (від початкових авторів Fryze, Buchholz, Depenbrock) та IEEE Standard 1459-2000 [5]. Метод FBD, який запропонований в IEEE, простіший і краще пов'язаний з параметрами мережі.

Аналіз існуючих пристроїв динамічної компенсації показав, що найбільш ефективними та довершеними є пристрої, що побудовані на основі статичних компенсаторів реактивної потужності (СКРП) [6]. Однак їх інформаційне забезпечення в неусталених режимах мережі вимагає вдосконалення.

**Мета статті.** Пропонується модель електричної мережі, де встановлені приймачі з різкозмінним навантаженням, які призводять до значного споживання реактивної потужності та погіршення параметрів режиму роботи мережі.

**Основні матеріали дослідження.** До розгляду приймається електрична мережа з лісопереробного підприємства. Схема мережі представлена на рис 1. Від шин напругою 0,4 кВ трансформатора TV живляться приймачі з різкозмінним характером навантаження. Характерним представником електроприймачів з різкозмінним характером навантаження є козловий кран марки ККС-10, який представлений електричними двигунами М1-М3.

Електричні двигуни мають активно-індуктивний характер навантаження. Тому моделювання такого навантаження виконаємо на основі моделі насичувального реактора [7]. Моделювання

реактивної потужності виконаємо на основі індуктивного навантаження. Зміна напруги у випадку активно-індуктивного навантаження визначається за виразом:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (1)$$

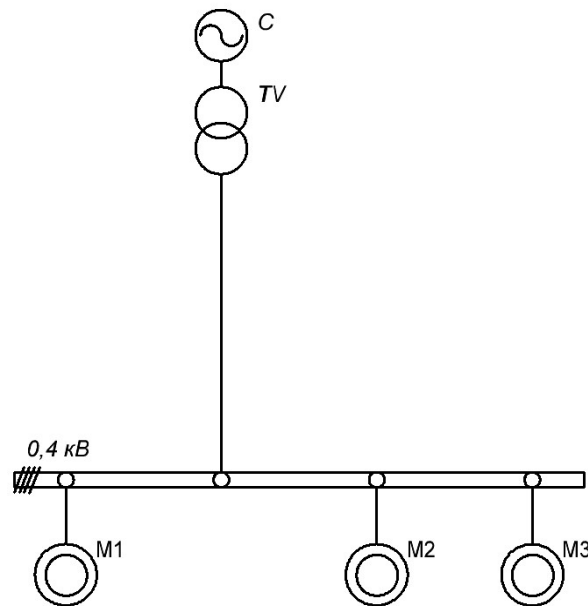


Рис. 1. Схема досліджуваної мережі

Звідки зміна струму визначається як:

$$i(t) = 1/L \cdot \int u(t) - R \cdot i(t). \quad (2)$$

Модель навантаження зображена на рис. 2.

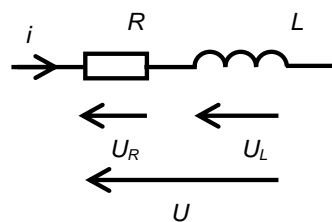


Рис. 2. Модель навантаження

Активний опір відповідає величині

$$R = \frac{U^2}{P}, \quad (3)$$

а індуктивність

$$L = \frac{U^2}{Q \cdot 2\pi f}. \quad (4)$$

де  $U$  – напруга живлення;  $P$  – споживана активна потужність;  $Q$  – споживана реактивна потужність;  $f$  – частота напруги мережі.

На основі рівнянь (3) та (4) в Simulink створено модель для різкозмінного навантаження, яка зображена на рис. 3.

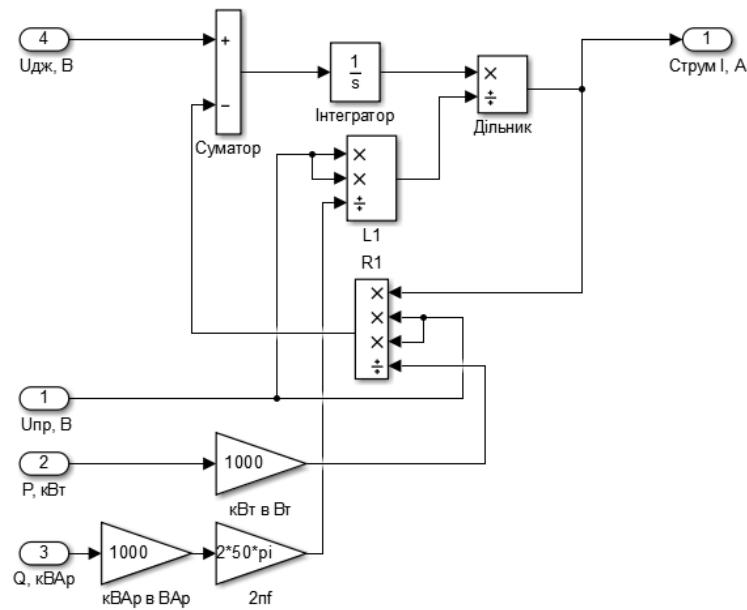


Рис. 3. Модель різкозмінного навантаження

Підключивши напругу та споживані потужності, отримано модель різкозмінного навантаження (рис. 4).

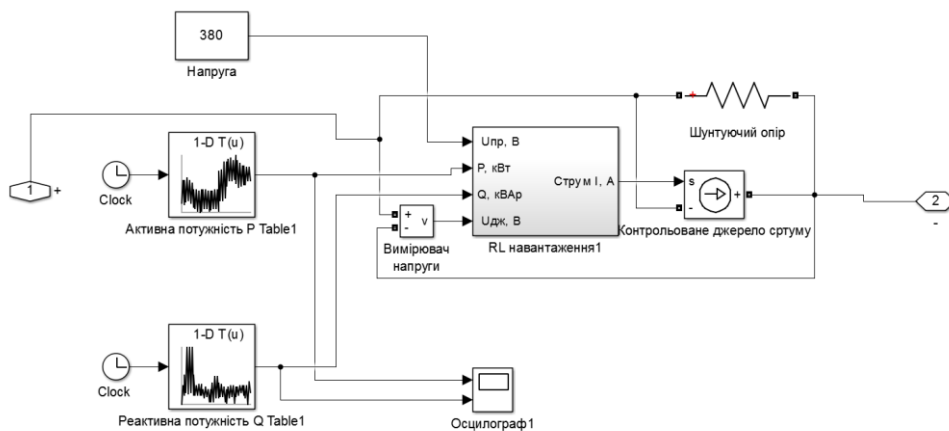


Рис. 4. Модель різкозмінного навантаження для підключення в електричне коло

Для вимірювання реактивної потужності використаємо модель, що зображено на рис. 5 попередньо підставивши в неї змодельовані різкозмінне навантаження кожної фази.

Вимірювання потужності здійснене трьома різними способами:

1) блок розрахунку миттєвих значень активної і реактивної потужностей за трифазними напругами та струмами (Power 3ph, Instantaneous).

Розрахунок параметрів базується на наступних визначення активної  $P$  та реактивної  $Q$  потужностей:

$$P = U_a \cdot I_a + U_b \cdot I_b + U_c \cdot I_c; \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(U_b - U_c) \cdot I_a + (U_c - U_a) \cdot I_b + (U_a - U_b) \cdot I_c]. \quad (6)$$

Структурна схема блоку зображена на рис. 6.

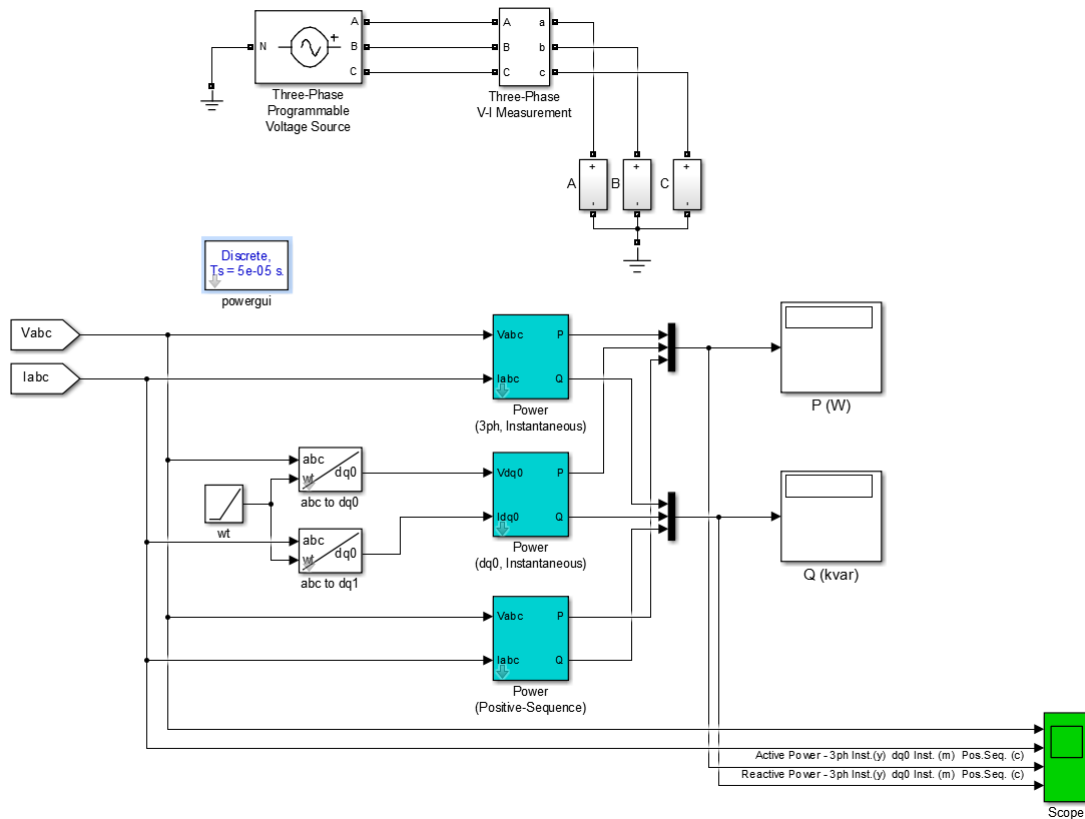


Рис. 5. Модель досліджуваної трифазної мережі з різкозмінним навантаженням

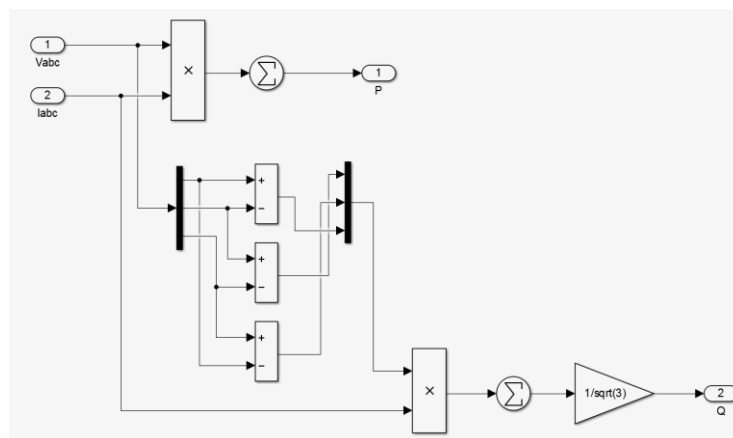


Рис. 6. Модель блоку Power 3ph, Instantaneous

2) блок розрахунку миттєвих значень активної і реактивної потужностей за трифазними напругами та струмами, виражених у системі відліку dq0 (Power dq0, Instantaneous).

Розрахунок параметрів базується на наступних визначення активної  $P$  та реактивної  $Q$  потужностей:

$$P = \frac{3}{2}(U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q + 2 \cdot U_0 \cdot I_0); \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2}(U_d \cdot I_q - U_q \cdot I_d). \quad (8)$$

Структурна схема блоку зображена на рис. 7.



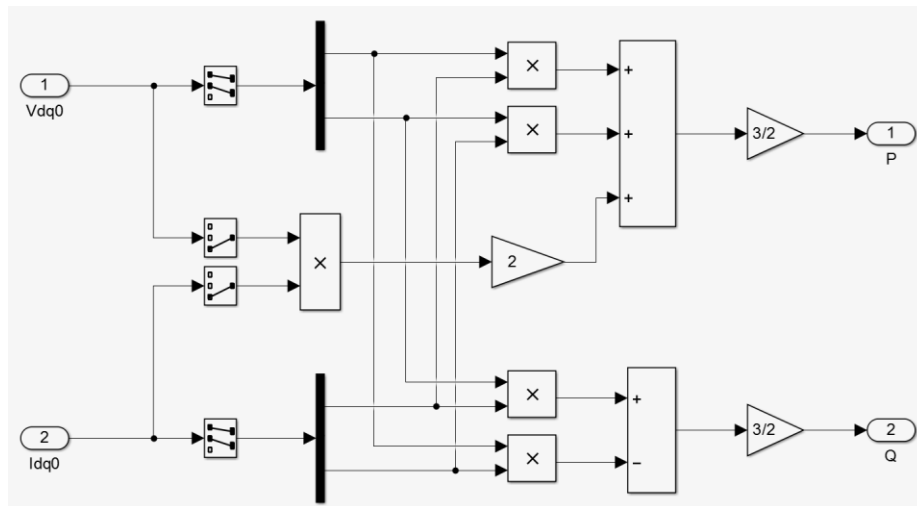


Рис. 7. Модель блоку Power dq0, Instantaneous

3) блок розрахунку значень активної і реактивної потужностей додатної послідовності в трифазній мережі з ковзаючим вікном протягом одного періоду основної частоти (Power Positive-Sequence).

Розрахунок параметрів базується на наступних визначення активної  $P$  та реактивної  $Q$  потужностей:

$$P = 3 \cdot \frac{|U_1|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_1|}{\sqrt{2}} \cdot \cos(\varphi); \quad (9)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{|U_1|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_1|}{\sqrt{2}} \cdot \sin(\varphi). \quad (10)$$

де кут зсуву фаз  $\varphi$  визначається як:

$$\varphi = \angle U_1 - \angle I_1. \quad (11)$$

Структурна схема блоку зображена на рис. 8.

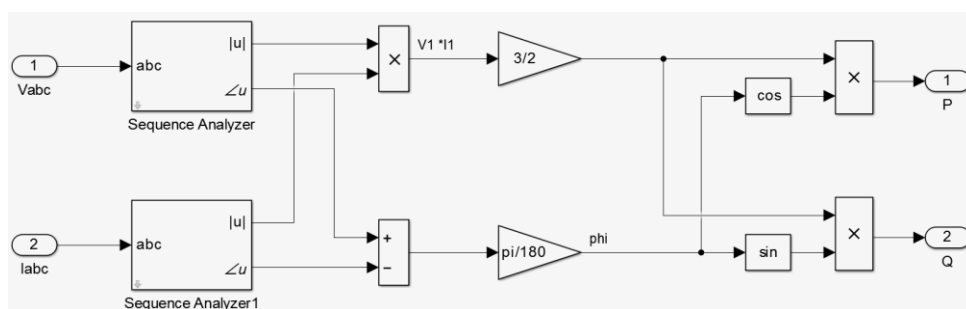


Рис. 8. Модель блоку Power Positive-Sequence

де аналіз послідовності (Sequence analyzer) представлений моделлю на рис. 9.

Результати моделювання активної та реактивної потужностей при різкозмінному навантаженні наведена на рис. 10.

**Висновки.** З наведеного матеріалу слідує, що миттєві значення активної і реактивної потужностей отримані за складовими додатної послідовності достовірно відображають зміни режиму роботи, тому цей метод доцільно використовувати для дослідження роботи приймачів з різкозмінним навантаженням та компенсації реактивної потужності.

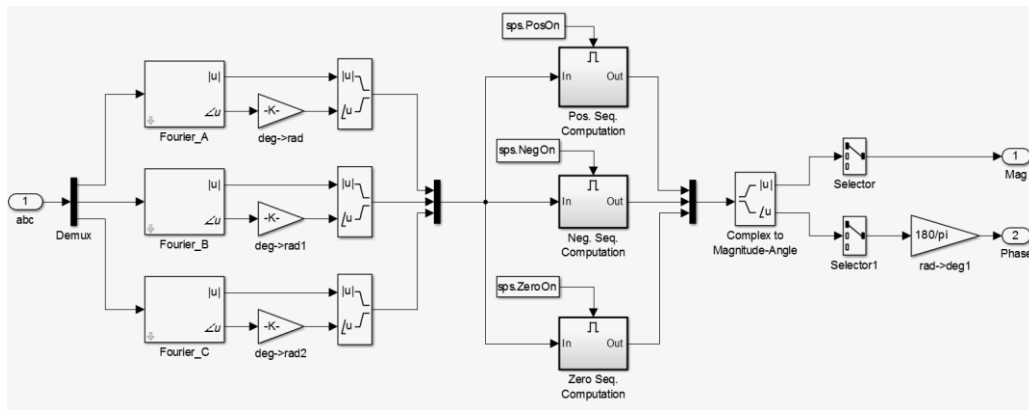


Рис. 9. Аналіз послідовності (Sequence analyzer)

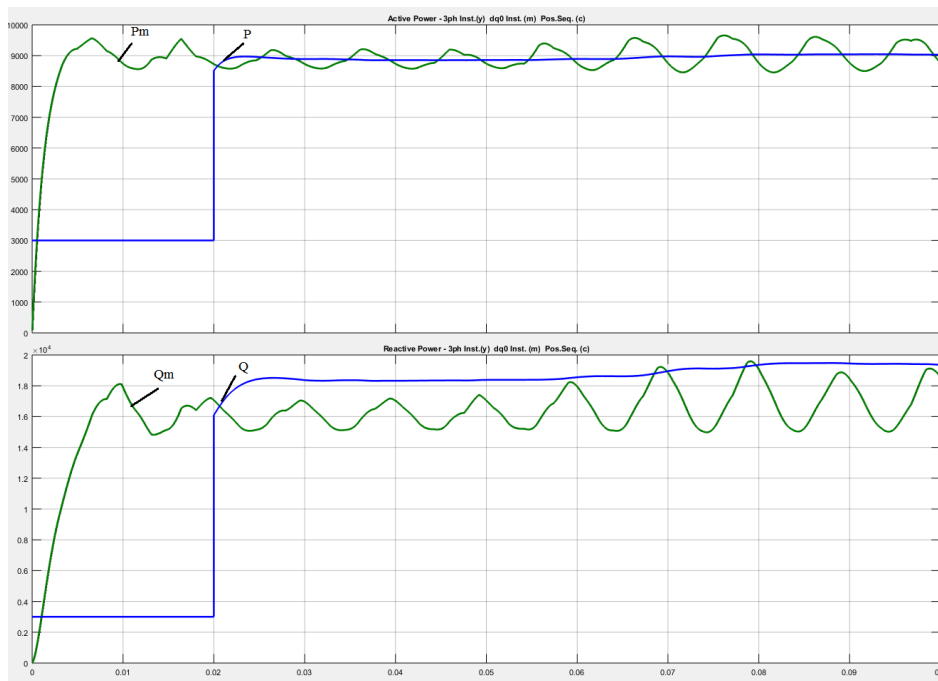


Рис. 10. Зміна активної та реактивної потужностей різкозмінного навантаження

**Список використаних джерел:**

- 1 Кузьмін В.В. Аналіз средств компенсації реактивної потужності в електричних мережах України/ В.В. Кузьмін, І.Г. Кирісов, С.В. Маринин // Електроснабження енергетика енергоаудит - 2012. - №05 (99). - с. 45-50.
2. Сасно Ю.Л. Методи компенсації реактивної потужності в мережах з нелінійними навантаженнями/ Ю.Л. Сасно, Т.К. Бараненко, Є.В. Бараненко // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - №26. - с. 204-210.
3. Зимин Е. Н. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями/ Е. Н. Зимин, В. Л. Кацевич, С. К. Козырев // – М.: Энергоиздат, 1981. – 192 с.
4. DIN 40110-2, Quantities used in alternating current theory - Part 2: Multi-line circuits, Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard) / 01-Nov-2002 / 8 pages.
5. IEEE Std 1459-2000, IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions. IEEE 2000.
6. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ / Под ред. И. И. Карташева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с
7. Графическая среда имитационного моделирования Simulink. Режим доступа [www.matlab.exponenta.ru/simpower/book1/4](http://www.matlab.exponenta.ru/simpower/book1/4) Дата звернення: 18.01.2017р.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2017

УДК 621.316

**І.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, В.І. Волинець***Луцький національний технічний університет***ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНИХ КОМПАНІЙ НА  
ОБСЛУГОВУВАННЯ РЕАКТИВНИХ ПЕРЕТІКАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З  
РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ***Вдосконалено структуру витрат енергопостачальних компаній, пов'язаних з обслуговуванням реактивних перетікань.**Ключові слова: розосереджені джерела енергії, реактивні перетікання, мережі енергопостачальних компаній.***И.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, В.И. Волинец****ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ЭНЕРГОСНАБЖАЮЩИХ КОМПАНИЙ НА  
ОБСЛУЖИВАНИЕ РЕАКТИВНЫХ ПЕРЕТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ З  
РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ***Усовершенствовано структуру расходов энергообеспечивающих компаний, связанных с обслуживанием реактивных перетоков.**Ключевые слова: рассредоточенные источники энергии, реактивные перетоки, сети энергообеспечивающих компаний.***I.V. Hrytsiuk, Y.V. Hrytsiuk, V.I. Volynets****DETERMINATION OF THE BENEFITS OF ENERGY SUPPLY COMPANIES FOR SERVICE  
OF REACTIVE TRANSMITTERS IN ELECTRICAL NETWORKS WITH RESERVED  
ENERGY SOURCES***Improved cost structure of energy supply companies related to the maintenance of jet flows. It additionally takes into account the costs that arise from the transport of reactive power from dispersed energy sources.**Key words: dispersed energy sources, jet flows, networks of power supply companies.*

**Постановка проблеми.** До електричних мереж енергопостачальних компаній (ЕК) відносяться мережі 110 (35), 10 (6), 0,4 кВ. Основну частку всіх мереж складають мережі 10 (6) кВ, від яких отримують живлення підприємства агропромислового комплексу та промислові підприємства, розміщені в населених пунктах. До мереж даного класу напруги приєднуються, в основному, засоби розосередженого генерування, суттєво впливаючи на режими їх роботи. Вказані електромережі (ЕМ) мають ряд особливостей:

- ЕМ мають переважно розімкнену конфігурацію (не містять контурів) та значну протяжність, що зумовлює високий рівень втрат активної (до 10-15%) і реактивної (5-15%) потужностей та напруги (до 5-20%); це створює передумови для впровадження високоефективних рішень з компенсації реактивних навантажень;

- ЕМ характеризуються низькою оснащеністю компенсувальними установками (КУ);

- в ЕМ спостерігається значне зменшення (порівняно з проектними умовами) активних і реактивних навантажень (у 1,5÷6 разів), що зумовлено спадом виробництва; разом з тим, рівень оснащення ЕМ засобами компенсації реактивної потужності (КРП) зменшується, не зважаючи на тенденції скорочення електричних навантажень; крім того, у районах, де розвивається електроспоживання, до технічних умов нових приєднань часто не включають наявність додаткових засобів КРП;

- до ЕМ підключаються засоби розосередженого генерування (малі ГЕС, сонячні та вітрові електростанції, когенераційні установки тощо), які, впливаючи на перетікання активної та реактивної потужностей, можуть докорінно змінювати режим роботи ЕМ, перетворюючи їх на електромережі з двобічним живленням; через зменшення навантажень та розбудову розосереджених джерел енергії (РДЕ) відбувається підвищення напруги у вузлах ЕМ; зазначені фактори призводять до невідповідності класичних підходів до розв'язання задачі групової компенсації реактивних навантажень в таких мережах;

- трансформаторні підстанції 10(6)/0,4 кВ населених пунктів та промислових підприємств знаходяться на балансі районних ЕМ і обслуговуються ними, що створює сприятливі умови для оснащення їх засобами КРП; однак, часто зазначені підстанції конструктивно не пристосовані для цього, що має враховуватися, як технічні обмеження;

- регулювання напруги за допомогою джерел РДЕ та споживачів реактивної потужності не використовується, оскільки відсутні відповідні нормативні документи;
- суттєве збільшення питомої вартості засобів КРП (особливо імпортного виробництва) за рахунок диспропорції вартості КУ та електроенергії для споживачів, призвело до зменшення економічно обґрунтованих рівнів компенсації;
- сприятливим фактором є унормована необхідність для ЕК вкладати кошти від реалізації послуги транспортування реактивної потужності до споживачів у оснащення електромереж засобами КРП;
- застосування для розрахунку КРП відомих методик в сучасних економічних умовах дозволяє обґрунтувати недоцільність, або низькі рівні компенсації через значні терміни окупності (10 і більше років);
- в міських ЕМ спостерігається систематичне перевантаження окремих кабельних ліній та трансформаторів; запровадження засобів КРП в таких мережах дозволяє подовжити термін їх нормальної експлуатації та покращити якість напруги у споживачів;
- зростання тарифів на електроенергію та збільшення реактивних навантажень у споживачів підвищує доцільність компенсації у ЕМ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класично, в якості критерію оптимальності для даної задачі використовують приведені, або дисконтовані витрати [1], [2]. Розв'язання задачі моделювання витрат на обслуговування реактивних перетікань в ЕМ, крім класичних робіт, також розглядалося фахівцями, які займаються підвищенням ефективності моделювання витрат електроенергії в розподільних електромережах [3], [4] та ін.

**Постановка завдань.** Аналізуючи наведені вище особливості, стає очевидним, що мережі ЕК є об'єктом, сприятливим для впровадження засобів індивідуальної та групової компенсації реактивної потужності. Для цього поступово створюються умови щодо зацікавлення енергопостачальних компаній та споживачів в КРП. Однак залишаються недослідженими технічні питання, пов'язані з особливостями КРП в сучасних умовах, зокрема в умовах розбудови засобів розосередженого генерування електроенергії, що не дозволяє формувати ефективні технічні рішення у даному напрямку.

**Викладення основного матеріалу.** Для забезпечення ефективних проектних рішень з КРП у розподільних електромережах силами ЕК, окремих споживачів та власників РДЕ необхідно враховувати у постановці задачі інтереси та особливості функціонування зазначених суб'єктів, які сумісно використовують розподільні електромережі для своєї діяльності. Отже, дисконтовані витрати:

$$Z = Q_H \cdot N \cdot \alpha + Q_H \cdot P(1 - \alpha) + Q_H \cdot \Pi \cdot R \cdot B \cdot (Q_H \cdot \Pi)^t (1 - \alpha)^2, \quad (1)$$

де  $Q_H$  – вектор-рядок реактивних навантажень у вузлах підсистеми або системи електропостачання;

$N$  – вектор-стовпець питомих витрат на генерування реактивної потужності всіма джерелами, встановлення яких заплановане у вузлах електромереж;

$\alpha$  – рівень компенсації реактивних навантажень в мережах підсистеми  $\alpha = Q_{КУ} / Q_M$ ;

$Q_{КУ}$  – сумарна потужність КУ;

$Q_M$  – максимум реактивної потужності підсистеми;

$P$  – вектор-стовпець питомих витрат ЕК, пов'язаних оплатою за вироблення та транспортування магістральними ЕМ некомпенсованого споживання реактивної потужності;

$\Pi$  – матриця коефіцієнтів розподілу або матриця шляхів;

$R$  – діагональна матриця активних опорів віток заступної схеми електромереж підсистеми;

$B$  – діагональна матриця коефіцієнтів, що враховують вартість витрат активної потужності та рівень номінальної напруги в електромережах.

Недоліком такої моделі витрат в контексті розв'язання поставленої задачі є опосередковане врахування змін напруги у вузлах електромережі для визначення витрат потужності й електроенергії у її вітках, а також неврахування впливу перетікань потужності окремих споживачів (джерел енергії) на графіки завантаження окремих ліній електропередачі (ЛЕП) та електромереж в цілому. Для умов проектно-експлуатації електромереж, коли електропостачання цілком централізоване, завантаження ЛЕП та трансформаторних підстанцій відповідає

проектному, втрати напруги відповідають вимогам чинних стандартів і визначаються режимами споживання, такі допущення є прийнятними і доцільними. Однак в сучасних умовах експлуатації для забезпечення адекватності оптимальних рішень необхідно враховувати як розподіл напруги в ЕМ, так і графіки навантаження окремих ЛЕП. Разом з тим, сучасні засоби моніторингу, а також автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) дають можливість практичної реалізації більш адекватного відтворення окремих станів електромереж та їх інтегральних характеристик, а отже й моделювання оптимальної КРП.

Для врахування впливу окремих суб'єктів оптового ринку електроенергії на функціонування електричних мереж пропонується використати структуру витрат ЕК, пов'язаних з транспортуванням реактивної потужності до її споживачів. Вона має містити [5]:

- витрати, пов'язані з обслуговуванням перетікань реактивної потужності у межах технологічного процесу транспортування та розподілу електроенергії ЕК  $V_{TP}$  (реактивного споживання трансформаторів підстанцій, надлишків генерування довгих кабельних ЛЕП тощо);

- витрати на засоби компенсації реактивної потужності  $V_{КУ}$ , які експлуатуються (обслуговування) та плануються до встановлення (проектна вартість) в ЕМ;

- витрати, пов'язані з вартістю змінних витрат електроенергії, що виникають в ЕМ внаслідок транспортування некомпенсованої реактивної потужності до споживачів  $V_{СП}$  з урахуванням плати споживачів за перетікання реактивної потужності  $P_{СП}$ ;

- витрати, пов'язані з вартістю додаткових витрат електроенергії, які виникають за рахунок транспортування реактивної потужності від РДЕ  $V_{РДЕ}$  з урахуванням їх плати за перетікання  $P_{РДЕ}$  [5]. Тут слід врахувати, що перетікання від розосереджених джерел подібно до групової компенсації реактивної потужності, можуть як збільшувати, так і зменшувати втрати електроенергії в ЕМ, а отже складова витрат  $V_{РДЕ}$  може бути як додатною, так і від'ємною. У останньому випадку наявність РДЕ в ЕМ буде зменшувати економічно доцільний рівень компенсації реактивної потужності.

Отже, оптимальний рівень оснащення ЕМ засобами компенсації реактивної потужності буде відповідати мінімуму цільової функції:

$$V_Q = V_{TP} + V_{КУ} + (V_{СП} - P_{СП}) + (V_{РДЕ} - P_{РДЕ}). \quad (2)$$

З виразу (2) виходить, що у випадку налагодження механізмів для об'єктивного визначення та стягнення плати за перетікання реактивної потужності для споживачів електромереж  $P_{СП}$  та джерел розосередженого генерування  $P_{РДЕ}$  ( $V_{СП} = P_{СП}$ ;  $V_{РДЕ} = P_{РДЕ}$ ), видатки, пов'язані з обслуговуванням перетікань реактивної потужності, будуть складатися з витрат на транспортування реактивної енергії в обсягах технологічного споживання ЕМ та витрат на засоби КРП. Враховуючи не співмірність  $V_{TP}$  та  $V_{СП}$  і практичну складність забезпечення компенсації технологічного споживання ЕМ, застосування КРП не буде ефективним з огляду на зменшення експлуатаційних витрат  $V_Q$ . Однак, враховуючи необхідність забезпечення якості електроенергії в ЕМ, встановлення КУ буде необхідним у мінімальному обсязі для вирішення задач забезпечення якості напруги, симетрування навантажень тощо.

Разом з тим згідно з (2) компенсація реактивних навантажень для окремих споживачів переважно виявляється ефективною, оскільки для них зростання витрат на КРП повертається у вигляді зменшення плати за перетікання реактивної потужності  $V_{QСП} = V_{КУ} + P_{СП}$ .

У випадку, коли через недосконалість діючих механізмів компенсації витрат ЕК за перетікання реактивної потужності споживачів  $V_{СП} \neq P_{СП}$ , а  $V_{РДЕ} \neq P_{РДЕ}$ , виявляється можливим економічне обґрунтування занижених рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ за рахунок штучного заниження витрат енергопостачальних компаній на обслуговування реактивних перетікань споживачів ( $V_{СП} < P_{СП}$ ) та РДЕ ( $V_{РДЕ} < P_{РДЕ}$ ). Однак, це в підсумку призводить до зниження якості експлуатації електромереж та підвищення рівня витрат електроенергії в них.

Виходячи з цього, директивними документами НЕК «Укренерго» було внесено зміни в сучасну практику щодо розподілу коштів, отриманих енергопостачальними компаніями від споживачів та РДЕ за транспортування реактивної потужності. Таким чином, стало необхідним цільове використання надходжень  $P_{СП}$  та  $P_{РДЕ}$  на підвищення рівня КРП, а отже, складові  $P_{СП}$  та  $P_{РДЕ}$  можна вилучити з (2). Після цього цільова функція набуде остаточного вигляду:

$$B_Q = B_{ТП} + B_{КУ} + B_{СП} + B_{РДЕ} \quad (3)$$

Окремі складові витрат з (3), відповідно до їх фізичного змісту, можна подати у такому вигляді:

$$B_{ТП} = \Delta W_{QТП} \left( Q_{КУ\_i}, i = \overline{1, n_{КУ}} \right) \cdot C_0; \quad (4)$$

$$B_{КУ} = \sum_{i=1}^{n_{КУ}} Q_{КУ\_i} \cdot B_0; \quad (5)$$

$$B_{СП} = \sum_{j=1}^{n_{СП}} \Delta W_{QСП\_j} \left( Q_{КУ\_i}, i = \overline{1, n_{КУ}} \right) \cdot C_0; \quad (6)$$

$$B_{РДЕ} = \sum_{j=1}^{n_{РДЕ}} \Delta W_{QРДЕ\_j} \left( Q_{КУ\_i}, i = \overline{1, n_{КУ}} \right) \cdot C_0, \quad (7)$$

де  $\Delta W_{QСП\_i}$ ,  $\Delta W_{QРДЕ\_i}$ ,  $\Delta W_{QТП}$  – складові змінних (навантажувальних) втрат електроенергії в електричних мережах ЕК, зумовлені перетіканнями реактивної потужності, відповідно, до  $i$ -го споживача, до (від)  $i$ -го розосередженого джерела електроенергії та для забезпечення технологічного процесу розподілу електроенергії в ЕМ;

$Q_{КУ\_i}$  – встановлена потужність  $i$ -ої компенсаційної установки;

$C_0$ ,  $B_0$  – відповідно, ціна електроенергії у межах балансової належності енергопостачальної компанії та укрупнена питома вартість засобів КРП;

$n_{СП}$ ,  $n_{РДЕ}$ ,  $n_{КУ}$  – відповідно, кількість споживачів ЕМ, розосереджених джерел електроенергії, приєднаних до них, та компенсувальних установок, що плануються до встановлення в ЕМ.

Складова втрат  $\Delta W_{QТП}$  залежить від впливу параметрів значної кількості елементів ЕМ. Тому пропонується визначати її з балансу електроенергії, попередньо розрахувавши інші складові:

$$\Delta W_{QТП} = \Delta W_{Q\Sigma} - \sum_{i=1}^{n_{СП}} \Delta W_{QСП\_i} - \sum_{i=1}^{n_{РДЕ}} \Delta W_{QРДЕ\_i}, \quad (8)$$

де  $\Delta W_{Q\Sigma}$  – сумарні розрахункові втрати електроенергії в межах балансової належності ЕК, викликані перетіканнями реактивної потужності в її електромережах.

Ефективність планування електроощадних заходів, що є кінцевою метою застосування моделі (3), залежить від точності розрахунку навантажувальних втрат електроенергії. В свою чергу точність розрахунку визначається інформаційною та методичною похибками й безпосередньо пов'язана з об'ємом та якістю початкових даних від засобів вимірювання.

В невідгладному становищі опинилися розподільні мережі 10(6) кВ, на які, за окремими оцінками, припадає до 30% звітних витрат електроенергії. Однак, вони є інформаційно не пристосованими для ефективного розв'язання задачі розрахунку змінних (навантажувальних) втрат. Необхідна точність розрахунку навантажувальних втрат електроенергії не забезпечується наявною вхідною інформацією. Отже, для задач підвищення ефективності взаєморозрахунків за відпущену електроенергію та розрахунку змінних втрат електроенергії з метою їх запропоновано використовувати інформацію з бази даних АСКОЕ.

Мінімальна систематична похибка розрахункових навантажувальних втрат електроенергії  $\Delta W_H$  за проміжок часу  $t$  відповідає методу поелементних розрахунків [3]:

$$\Delta W_H = \sum_{j=1}^m \left\{ \left[ \sum_{i \in N_j} \frac{P_i}{U_i} \right]^2 k_{\Phi Pj}^2 + \left[ \sum_{i \in N_j} \frac{Q_i}{U_i} \right]^2 k_{\Phi Qj}^2 \right\} R_j t, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість елементів мережі;

$P_i, Q_i$  – середні за період  $t$  активна та реактивна потужності  $i$ -го споживача (локального джерела електроенергії);

$R_j$  – активний опір  $j$ -того елемента ЕМ;

$U_i$  – лінійна напруга у  $i$ -му вузлі ЕМ;

$k_{\phi Pj}^2, k_{\phi Qj}^2$  – коефіцієнти форми графіків, відповідно, активного та реактивного навантажень  $j$ -го елемента ЕМ;

$N_j$  – множина вузлів ЕМ, що отримують електроенергію через  $j$ -ий елемент.

Після введення позначень та поділу (9) на складові:

$$\Delta W_H = \Delta W_{P\Sigma} + \Delta W_{Q\Sigma};$$

$$\Delta W_{P\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i \in N_j} \Delta P_{Pij} k_{\phi Pj}^2 \right\} t; \quad \Delta W_{Q\Sigma} = \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{i \in N_j} \Delta P_{Qij} k_{\phi Qj}^2 \right\} t, \quad (10)$$

за умови, що

$$\sum_{i \in N_j} \Delta P_{Pij} = \left[ \sum_{i \in N_j} \frac{P_i}{U_i} \right]^2 R_j; \quad \sum_{i \in N_j} \Delta P_{Qij} = \left[ \sum_{i \in N_j} \frac{Q_i}{U_i} \right]^2 R_j,$$

де  $\Delta P_{Pij}, \Delta P_{Qij}$  – втрати потужності в  $j$ -му елементі ЕМ, зумовлені перетіканнями, відповідно, активної та реактивної потужностей до  $i$ -го споживача (джерела) електроенергії в режимі середніх навантажень;

$\Delta W_{P\Sigma}$  – сумарні втрати електроенергії в ЕМ, зумовлені перетіканнями активної потужності.

Як видно з виразу (9), вихідна інформація повинна бути представлена двома видами даних: схемною  $\mathbf{X}_S$  та режимною  $\mathbf{X}_R$  інформацією. Використовуючи інформаційне забезпечення АСКОВЕ, режимні параметри  $\mathbf{X}_R$  можна отримати обробляючи дані з датчиків активної та реактивної електроенергії, а також датчиків напруги, автоматичне опитування яких відбувається з певною дискретністю  $t$ . Множина схемних параметрів  $\mathbf{X}_S$  отримується за каталожними або паспортними даними та за результатами діагностування або випробувань.

З (10) виходить, що для визначення окремих складових сумарних втрат електроенергії  $\Delta W_{Q\Sigma}$ , що зумовлені реактивними перетіканням до певних споживачів  $\Delta W_{QСП\_i}$  та РДЕ  $\Delta W_{QРДЕ\_i}$  постає задача розподілу втрат електроенергії, яка може бути розв'язана з застосуванням відповідних методів розподілу втрат активної потужності.

### Висновки.

1. Питання взаємовпливу розосередженого генерування та електроспоживання в електромережах на сьогодні є мало дослідженими. Недослідженість окремих питань проявляється у некоректності визначення ЕЕРП для таких електромереж, а також заниженні економічно обґрунтованих рівнів компенсації реактивної потужності, що погіршує умови роботи юридичних споживачів, а також власників РДЕ, які транспортують електроенергію з використанням ЕМ. Крім того, погіршуються економічні показники функціонування власне розподільних електромереж.

2. В сучасних умовах функціонування розподільних електромереж енергопостачальних компаній формуються сприятливі умови для впровадження засобів індивідуальної та групової компенсації реактивної потужності. Однак невідповідність класичної постановки задачі та особливостей компенсації реактивної потужності в умовах розбудови засобів розосередженого генерування, не дозволяє формувати ефективні технічні рішення у даному напрямку.

3. Для комплексного врахування впливу суб'єктів оптового ринку електроенергії на функціонування електричних мереж вдосконалено структуру витрат енергопостачальної компанії, пов'язаних з обслуговуванням реактивних перетікань. Вона додатково враховує витрати, пов'язані з обслуговуванням перетікань реактивної потужності для потреб технологічного процесу транспортування електроенергії, а також витрати, які виникають за рахунок транспортування

реактивної потужності від РДЕ. Показано, що останні можуть виявлятися від'ємними за рахунок групової компенсації реактивної потужності.

#### Список використаних джерел:

1. Праховник А. В. Комплексне і системне вирішення проблем компенсації реактивних навантажень в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній [Текст] / А. В. Праховник, В. М. Божко, Б. С. Рогальський, О. М. Нанака // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 2. – С. 2–9.
2. Вітт І.В. Визначення ефективності автоматизації управління компенсувальними установками в умовах експлуатації [Текст] / І. В. Вітт, Л. Н. Добровольська, І. П. Сосенко // Матеріали наукового семінару «Проблеми та перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств» . – 2009. – С. 54–57.
3. Железко Ю. С. Методы расчета нагрузочных потерь электроэнергии в радиальных сетях 0,38 – 20 кВ по обобщенным параметрам схем [Текст] / Ю. С. Железко // Электрические станции. – 2006. – № 1. – С. 31–37.
4. Лежнюк П. Д. Модели и методы выбора мероприятий по снижению потерь электрической энергии в распределительных сетях [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Н. М. Черемисин [та ін.] // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 8. – С. 32–36. – ISSN 0424–9879.
5. Грицюк І.В. Компенсація реактивної потужності в локальній електричній системі [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, І. В. Грицюк // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2011. – №3. – С. 32–33.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2017



УДК 620.197

Б.М. Дацко, Г.В. Чумало

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

### ВПЛИВ ХЛОРИДНО-СУЛЬФІДНИХ СЕРЕДОВИЩ НА ЄМНІСНО ОМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ

Досліджено ємнісно – омичні характеристики лакофарбових епоксидних покриттів вітчизняного виробництва Vimpel® епоху SF mastic та норвезької фірми Jotamastic 87 GF у хлоридно – сульфідних середовищах: модельній морській воді без сірководню та насиченій сірководнем, та з вмістом 15 мг/л сірководню. Показано, що покриття Vimpel® епоху SF mastic придатне до використання у сірководневих середовищах: навіть після 1200 днів випробувань ємнісно – омичні характеристики цього покриття залишаються незмінними. Враховуючи різке зменшення активного опору епоксидного покриття Jotamastic 87 GF, не рекомендується його використовувати як самостійне у розчині NACE. В інших досліджуваних середовищах ємнісно - омичні показники цього покриття змінюються незначно зі зростанням вмісту сірководню, що робить його придатним для використання.

*Ключові слова:* покриття, ємність, опір, сірководень.

Рис. 2. Літ. 6

Б.Н. Дацко, Г.В. Чумало

### ВЛИЯНИЕ ХЛОРИДНО-СУЛЬФИДНЫХ СРЕД НА ЁМКОСТНО - ОМИЧЕНСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Исследовано ёмкостно - омические характеристики лакокрасочных эпоксидных покрытий отечественного производства Vimpel® епоху SF mastic и норвежской фирмы Jotamastic 87 GF в хлоридно - сульфидных средах: модельной морской воде без сероводорода и насыщенной сероводородом, и с содержанием 15 мг/л сероводорода. Показано, что покрытие Vimpel® епоху SF mastic пригодно к использованию в сероводородных средах: даже после 1200 суток испытаний ёмкостно - омические характеристики этого покрытия остаются неизменными. Учитывая резкое уменьшение активного сопротивления эпоксидного покрытия Jotamastic 87 GF, не рекомендуется его использовать как самостоятельное в растворе NACE. В других исследуемых средах ёмкостно - омические показатели этого покрытия изменяются незначительно с ростом содержания сероводорода, что делает его пригодным для использования.

*Ключевые слова:* покрытие, ёмкость, сопротивление, сероводород.

B.M. Dacko, H.V. Chumalo

### INFLUENCE OF CHLORIDE - SULFIDE ENVIRONMENTS ON THE CAPACITY-OMIC PROPERTIES OF EPOXY COATINGS

The capacitive - ohmic characteristics of Vimpel® epoxy SF mastic varnish - and - paint epoxy coatings and the Norwegian company Jotamastic 87 GF in chloride - sulfide environments: model sea water without hydrogen sulfide and saturated with hydrogen sulfide, and containing 15 mg / l hydrogen sulfide have been studied. It was shown that the Vimpel® epoxy SF mastic coating is suitable for use in hydrogen sulfide media: even after 1200 days of testing, the capacitive-ohmic characteristics of this coating remain unchanged. Given the sharp decrease in the active resistance of the epoxy coating Jotamastic 87 GF, it is not recommended to use as an independent in NACE solution. In other investigated environments, the capacitance-ohmic parameters of this coating vary insignificantly with increasing of hydrogen sulfide content, which makes it suitable for use.

*Key words:* coating, capacity, resistance, hydrogen sulphide

**Постановка проблеми.** Важливе значення для роботоздатності гідроконструкцій має ефективність їх протикорозійного захисту. Переважно для цього використовують лакофарбові покриття в сукупності із катодним захистом [1,2]. Особливістю експлуатації металоконструкцій на шельфі Чорного моря є присутність сірководню, що може істотно впливати на корозійно – механічні властивості покриттів. Одним із методів корозійного контролю лакофарбових покриттів є електрохімічний метод зміннострумового імпедансу, який дає можливість оцінити ступінь пошкодження покриття. Дослідження, присвячені впливу сірководневих середовищ на ємнісно – омичні характеристики покриттів, а отже і їх роботоздатність, практично відсутні.

**Мета роботи** - встановити вплив сірководню на ємнісно-омичні характеристики лакофарбових епоксидних покриттів у хлоридно-сульфідних середовищах, що дасть можливість забезпечити корозійний моніторинг покриттів.

**Матеріали та методика експерименту.** Досліджували лакофарбові епоксидні покриття: Vimpel® епоху SF mastic вітчизняного виробника НВП «ВИМПЕЛ» ТОВ товщиною  $\delta \approx 900 \pm 10$  мкм та Jotamastic 87 GF норвезької фірми Jotun – два шари товщиною  $\delta \approx 250 \pm 10$  мкм кожен. Їх наносили відповідно до технологічних вимог виробників на зразки зі сталі 20, які підготовлювали згідно з ГОСТом 9.402.-2004 [3]. Захисні властивості покриттів досліджували імпедансним методом [4, 5] шляхом вимірювання ємності та опору за частоти 1 кГц під час його витримки у корозивному середовищі за кімнатної

температури. Площа робочої поверхні зразків складала  $3,8 \text{ мм}^2$ . Використовували міст змінного струму Р-5083 з платиновим допоміжним електродом,

Випробування зразків проводили в середовищах: стандартний розчин NACE (5%-ий водний розчин  $\text{NaCl} + 0,5\% \text{ CH}_3\text{COOH}$ , насичення  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{pH } 3 \dots 4$ ,  $22+3^\circ\text{C}$ ) [6]; модельна морська вода (ММВ) – 3% - розчин морської солі:  $\text{NaCl} \leq 86,5\%$ ;  $\text{Ca}^{2+} \leq 1,5\%$ ;  $\text{Mg}^{2+} \leq 2,0\%$ , нерозчинні у воді речовини  $\leq 3,0\%$ ; ММВ з  $15 \text{ мг/л}$  сірководню; ММВ, насичена сірководнем.

**Результати дослідження.** Встановлено, що активний опір епоксидного покриття VimpeI® ероху SF mastic (рис. 1 а) знижується зі зростанням концентрації сірководню в корозивному середовищі. В перші доби випробувань опір покриття змінюється незначно і коливається в межах:  $305 \sim 300 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ ;  $300 \sim 398 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ ;  $280 \sim 275 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ ;  $250 \sim 240 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у середовищах ММВ, ММВ з вмістом  $15 \text{ мг/л}$   $\text{H}_2\text{S}$ , ММВ, насиченій сірководнем та у розчині NACE відповідно. Від 30 до 250 діб випробування епоксидного покриття спостерігається активне зниження опору: на 50% у ММВ, 65% у ММВ з вмістом  $15 \text{ мг/л}$   $\text{H}_2\text{S}$  та ММВ, насиченій сірководнем і 80% у розчині NACE. Після 250 діб експерименту залежність зміни опору покриття від часу свідчить про стабільність захисних характеристик під час випробувань у цих середовищах. Від 250 до 1100 діб випробування опір покриття змінюється незначно і коливається в межах:  $138,1 \sim 158,3 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у ММВ,  $89,1 \sim 106,0 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у ММВ з вмістом сірководню  $15 \text{ мг/л}$ ,  $85,0 \sim 99,0 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у ММВ насиченій сірководнем та  $44,1 \sim 50,1 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  в розчині NACE.

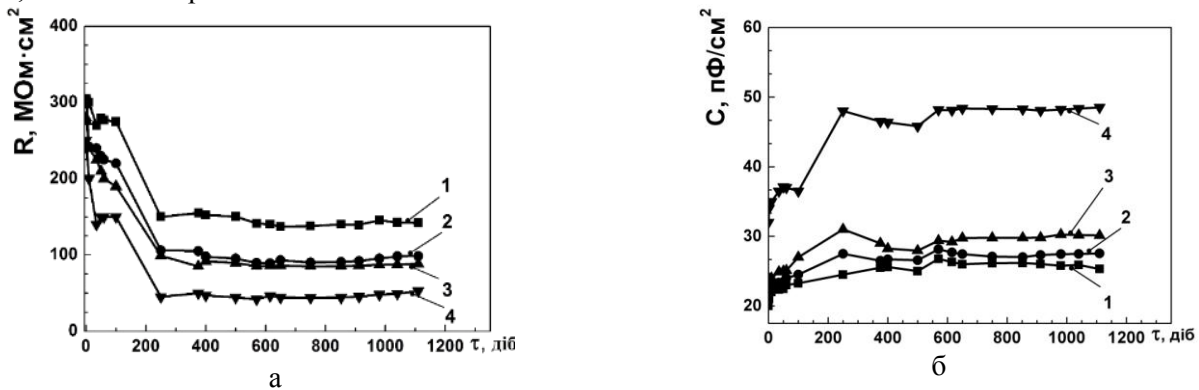


Рис. 1. Зміна активного опору (а) та ємності (б) покриття VimpeI® ероху SF mastic від часу витримки в різних середовищах.

1- ММВ; 2 – ММВ +  $15 \text{ мг/л}$   $\text{H}_2\text{S}$ ; 3 – ММВ +  $\text{H}_2\text{S}$ (нас); 4 – розчин NACE.

Зазначимо, що активний опір знижується зі зростанням концентрації сірководню в корозивному середовищі в  $\sim 1,6$  разів у ММВ з вмістом сірководню  $15 \text{ мг/л}$ , в  $\sim 1,8$  разів у ММВ насиченій сірководнем та в  $\sim 3,2$  рази у розчині NACE.

Показано, що ємність покриття VimpeI® ероху SF mastic (рис. 1 б) зростає з часом в корозивному середовищі. На відміну від опору епоксидного покриття, ємність починає зростати з перших діб випробування, аж до 250 діб на 23%, 31%, 32%, 50% у розчинах ММВ, ММВ +  $15 \text{ мг/л}$   $\text{H}_2\text{S}$ , ММВ насиченої сірководнем та NACE відповідно. Надалі впродовж експерименту спостерігається тенденція до стабільності ємності епоксидного покриття VimpeI® ероху SF mastic, лише у розчині NACE цей показник зростає на 10% за 1000 діб випробування. Показано, що від 250 до 1100 діб випробування ємність епоксидного покриття VimpeI® ероху SF mastic змінюється незначно в межах:  $25,1 \sim 26,3 \text{ пкФ/см}^2$  у ММВ;  $26,5 \sim 28,3 \text{ пкФ/см}^2$  у ММВ з вмістом сірководню  $15 \text{ мг/л}$ ;  $29,0 \sim 31,0 \text{ пкФ/см}^2$ , у ММВ, насиченій сірководнем та  $45,8 \sim 48,3 \text{ пкФ/см}^2 \times \text{см}^2$  в розчині NACE. Зі зростанням концентрації сірководню у корозивному середовищі ємність епоксидного покриття VimpeI® ероху SF mastic незначно зростає порівняно з ММВ: в  $\sim 1,1$  рази у ММВ з вмістом  $15 \text{ мг/л}$  та в  $\sim 1,2$  рази в ММВ, насиченій сірководнем, і в  $\sim 1,9$  разів у розчині NACE.

Характер зміни ємністю – омичних показників епоксидного покриття Jotamastic 87 GF ( $2 \times 250 \text{ мкм}$ ), нанесеного на сталь 20 (рис. 2) зберігається такий самий, як і для VimpeI® ероху SF mastic: активний опір знижується зі зростанням концентрації сірководню, а ємність зростає. Показано, що в перші 20 діб випробування опір покриття Jotamastic 87 GF (рис.2 а) інтенсивно змінюється в усіх середовищах, в межах:  $134,1 \sim 89,0 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у ММВ;  $127,7 \sim 74,9 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у ММВ з вмістом  $15 \text{ мг/л}$   $\text{H}_2\text{S}$ ;  $102,7 \sim 49,7 \text{ МОм} \times \text{см}^2$  у ММВ, насиченій сірководнем, у розчині NACE зменшився найбільше і становив  $52 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ . Після 340 діб випробування опір покриття складає: у ММВ  $\sim 125,4 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ , у ММВ з вмістом сірководню  $15 \text{ мг/л}$   $\sim 106,8 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ , у ММВ, насиченій сірководнем  $103,2 \text{ МОм} \times$

см<sup>2</sup>. У розчині NACE активний опір покриття різко знижується до  $\sim 2,9 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ , що свідчить про втрату його захисних властивостей. Після 550 діб випробувань активний опір покриття у досліджуваних середовищах залишається практично незмінним, за винятком розчину NACE.

Отже за 550 діб випробування активний опір покриття Jotamastic 87 GF є меншим від Vimpel<sup>®</sup> ероху SF mastic в ММВ в  $\sim 1,1$  рази, та в  $\sim 14,5$  рази у розчині NACE, натомість у ММВ з вмістом сірководню 15 мг/л та ММВ, насиченій сірководнем є дещо більшим ( $\sim 1,1$  рази).

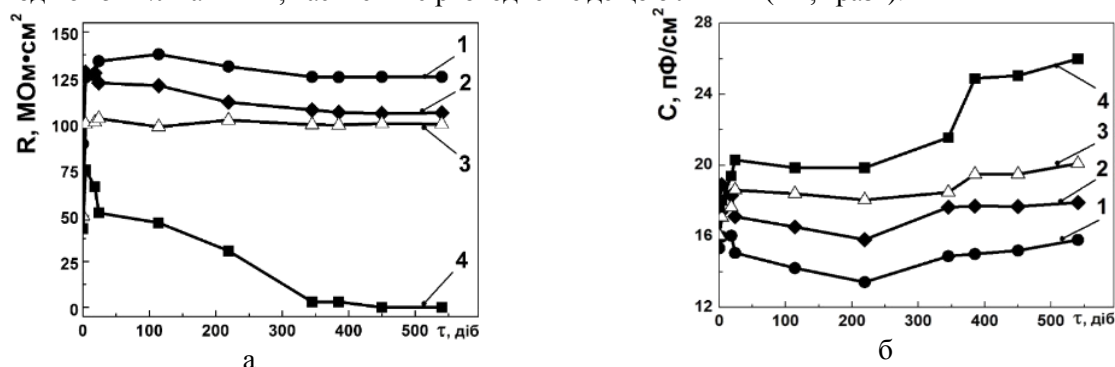


Рис.2 Зміна активного опору (а) та ємності (б) покриття Jotamastic 87 GF від часу витримки в різних середовищах.

1- ММВ; 2 – ММВ + 15 мг/л H<sub>2</sub>S; 3 – ММВ + H<sub>2</sub>S(нас); 4 – розчин NACE.

Встановлено, що ємність епоксидного покриття Jotamastic 87 GF змінюється лише у перші доби випробування (рис.2 б). Починаючи від 25 діб випробування ємність покриття у ММВ, ММВ з вмістом сірководню 15 мг/л впродовж усього експерименту зростає незначно і коливається в межах: 13,4  $\sim$  15,8 пкФ/см<sup>2</sup> та 15,8  $\sim$  17,9 пкФ/см<sup>2</sup> відповідно. Натомість у ММВ, насиченій сірководнем та у розчині NACE після 350 діб випробування ємність зростає на 16 і 25%, а за 550 діб ще плавно зростає на 10% та 23% відповідно. Ємність покриття за 550 діб випробування складає у ММВ, ММВ з вмістом 15 мг/л та насиченій сірководнем і в розчині NACE відповідно:  $\sim 15,8$ ; 17,9; 20,1; 26,0 пкФ/см<sup>2</sup>,

Зазначимо, що зі зростанням концентрації сірководню в середовищі ємність епоксидного покриття незначно зростає у ММВ з вмістом 15 мг/л та насиченій сірководнем і в розчині NACE в  $\sim 1,1$ ; 1,3; 1,7 разів відповідно, а опір зменшується в  $\sim 1,2$ ; 1,3 та 43 рази.

**Висновки.** На основі експериментальних досліджень встановлено, що ємнісно - омичні показники досліджуваних епоксидних покриттів змінюються незначно зі зростанням вмісту сірководню та агресивності середовища, що робить їх придатним для використання в сірководневих середовищах.

Враховуючи різке зменшення активного опору епоксидного покриття Jotamastic 87 GF в  $\sim 14,5$  рази (до  $\sim 2,9 \text{ МОм} \times \text{см}^2$ ) не рекомендується його використовувати як самостійне у розчині NACE. Натомість у ММВ з вмістом сірководню 15 мг/л та ММВ, насиченій сірководнем рекомендується використовувати Jotamastic 87 GF. Покриття Vimpel<sup>®</sup> ероху SF mastic вітчизняного виробництва рекомендується до використання у сірководневих середовищах: навіть після 1200 діб випробувань у розчині NACE. ємнісно – омичні характеристики цього покриття залишаються незмінними.

#### Література:

1. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. Учебник для вузов / М.В.Кузнецов, В.Ф.Новоселов, П.И.Тугунов, В.Ф. Котов В.Ф - М.: Недра, 1992. – 238 с.
2. Наружная антикоррозионная изоляция труб. Технические условия 39-0147585-49- 98/НПО «ЗНОК и ППД», 1997. – 14 с.
3. ГОСТ 9.402-2004. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию.
4. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий.– М.: Химия, 1988.–272 с.
5. Электродные процессы. Избранные труды. Институт электрохимии имени А.Н. Фрумкина АН СССР. – М. Наука, 1987.
6. NACE Standard MR-0175-96. Standard Material Requirements. Sulfide Stress Cracking Resistance Metallic Materials for Oilfield Equipment. – Houston, Tx.: National Association of Corrosion Engineers (NACE). – 1996. – 30 p.

#### РЕЦЕНЗЕНТ:

**БЛІЙ Лєвкo Мїхайлoвич** - старший науковий співробітник відділу фізико – хімічних методів протикорозійного захисту металів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, канд. техн. наук.

Стаття надійшла до редакції 31.07.2017

УДК 630\*356:63

**Л.М. Дацюк, М.В. Вржещ, Т.Л. Дацюк***Луцький національний технічний університет***ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИРІЗНОГО ДИСКА САДИЛЬНОЇ МАШИНИ**

*У статті показано принцип утворення робочої поверхні вирізного диска садильної машини. Складено схеми визначення кута атаки та побудовано графік залежності кута атаки від глибини ходу диска. Досліджено залежність кута різання прямолінійної радіальної спиці та запропоновано варіант виконання диска.*

*Ключові слова:* Садильна машина, робоча поверхня, вирізний диск, кут атаки, технологічний процес, ґрунт

**Л. Дацюк, М. Вржещ, Т. Дацюк.****ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫРЕЗНОГО ДИСКА ПОСАДОЧНОЙ МАШИНЫ**

*В статье показано принцип образования рабочей поверхности вырезного диска посадочной машины. Составлены схемы определения угла атаки и построен график зависимости угла атаки от глубины хода диска. Исследована зависимость угла резания прямолинейной радиальной спицы и предложен вариант выполнения диска.*

**L. Datsiuk, M. Vrzheshch, T. Datsiuk.****GROUND OF PARAMETERS OF THE CARVED DISK OF LANDING MACHINE**

*Principle of formation of working surface of the carved disk of landing machine is shown in the article. The schemes of determination of corner of attack are made and the chart of dependence of corner of attack from the depth of motion of disk is built. Dependence of corner is investigational cutting of rectilinear radial spoke and the variant of implementation of disk offers.*

Постановка проблеми. Для фіксації в процесі садіння хвостової частини сіянців, а також для створення сприятливих умов під час притискання та подальшого росту й розвитку сіянців необхідно, щоб садильна щілина була частково заповнена вологим розпушеним ґрунтом. Під час вибору форми садильної щілини необхідно, щоб площа її поперечного перерізу була мінімальною, оскільки в цьому випадку забезпечується мінімальна енергоємність процесу щілиноутворення.

З огляду на це, для утворення садильної щілини доцільно використовувати робочий орган у вигляді сферичного диска з вирізами на внутрішній робочій поверхні, застосування якого дозволяє отримати садильну щілину у вигляді сегмента еліпса, частково заповнену ґрунтом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З літературного огляду встановлено, що є варіанти покращення роботи садильної машини. Беручи до уваги цей аналіз, пропонуємо робочий орган для садіння сіянців – вирізний диск і проводимо вдосконалення робочих поверхонь. Такі вдосконалення диска, можливо, будуть достатніми, щоб покращити параметри, але для цього потрібно провести теоретичне дослідження.

Метою дослідження є зменшення енерговитрат під час садіння сіянців дерев та підвищення якості роботи садильних машин шляхом удосконалення технічних засобів для утворення садильної щілини та технологічного процесу передсадильної підготовки ґрунту.

Результати дослідження. Теоретичні обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи дискового робочого органа, призначеного для утворення садильної щілини виконували з урахуванням теорії дискових ґрунтообробних знарядь.

Робочі органи у вигляді сферичних дисків із суцільною робочою поверхнею, які знайшли широке застосування у багатьох лісгосподарських машинах, забезпечують підрізання бур'янів, не забиваються рослинними рештками і вологим ґрунтом та легко долають різні перешкоди. Це дає можливість використовувати дискові знаряддя там, де лемішні працювати не здатні або результати їхньої роботи не відповідають вимогам агротехніки щодо якості підготовки ґрунту. Не зважаючи на вищезгадані переваги, дискові робочі органи занадто інтенсивно діють на ґрунт, виносять на поверхню нижні, більш вологі шари та сприяють появі гребенів на поверхні. Це призводить до надмірних втрат вологи та розпилення ґрунту. Згадані недоліки стримують застосування дискових робочих органів для підготовки ґрунту та утворення садильної щілини.

Результатами досліджень Аржаних А.І., Кулебакіна П.Г., та інших учених доведено, що диски з внутрішніми вирізами забезпечують кращу якість розпушення за рахунок того, що значна частина ґрунту, підрізаною зовнішньою різальною кромкою диска, проходить через вікна на робочій поверхні диска і заповнює утворену борозну, а не переміщується в поперечному та повздовжньому напрямках. У результаті зменшується гребінчастість поверхні та тяговий опір агрегату. Крім того, застосування вирізних дисків дозволяє отримати садильну щілину частково

заповнену розпушеним вологим ґрунтом. Вирізи на робочій поверхні диска, як правило, виконують у формі сектора, таким чином зовнішня різальна кромка сполучена з центральною частиною диска прямолінійними спицями розташованими радіально.

Недоліком дисків з радіальними спицями є те, що спиці, які з'єднують зовнішню різальну кромку диска з його центральною частиною постійно забиваються рослинними рештками та залипають ґрунтом. Крім того, якщо глибина обробітку досить значна, а кут атаки невеликий спостерігається зминання стінки борозни випуклою поверхнею диска, у результаті чого спиці виконують підрізання стінок борозни. Це відбувається за умови, коли кут атаки менший критичного кута  $\alpha'$ , який визначається за формулою (рис. 1):

$$\alpha < \alpha' = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{D_a}{2R_a}\right) = \arcsin\left(\frac{D_a}{2R_a}\right), \quad (1)$$

де  $D_a$  – ширина основи сегмента диска на глибині  $a$ ;

$R_a$  – радіус кривизни сферичної поверхні сегмента диска на глибині  $a$ .

Із прямокутного трикутника  $O'O_aM$  (див. рис. 1) маємо:

$$(O_aM)^2 = (O'M)^2 + (O'O_a)^2.$$

Оскільки  $O_aM = \frac{D_a}{2}$ ,  $O'M = \frac{D}{2}$ ,  $O'O_a = \frac{D}{2} - a$ , отримаємо:

$$\left(\frac{D_a}{2}\right)^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2.$$

Розв'язавши останнє рівняння відносно  $D_a$  отримаємо:

$$D_a = 2\sqrt{a(D-a)}. \quad (2)$$

Із прямокутного трикутника  $OO_aM$  (див. рис. 1) можна записати:

$$(O_aM)^2 = (OM)^2 - (OO_a)^2.$$

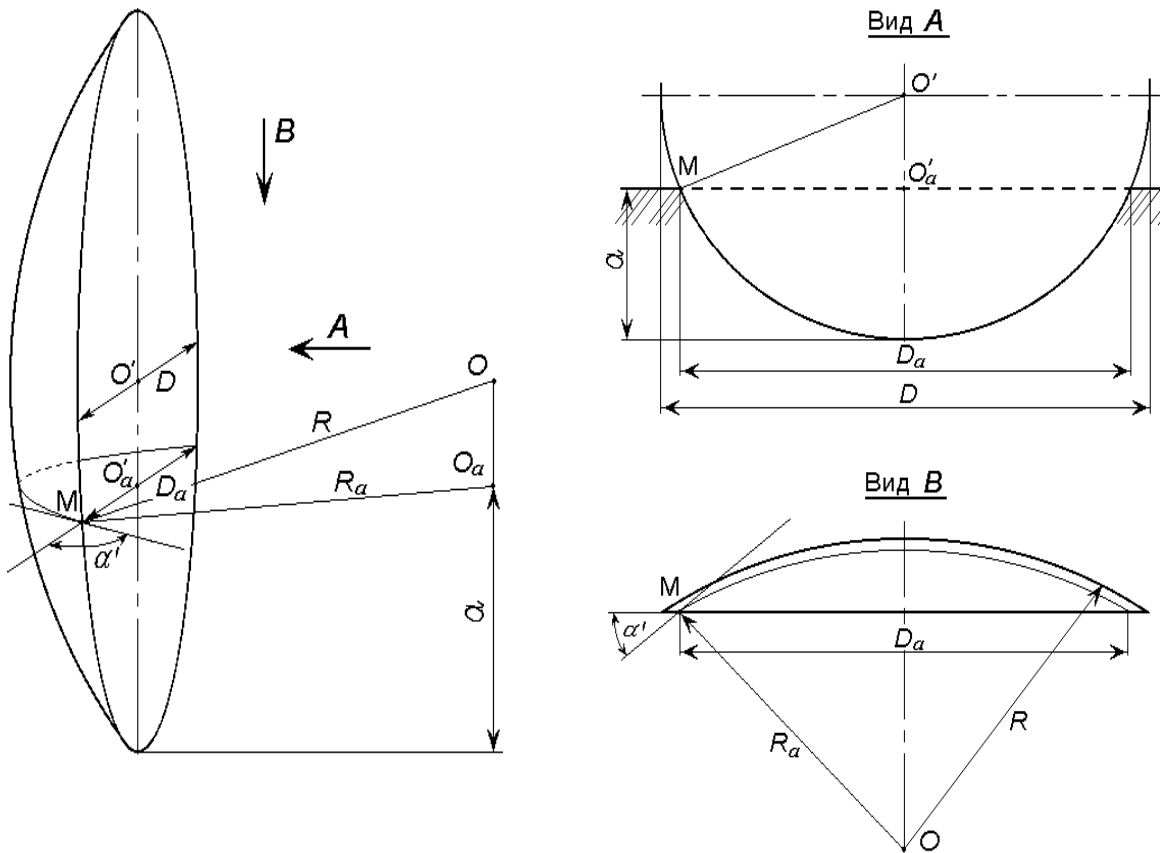


Рис. 1. Схема визначення кута атаки, при якому диск діє на стінку борозни випуклою поверхнею

Оскільки  $O_aM = R_a$ ,  $OM = R$ ,  $OO_a = \frac{D}{2} - a$ , отримаємо:

$$R_a^2 = R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2,$$

$$R_a = \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}. \quad (3)$$

Площа контакту дискового робочого органа з ґрунтом залежить від діаметра диска та глибини садильної щілини і визначається за формулою:

$$S_{\text{сiтiо}} = \frac{\pi \cdot D^2}{8} - \left(\frac{D-2a}{2}\right) \cdot \sqrt{a(D-a)} - \frac{D^2}{4} \arcsin\left(\frac{D-2a}{D}\right) \quad (4)$$

Підставивши формули (2) та (3) у (1) отримаємо:

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\frac{a(D-a)}{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}}{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}\right). \quad (5)$$

Якщо, сферичний диск діаметром  $D$  та радіусом кривизни сферичної поверхні  $R$  утворює садильну щілину глибиною  $a$  і встановлений під кутом атаки  $\alpha$ , який менший кута  $\alpha'$ , то у процесі роботи буде відбуватися зминання стінки борозни випуклою сферичною поверхнею, а отже, спиці будуть виконувати різання. Для забезпечення необхідної ширини садильної щілини кут атаки визначається за формулою (4), тому, прирівнявши праві частини формул (4) та (5) можна визначити глибину, при якій буде спостерігатися підрізання спицями стінки утвореної садильної щілини:

$$\arcsin\left(\frac{d_k}{2 \cdot \sqrt{a(D-a)}}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\frac{a(D-a)}{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}}{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}\right);$$

$$\frac{b}{2 \cdot \sqrt{a(D-a)}} = \frac{\sqrt{\frac{a(D-a)}{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}}{\sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2} - a\right)^2}}.$$

Після спрощення отримаємо рівняння 4-го порядку:

$$4a^4 - 8Da^3 + (4D^2 + b^2)a^2 - b^2Da - \left(R^2b^2 - \frac{D^2b^2}{4}\right) = 0.$$

Розв'язавши рівняння відносно  $a$ , знайдемо глибину, при якій відбувається зминання стінки борозни випуклою сферичною поверхнею диска (рис. 2):

$$a_{\tau} = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \sqrt{2D^2 - b^2 - b\sqrt{b^2 + 16R^2 - 4D^2}}. \quad (6)$$

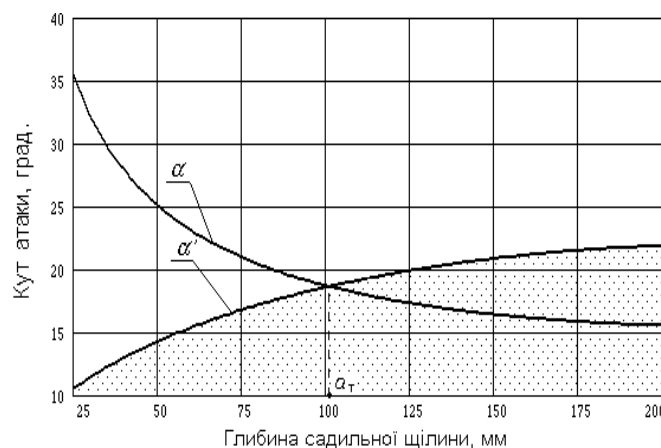


Рис. 2. Графік залежності кута атаки від глибини ходу диска

Розрахунки показують, що за глибини садильної щілини більше 10 см, спиці сферичного диска будуть приймати участь у підрізанні стінок щілини.

Якщо вирізи на робочій поверхні диска виконати таким чином, щоб спиці розташовувалися радіально і були прямолінійними (рис. 3), то кут різання  $\varepsilon$  кромки спиці можна визначити із трикутника швидкостей за теоремою синусів:

$$\frac{v'_n}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon\right)} = \frac{\omega r}{\sin(\varepsilon + \omega t)}$$

Розв'язавши рівняння (6) відносно  $\varepsilon$  отримаємо:

$$\varepsilon = \arctg\left(\frac{\omega r_k}{v'_n \cos \omega t} - \operatorname{tg} \omega t\right), \quad (7)$$

де  $v'_n$  – проекція швидкості руху агрегату на площину зовнішньої різальної кромки диска:  
 $v'_n = v_n \cos \alpha$ , де  $v_n$  – поступальна швидкість агрегату,  $\alpha$  – кут атаки диска;

$r_k$  – радіус-вектор точки контакту спиці з ґрунтом;

$\omega$  – кутова швидкість диска;

$t$  – час.

Радіус-вектор точки контакту змінюється з часом відповідно до виразу:

$$r_k = \frac{D - 2a}{2 \sin \omega t}, \quad (8)$$

Підставивши формулу (8) у (7) отримаємо:

$$\varepsilon = \arctg\left[\frac{(D - 2a)\omega}{2v'_n \sin \omega t \cos \omega t} - \operatorname{tg} \omega t\right]. \quad (9)$$

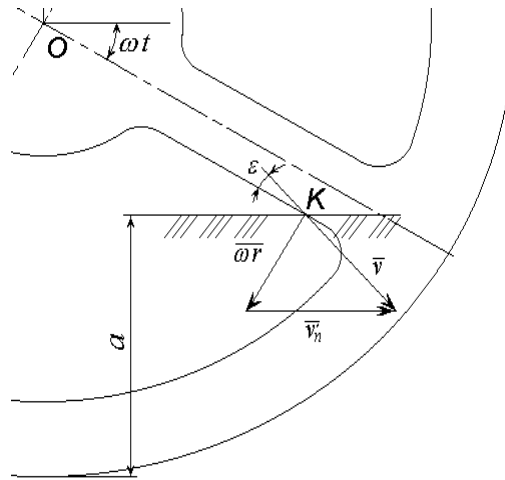
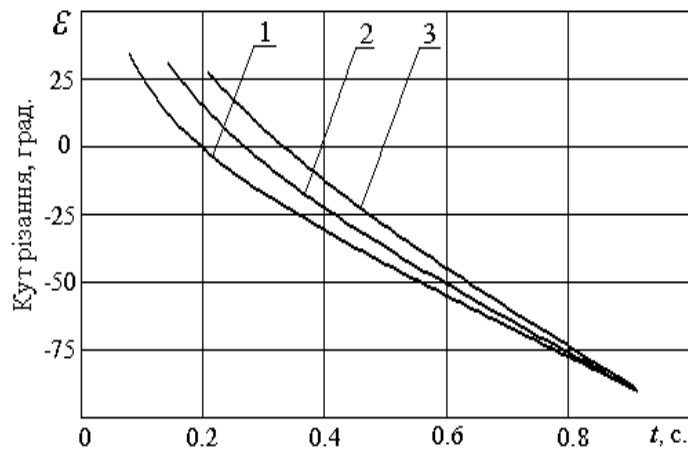
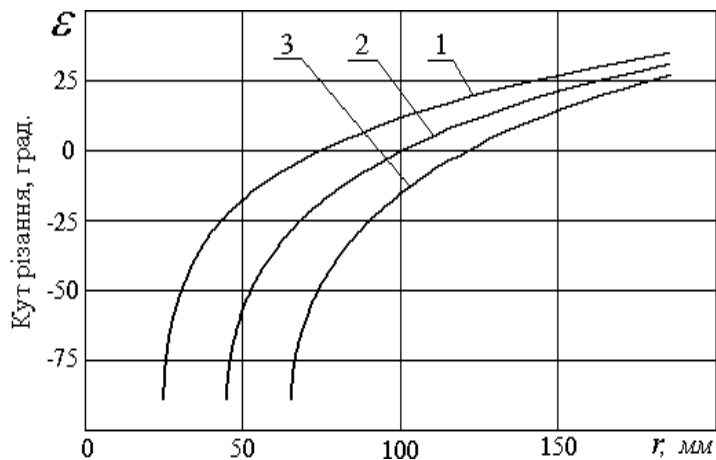


Рис. 3. Вирізний дисковий робочий орган із радіальними спицями



а)



б)

#### 4. Залежність кута різання прямолінійної радіальної спиці:

а) – від часу; б) – від довжини спиці;

1 –  $a=200$  мм; 2 –  $a=180$  мм; 3 –  $a=160$  мм.

**Висновок.** Розрахунки показують (рис. 4), що в процесі роботи значення кута різання прямолінійної радіальної спиці може приймати значення від  $35^\circ$  до  $-90^\circ$  (при  $\varepsilon > 0$  різання відбувається переднім краєм спиці, а при  $\varepsilon < 0$  – заднім). Внаслідок цього відбувається різання без ковзання, що призводить до забивання вирізів рослинними рештками та вологим ґрунтом. Усіх вищезгаданих недоліків вирізних сферичних дисків можна уникнути шляхом проектування раціональної форми спиць.

#### Література

1. Кравчук В.І., Таланчук П.М., Корабельський В.І. Диски з циклоїдними спицями. // Техніка АПК. – 2001. – №10-12. – С. 23-24.
2. Мамедов Ф.А. Оптимизация параметров дискового рыхлителя комбинированного почвообрабатывающего агрегата. // Достижения науки и техники АПК. – 2002. – №4. – С.18-19.
3. Шубенко В.О. Обгрунтування процесу роботи та параметрів кільцевого робочого органу дискової борони: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / ІМЕСГ. – К., 2002. – 20 с.
4. Машиновикористання в землеробстві / В.Ю. Ільченко, Ю.П. Нагірний, П.А. Джолос та ін.; За ред. В.Ю. Ільченка. – К.: Урожай, 1996. – 384 с.
5. Хайлис Г.А. Расчет рабочих органов почвообрабатывающих машин: Учеб. пособие. – К.: УМК ВО, 1980. – 83 с.

Рецензент д.т.н., проф. М.П. Ярошевич.

Стаття надійшла до редакції 25.12.2017



УДК 621.753.5

**В.О. Дзюра**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*  
**ВПЛИВ РОЗМІЩЕННЯ ДЕФОРМУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПАРАМЕТРИ  
РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ**

*Запропоновано конструкцію інструменту з двома рядами деформувальних елементів для формування регулярних мікрорельєфів різних типів на внутрішніх циліндричних поверхнях вібраційним обкочуванням. Визначено схеми розміщення деформувальних елементів в інструменті та отримано аналітичні залежності для визначення параметрів їх розміщення для формування різних типів регулярних мікрорельєфів.*

*Ключові слова: технологія, регулярний мікрорельєф, внутрішня циліндрична поверхня, інструмент, деформувальні елементи*

**В.А. Дзюра**

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПАРАМЕТРЫ  
РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА**

*Предложена конструкция инструмента с двумя рядами деформируемых элементов для формирования регулярных микрорельефов различных типов на внутренних цилиндрических поверхностях вибрационным накатыванием. Определены схемы размещения деформируемых элементов в инструменте и получены аналитические зависимости для определения параметров их размещения для формирования различных типов регулярных микрорельефов.*

*Ключевые слова: технология, регулярный микрорельеф, внутренняя цилиндрическая поверхность, инструмент, деформируемые элементы*

**V.O. Dzyura**

**INFLUENCE OF DEFORMATION ELEMENTS ARRANGEMENT ON REGULAR  
MICRORELIEF PARAMETERS**

*The tools designs for machining inner cylindrical surfaces by means of vibrating roller burnishing are analyzed. Based on the conducted analysis, the driven tool with two rows of deformation elements for the formation of regular microreliefs of various types on the inner cylindrical surface by means of vibrating roller burnishing is designed. The formation conditions of regular microreliefs depending on the type of microrelief and its geometric parameters are defined. The schemes of deformation elements arrangement in the tool are proposed. The analytical dependences for determining the design parameters of the tool are developed as well as the technological parameters of the formation of regular microrelief of various types. The proposed solutions allow expanding the technological capabilities of tools used to form the regular microreliefs.*

*Keywords: technique, regular microrelief, inner cylindrical surface, tool, deformation elements.*

**Постановка проблеми.** В результаті аналізу літературних джерел [1-5] встановлено значний позитивний вплив такої фінішної операції як віброобкочування на якісні показники циліндричних поверхонь, особливо на зносостійкість. Особливістю віброобкочування є формування на поверхні оброблюваної деталі регулярного мікрорельєфу (РМР), параметри якого регламентуються [6]. Однак визначення впливу конструктивних параметрів інструментів на параметри регулярним мікрорельєфів з метою підвищення продуктивності формування РМР на циліндричних поверхнях є важливою задачею для машинобудування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Конструкції інструментів для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь віброобкочуванням запропоновані в роботах [1, 7, 8], деякі з них регламентуються [9, 10].

В роботі [8] запропоновано конструкцію інструмента для формування вібраційним обкочуванням на внутрішніх циліндричних поверхнях регулярних мікрорельєфів із забезпеченням регулювання зусилля віброобкочування для матеріалів з різними фізико-механічними властивостями. Запропоновано методику визначення конструктивних параметрів інструмента. Отримано аналітичні залежності для визначення взаємопов'язаних конструктивних параметрів інструмента в залежності від заданих вихідних даних.

В роботі [11] обґрунтовано використання багато кулькових головок для формування регулярних мікрорельєфів і запропоновано інструмент для формування РМР з розміщенням деформувальних елементів по колу. Однак при визначенні залежності між кількістю деформувальних елементів та подачею вказано, що для багато кулькових головок з кількістю кульок  $n$ , подача в  $n$  разів більша відстані між канавками, що не відповідає дійсності.

Також в усіх проаналізованих роботах не враховано вплив стохастичності подачі на процес формування регулярного мікрорельєфу, що призводить до невірного

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є встановлення залежності між параметрами різних типів РМР і конструктивними параметрами інструментів для їх формування, зокрема кількістю деформувальних елементів і їх взаємним розміщенням.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Оскільки було доведено [2, 3, 11], що збільшення кількості деформувальних елементів підвищує продуктивність формування РМР завдяки можливості збільшення подачі, то обґрунтованим є використання багато кулькових інструментів для формування РМР. Запропоновано інструмент для формування РМР з двома рядами деформувальних елементів, що забезпечує формування РМР різних типів за один прохід.

Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням (рис. 1), що складається з корпусу 1, виконаного у вигляді пустотілого циліндра, який своєю внутрішньою циліндричною поверхнею 2 осерухомо спряжений за допомогою направляючих шпонок 3 із циліндричною оправкою 4.

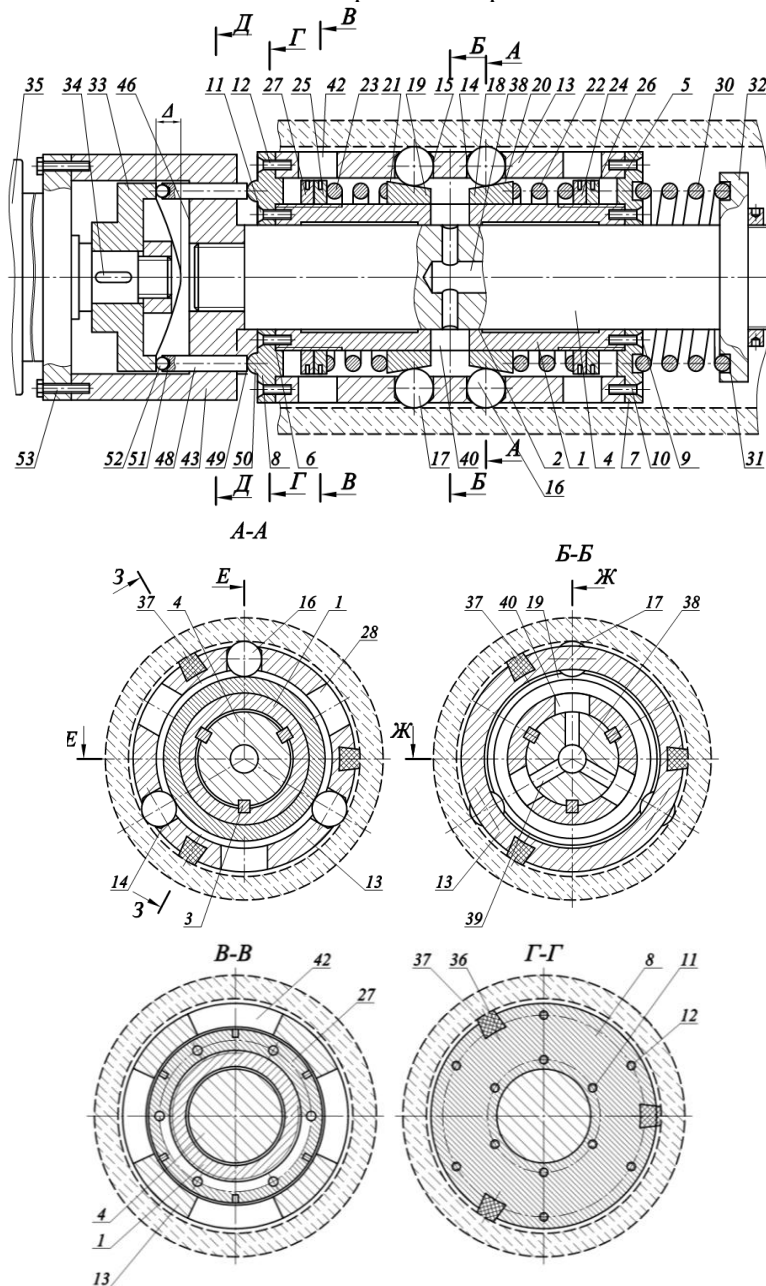


Рис. 1. Інструмент для формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях

Корпус 1 по правому і лівому торцях 5 і 6 за допомогою правого і лівого фланців 7 і 8 та гвинтів 9, 10 і 11 і 12 жорстко з'єднані із сепаратором 13, виконаним у вигляді пустотілого

циліндра. У стінці сепаратора 13 виконано три рівномірно розміщених по колу циліндричних отвори 14, у які вільно встановлені деформувальні елементи – кульки 16, а на певній відстані від них виконано додаткові три рівномірно розміщених по колу циліндричних отвори 15, у які вільно встановлені додаткові кульки 17. На зовнішній циліндричній поверхні корпусу 1, навпроти отворів 14 і 15 сепаратора, своєю внутрішньою циліндричною поверхнею встановлені кільця 18 і 19 з зовнішніми конічними поверхнями 20 і 21. Ці кільця підпружинені назустріч одне одному пружинами стиснення 22 і 23, а пружини з іншого боку своїми торцевими поверхнями обперті на регулювальні гайки 24 і 25, що зафіксовані контргайками 26 і 27. Навпроти отворів 14 і додаткових отворів 15 у стінці сепаратора 13 виконані наскрізні технологічні отвори 28 і 29. Корпус 1 разом із сепаратором 13, кульками 16 і додатковими кульками 17 через вільну поверхню правого фланця підпружинений пружиною стиснення 30 обпертою на торець 31 фланця 32 оправки 4, в напрямі до торцевого кулачка 33, який жорстко з'єднаний з вихідним валом 34 привода обертового руху 35.

На зовнішній циліндричній поверхні оправки 4, вздовж повздовжньої осі сепаратора рівномірно по колу розміщені три повздовжні пази 36, у яких встановлені, напрямні 37, наприклад із поліуретану.

В оправці 4 співвісно з віссю оправки виконаний центральний канал 38 діаметром  $D$ , для подачі змащувально-охолоджувальної рідини, який з'єднаний із трьома радіальними каналами 39, кожен діаметром  $d$ , які розміщені посередині міжцентрової віддалі між кульками 16 і 17.

Співвідношення діаметрів  $D$  і  $d$  визначається з умови недопущення явища дроселювання, тобто  $S_{ц.к.} = \pi D^2 / 4 > 3S_{р.п.} = 3\pi d^2 / 4$ , звідки  $D > d\sqrt{3}$ .

В стінці корпусу 1 на рівці осей радіальних каналів 39 виконані наскрізні вікна 40 діаметром більшим діаметра радіальних каналів 39. Для регулювання положення регулювальних 24 і 25 та фіксуючих гайок 26, 27 в стінці сепаратора 13 навпроти цих гайок виконані симетрично розміщені по колу наскрізні вікна 41 і 42.

На нижньому лівому кінці оправки 4 загвинчений стакан 43 і зафіксований гвинтами 44 і контргайками 45. У днищі 46 стакана 43 паралельно осі оправки 4 виконані два діаметрально-протилежно розміщені отвори 47, через які пропущені циліндричні штовхачі 48, які своїми правими торцями 49 обперті на сферичний виступ 50 лівого фланця 8, а лівими торцями 51 через кульки 52 спряжені із профілем торцевого кулачка 33. Привід обертового руху 35 з фланцевим з'єднанням закріплений за допомогою болтів 53 до стакана 43.

Інструмент для чистового фінішного оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь вібраційним обкочуванням працює наступним чином.

Спочатку здійснюють налаштування інструмента загвинчуванням регулювальних гайок 24 і 25, які стискають відповідно пружини 22 і 23, примушуючи переміщатись назустріч один одному кільця 18 і 19 і відцентрово у радіальних напрямках деформувальні елементи – кульки 16 і 17. При досягненні заданого зусилля вібраційного обкочування з яким кулька діє на контактуючу з нею циліндричну оболонку положення регулювальних гайок 24 і 25 фіксується контргайками 26 і 27.

Таким чином інструмент налаштований на задане зусилля вібраційного обкочування. Заготовку – циліндр, наприклад гільзу блока циліндрів двигуна внутрішнього згорання встановлюють у спеціальний пристрій металорізального верстата і надають їй обертового руху – кругової подачі.

Оправку 4 закріплюють у штанзі, яка закріплена на супорті з можливістю надання їй поступального руху – повздовжньої подачі. Встановлюють інструмент у внутрішню циліндричну поверхню заготовки – циліндра за допомогою трьох напрямних 37. В залежності від відстані  $L$  в осьовому напрямку між центрами кульок 16 і додаткових кульок 17, кута  $\alpha$  зміщення кульок 16 відносно додаткових кульок 17 в напрямі перпендикулярному осі інструменту можна отримати різні види регулярних мікрорельєфів: з паралельними канавками; із асинфазними канавками; з канавками, що перетинаються та інші.

Для забезпечення необхідної амплітуди регулярних мікрорельєфів хід  $\Delta$  торцевого кулачка вибирається рівним амплітуді коливань регулярного мікрорельєфу.

Після підготовчих операцій вмикають привід обертового руху 35 кулачка 33, який забезпечує осциляційний рух кульок 16 і 17, повздовжню подачу, яка забезпечує повздовжній рух інструмента і обертовий рух заготовки.

Таким чином, використання запропонованого інструменту забезпечить формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях в тому числі довгомірних, що підвищить їх якісні показники і експлуатаційні властивості.

Для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з паралельними канавками необхідно, щоб кількість подвійних ходів  $i$  інструменту за один оберт заготовки була цілим числом [1]. Однак при формуванні РМР багато кульковим інструментом цієї умови недостатньо.

$$\begin{cases} i_{\text{дв.х.}} = \frac{\pi \cdot D_3}{\cos \theta \cdot \lambda} \\ k = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot \cos \theta}{\lambda \cdot n} \end{cases} \quad (1)$$

де  $n$  – кількість деформувальних елементів в ряді, шт;

$\lambda$  – крок невірностей, мм;

$\theta$  – кут наряду нерівностей, град;  $\theta = \arctg\left(\frac{s}{\pi D}\right)$

$k$  – ціле число.

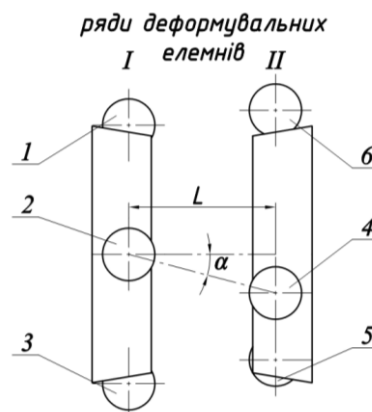


Рис. 2. Схема розміщення деформувальних елементів в інструменті

Для отримання регулярних мікрорельєфів різних типів необхідне виконання певних умов. Причому отримання однакових регулярних мікрорельєфів можливе при різному взаємному розміщенні деформувальних елементів 1-6 один відносно одного, як із їх зміщенням на певний кут (рис. 3) так і з розташуванням їх в співвісно (рис. 4).

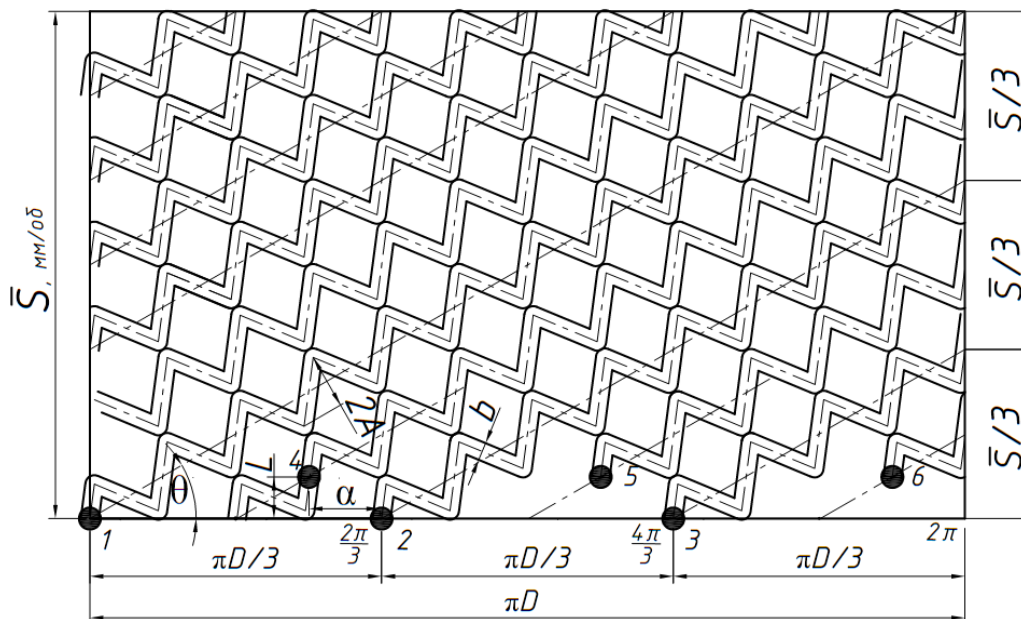


Рис. 3. Розгортка циліндричної поверхні з зображенням положення деформувальних елементів інструменту зміщених на кут  $\alpha$  для формування асинфазних РМР

Для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними трикутними чи, наприклад, синусоїдальними канавками, що дотикаються у вершинах інструментом з розташуванням рядів деформувальних елементів зміщених на кут  $\alpha$  (рис.3) повинні виконуватись наступні умови:

– відстань в осьовому напрямку між центрами кульок першого і другого ряду повинна дорівнювати

$$L = s/12, \text{ мм}$$

– кут зміщення другої групи кульок відносно першої повинен дорівнювати

$$\alpha = 60 \cdot \sin^2 \left( \arctg \left( \frac{s}{\pi D} \right) \right), \text{ град.}$$

– амплітуда повинна дорівнювати

$$A = \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b, \text{ мм.}$$

$$\theta = \arctg \left( \frac{s}{\pi D} \right) \text{ град.}$$

де  $b$  – ширина відбитку деформувального елемента, мм.

Для заданої схеми розташування деформувальних елементів (рис.4) для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними канавками, що не дотикаються чи перетинаються у вершинах змінювати необхідно змінити лише амплітуду коливань інструменту.

– для РМР з канавками, що не дотикаються амплітуда визначається із залежності

$$A < \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b \text{ мм.}$$

– для РМР з канавками, що перетинаються амплітуда визначається із залежності

$$A > \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b \text{ мм.}$$

Для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними трикутними чи, наприклад, синусоїдальними канавками, що дотикаються у вершинах інструментом з розташуванням рядів деформувальних елементів один навпроти одного (рис.4 3) повинні виконуватись наступні умови:

– відстань в осьовому напрямку між центрами кульок першого і другого ряду повинна дорівнювати

$$L = s/6, \text{ мм}$$

де  $s$  – подача інструменту, мм/об;

– кут зміщення другого ряду кульок відносно першого повинен дорівнювати

$$\alpha = 0^\circ \text{ град.}$$

– амплітуда повздовжніх коливань інструмента повинна дорівнювати

$$A = \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b, \text{ мм}$$

$$\theta = \arctg \left( \frac{s}{\pi D} \right) \text{ град.}$$

де  $b$  – ширина відбитку деформувального елемента, мм.

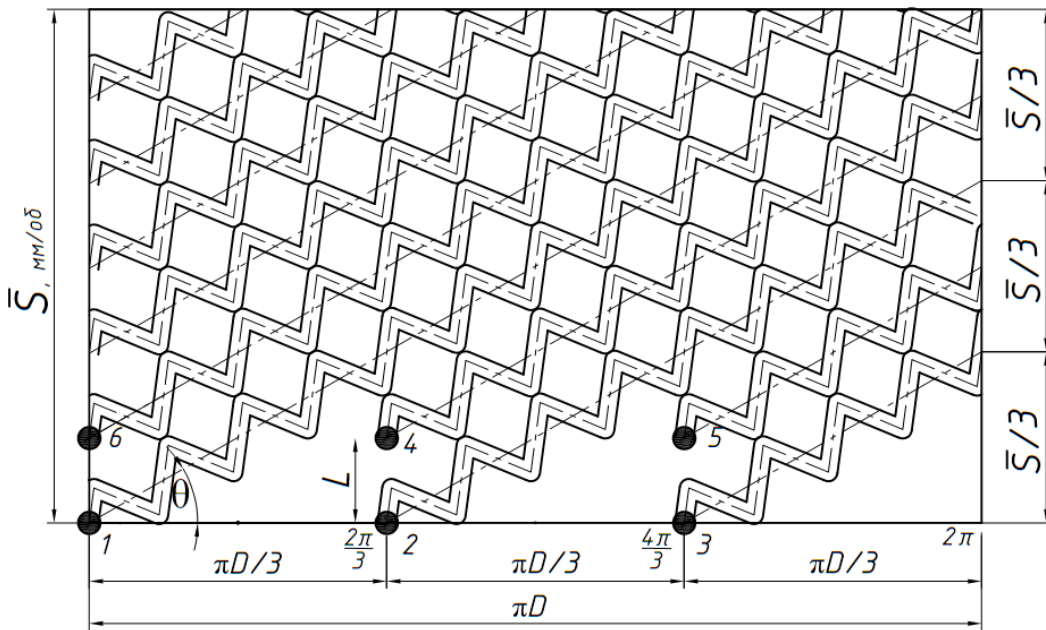


Рис. 4. Розгортка циліндричної поверхні з зображенням положення деформувальних елементів інструменту встановлених в ряд для формування асинфазних РМР

Для заданої схеми розташування деформувальних елементів (рис.3) для отримання частково-регулярного мікрорельєфу з асинфазними канавками, що не дотикаються чи перетинаються у вершинах змінювати необхідно лише амплітуду коливань інструменту.

– для забезпечення РМР з канавками, що не дотикаються амплітуда визначається із залежності

$$A < \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b \text{ мм.}$$

– для забезпечення РМР з канавками, що перетинаються амплітуда визначається із залежності

$$A > \frac{s \cdot \cos \theta}{12} - b, \text{ мм.}$$

Для отримання повністю регулярного мікрорельєфу з паралельними трикутними канавками (рис.4), які дотикаються повинні виконуватись наступні умови:

– відстань в осьовому напрямку між центрами кульок першої і другої групи повинна дорівнювати

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{6}, \text{ мм}$$

– кут зміщення другої групи кульок відносно першої повинен дорівнювати

$$\alpha = 60 \cdot \sin^2 \left( \arctg \left( \frac{s}{\pi D} \right) \right), \text{ град}$$

– амплітуда повинна дорівнювати

$$A = \sqrt{\left( \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \theta}{8 \cdot b \cdot n} \right)^2 - \frac{\lambda^2}{16}},$$

де  $\lambda$  – крок невірностей

$$\theta = \arctg \left( \frac{s}{\pi D} \right).$$

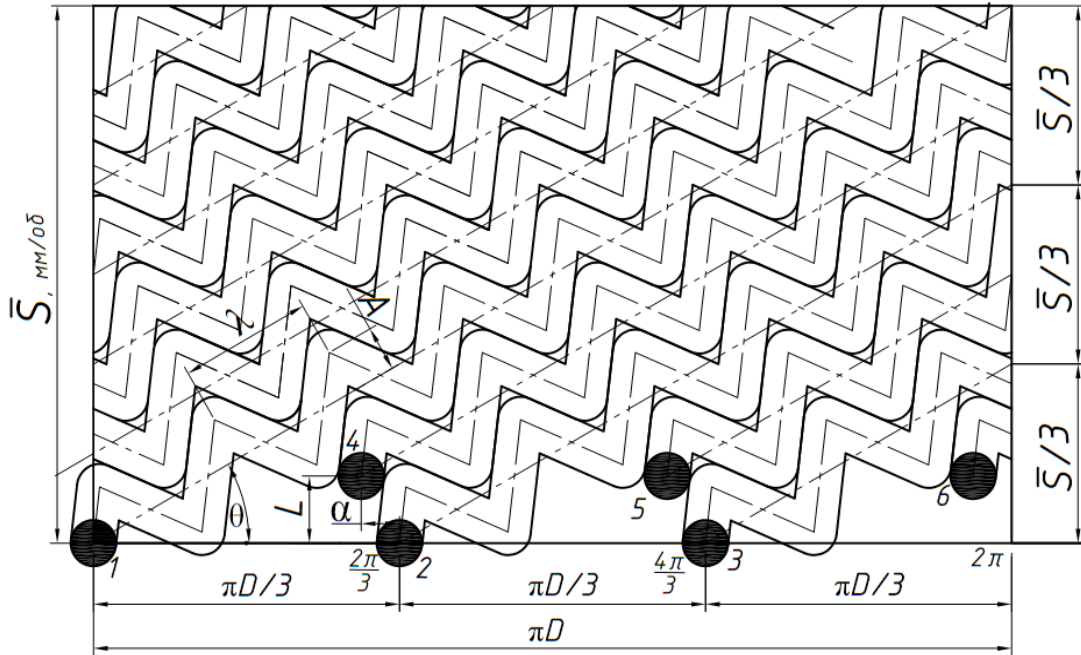


Рис. 5. Розгортка циліндричної поверхні з зображенням положення деформувальних елементів інструменту встановлених в ряд для формування синфазних трикутних РМР

В загальному випадку, залежності для визначення параметрів розміщення деформувальних елементів для формування заданих параметрів регулярних мікрорельєфів подані в таблиці 1.

Таблиця 1.

**Умови формування регулярних мікрорельєфів на внутрішніх циліндричних поверхнях інструментом з двома рядами деформувальних елементів**

Вид регулярного мікрорельєфу	Без зміщення деформувальних елементів	З зміщенням деформувальних елементів
З асинфазними трикутними або синусоїдальними канавками, що дотикаються у вершинах	$L = \frac{s}{2n}$ $A = \frac{s \cdot \cos \left[ \arctg \left( \frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{4 \cdot n} - \frac{b}{2}$ $\alpha = 0$	$L = \frac{s}{4n}$ $\alpha = \frac{360 \cdot \sin^2 \left[ \arctg \left( \frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{n}$ $A = \frac{s \cdot \cos \left[ \arctg \left( \frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{4 \cdot n} - \frac{b}{2}$
З синфазними (паралельними) трикутними канавками, що дотикаються	-	$\begin{cases} i_{\text{дв.х.}} = \frac{\pi \cdot D_3}{\cos \theta \cdot \lambda} \\ k = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot \cos \theta}{\lambda \cdot n} \end{cases}$ $L = \frac{\pi \cdot D \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{2 \cdot n}$ $\alpha = \frac{360 \cdot \sin^2 \left[ \arctg \left( \frac{s}{\pi \cdot D} \right) \right]}{2 \cdot n}$ $A = \sqrt{\left( \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \theta}{8 \cdot b \cdot n} \right)^2 - \frac{\lambda^2}{16}}$

**Висновки.** В статті запропоновано конструкцію інструменту для формування регулярних мікрорельєфів вібраційним обкочуванням з двома рядами деформувальних елементів, що забезпечує збільшення продуктивності операції формування РМР.

Визначено умови формування різних типів регулярних мікрорельєфів багатокульковими інструментами на внутрішніх циліндричних поверхнях.

Отримано залежності для визначення конструктивних параметрів (відстань між деформувальними елементами, кут зміщення між їх рядами) багатокулькового інструменту та амплітуди його коливань для формування різних типів РМР.

#### Список використаних джерел:

1. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Ю.Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1982. – 248 с.
2. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1972. – 241 с.
3. Фельдман Я.С. Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин, приборов и их технологическое обеспечение / Я.С. Фельдман. – Л.: ЛИТМО, 1979. – 97 с.
4. Киричок П. О. Технологічне забезпечення працездатності та надійності елементів та вузлів поліграфічних машин / П. О. Киричок // Технологія і техніка друкарства. – 2003. – №1.
5. Лешенкова Л.Р. Повышение производительности процесса и улучшение эксплуатационных свойств отверстий методом пластического деформирования с образованием регулярного микрорельефа: дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.03.01. «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Л.Р. Лешенкова. – Саратов, 2002. – 18 с.
6. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. Введ. 1982–07–01. – М. : Изд.-во стандартов, 1988. – 14 с.
7. Проскуряков Ю.Г. Чистовая обработка деталей пластическим деформированием [Текст] / Ю. Г. Проскуряков, А. И. Осколков, Б. Г. Шаповалов [и др.]. – Барнаул : Алт. кн. изд-во, 1969. – 105 с.
8. Kryvyi P. Instrument for inner cylinder surfaces vibrating rolling and its structural parameters determination technique / Petro Kryvyi, Volodymyr Dzyura // Вісник ТНТУ, — Т. : ТНТУ, 2016 — Том 82. — № 2. — С. 70-81. — (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).
9. ГОСТ 17573-72. Раскатки многошариковые жесткие дифференциальные диаметром от 40 до 300 мм для размерно-чистовой обработки отверстий деталей давлением. Конструкция и размеры. (с Изменением N 1) Введ. 1973-07-01. – М. : Изд.-во стандартов, 1983. – 10 с.
10. ГОСТ17574-72. Раскатки многошариковые жесткие дифференциальные диаметром от 40 до 300 мм для размерно-чистовой обработки отверстий деталей давлением. Технические требования (с Изменением N 1). Введ. 1973-07-01. – М. : Изд.-во стандартов, 1983. – 10 с.
11. Погодаев В.П. Технологическое обеспечение параметров поверхностей с частично регулярным микрорельефом деталей пар трения [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 - Технология машиностроения / В. П. Погодаев ; ОмГТУ. – Омск, 2004. – 16 с.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2017



УДК 621.43

А.А. Дудніков, І.А. Дудніков, В.В. Дудник, О.В. Горбенко, А.О. Келемеш  
Полтавська державна аграрна академія

### ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

*У роботі розглянуті питання впливу пластичного деформування на міцнісні характеристики оброблюваного матеріалу деталей.*

*Ключові слова:* довговічність, деталь, пластичне деформування, зміцнення, напруга стиску.

*Форм. 1. Рис. 3. Літ. 7*

А.А. Дудников, И.А. Дудников, В.В. Дудник, О.В. Горбенко, А.А. Келемеш  
УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ  
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

*В работе рассмотрены вопросы влияния пластического деформирования на прочностные характеристики обрабатываемого материала деталей.*

*Ключевые слова:* долговечность, деталь, пластическое деформирование, упрочнение, напряжения сжатия.

А.А. Dudnikov, I.A. Dudnikov, V.V. Dudnik, O.V. Gorbenko, A.A. Kelemesh  
SLIMMING OF SURFACE LAYER DETAILS BY METHOD PLASTIC DEFORMATION

*In the work the questions of the effect of plastic deformation on the strength characteristics of the machined material of the parts are considered.*

*Key words:* durability, detail, plastic deformation, hardening, compressive stresses.

**Постановка проблеми.** Довговічність агрегатів та з'єднань машин регламентуються надійністю пар тертя, працездатність яких обумовлюється зносостійкістю їх матеріалу. Особливим чином проявляється вплив зносостійкості на довговічність з'єднань, де пари тертя, працюють у важких умовах.

Довговічність деталей пар тертя забезпечується застосуванням зміцнювальних технологічних процесів, серед яких провідне місце належить зміцнення цих деталей поверхневим пластичним деформуванням. Підвищення зносостійкості та забезпечення в матеріалі деталей залишкових напружень стиску при зміцненні їх робочих поверхонь дають підстави для його широкого застосування. Поверхнєве пластичне деформування сприяє підвищенню рівня фізико-механічних характеристик матеріалу поверхневих шарів деталей до рівня вимог експлуатації.

Тому, актуальним залишається дослідження спрямовані на вдосконалення відомих та розроблення нових технологічних процесів зміцнення поверхонь пар тертя, які б забезпечили високий рівень їх експлуатаційних властивостей.

**Аналіз останніх досліджень:** У багатьох випадках довговічність і надійність деталей, механізмів, матеріалів значною мірою визначається станом поверхневого шару. Особливо слід зазначити роль поверхні в процесах пластичної деформації [1].

Знаючи кінематику і закономірність деформування мікропластичної деформації можна використовувати результати досліджень для вдосконалення й створення нових технологій зміцнення поверхні. Ряд робіт [2, 3] присвячено дослідженню структури й будови поверхневого шару матеріалу при терті, що різко відрізняється від основи й значною мірою визначає зносостійкість.

У роботі [4], присвяченій проблемам міцності, визначається, що пружно-деформований стан контактної зони при терті дуже специфічний і відрізняється наступними особливостями: локалізацією деформації в найтонших поверхневих шарах, високою однорідністю (гомогенністю) пластичної деформації, що обумовлено наявністю високих тисків у зоні контакту.

Вплив деформації і зміцнення поверхневого шару оброблюваного матеріалу на величину сил тертя аналізується в роботі [5].

Одним з основних показників, що характеризують якість поверхневого шару, є шорсткість поверхні, від якої в значній мірі залежить: зношування, деформації, корозійна стійкість, міцність, концентрація напружень.

Найбільш прогресивний напрямок для підвищення експлуатаційних властивостей деталей полягає в комбінованому використанні зміцнюючої технології, що дозволяє в найбільш повній мірі задовольнити запити практики. Як правило, поверхнєве пластичне деформування (ППД) є

невід'ємною частиною комбінованого зміцнення.

Вивченню процесів ППД, їхнього впливу на стан поверхневих шарів і експлуатаційні властивості виробів присвячені роботи Б.П. Костецкого, Б.В. Дерягина, М.І. Чорновола, М.В. Молодика та інших авторів, які дають різноманітні рекомендації по визначенню параметрів обробки у нагрітому стані.

У роботі [7] визначається, що дотепер немає єдиної теорії процесів пластичного деформування і зміцнення.

Поверхнєве пластичне деформування є технологічно простим і ефективним методом поліпшення властивостей поверхневого шару деталей. Застосування ППД дозволяє при мінімальних витратах підвищити опір утоми, зносостійкості, одержувати мінімальну шорсткість поверхні, підвищувати припрацьовуваність.

Економічна ефективність зміцнення ППД створюється в основному більшим строком експлуатації і, як правило, скороченням витрат запасних частин, заміною дорогих легованих сталей більш дешевими, зменшенням витрат металу й зниженням ваги машин.

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення характеристик металу в поверхневих шарах за рахунок поверхневого пластичного деформування. Для виконання поставленої мети були сформовані наступні завдання:

- розрахувати оптимальні технологічні параметри режиму зміцнюючої обробки з метою підвищення зносостійкості деталей;

- визначити рівень залишкових напружень у поверхневих шарах деталей після ППД.

**Виклад основного матеріалу.** Оптимальним режимом поверхневого пластичного деформування є такий, котрий забезпечує максимальну витривалість матеріалу деталі в порівнянні з вихідним значенням.

Для матеріалу з даними фізико-механічними властивостями якість його обробки залежить від наступних головних факторів: глибини і фізичного стану пластичного деформованого шару, а також величини і розподілу залишкових стискаючих напружень у деталі після поверхневого пластичного деформування.

Ефективність зміцнення забезпечується наступними технологічними факторами: робочим навантаженням на ролик  $P$ , діаметра  $D_p$  ролика, поздовжньої подачі  $S$ , швидкості обкатування  $v$  та числа проходів  $N_{II}$ .

Звичайно обкатування доцільно виконувати за один прохід при швидкості  $v \leq 100$  м/хв та подачі  $S \leq 0,2$  в, де  $v$  – напівширина сліду ролика на поверхні, що оброблюють. Діаметр ролика  $D_p$  рекомендують приймати кратним діаметру вала  $D_B$ .

Таким чином, основними факторами оптимізації технологічного процесу ППД є робоче навантаження і профільний радіус ролика  $r$ , які забезпечують одержання бажаної глибини шару  $h_s$  і оптимальну інтенсивність деформації  $\varepsilon$ , обумовленої співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_s}, \quad (1)$$

де  $h$  – залишковий зсув центра контакту зближення тіл.

Параметр контакту  $h_s$  характеризує механічний стан (зміцнення, залишкову напруженість, пластичність) пластичної області поверхневого шару деталі, підданої зміцненню:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 1,2\left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (2)$$

де  $P$  – контактне навантаження;

$\sigma_T$  – границя текучості матеріалу;

$d$  – діаметр кругової площадки контакту.

Інтенсивність деформації, що виникає в зоні контакту двох тіл визначає запас пластичності матеріалу, а отже і довговічність деталі при контактному навантаженні. При контактному пластичному деформуванні поверхні деталі з метою її зміцнення інтенсивність деформації є одним з головних чинників ефективності технологічного процесу (рис. 1).

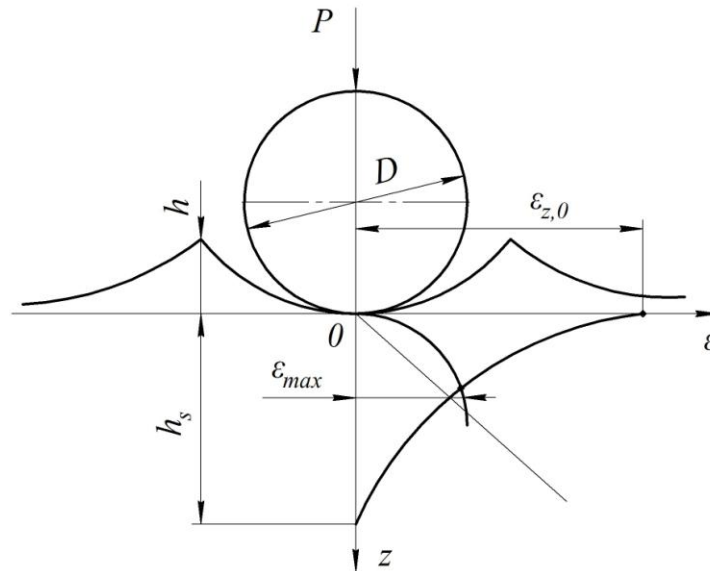


Рис. 1. Схема силового контакту інструмента з оброблюваною поверхнею

Передбачаємо, що тертя в контакті відсутнє, а по за контактом границя середовища є плоскою.

Характер залежності деформації осі переміщення від координати  $z$  визначається видом функції  $v(z)$ .

В загальному випадку зсув металу по вісі  $z$  дорівнює:

$$U_z = h e^{-\nu_z z} \quad (3)$$

У такий спосіб знаходимо осьову деформацію:

$$\varepsilon_z = -\nu_z h e^{-\nu_z z} \quad (4)$$

У випадках, коли деформація супроводжується значним тертям, максимальне значення  $\varepsilon_z$  має місце  $z \approx h_s$ .

Міцність більшої частини деталей визначається контактними напругами. Тому, дуже важливі питання вибору оптимальних режимів обробки.

Знаючи реальну картину експлуатаційних навантажень на деталь, можливо отримати в поверхневих шарах залишкові напруги стиску, які будуть перешкоджати утворенню розтягуючих напружень. Рівень напружень стиску залежить в основному від властивостей матеріалу і навантаження. Припускаємо, що одне з контактуючих тіл (обкатник) перебуває в пружному стані, а в другому (деталь) поверхневі шари в місці контакту з обкатником (індентором) перебувають в пружнопластичному стані.

При вдавлюванні пружного індентора в поверхню деталі в зоні контакту виникає залишкова вм'ятинна глибиною  $h$  і пластично деформована область  $h_s$  (рис. 2).

Величина  $h_s$  може бути знайдена з гіпотези пластичності Генки-Мизеса за умови  $z = h_s$ :

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 = 2\sigma_T \quad (5)$$

Слід зазначити, що визначення  $h_s$  може бути знайдено за формулою, отриманої Хейфецем:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}} \quad (6)$$

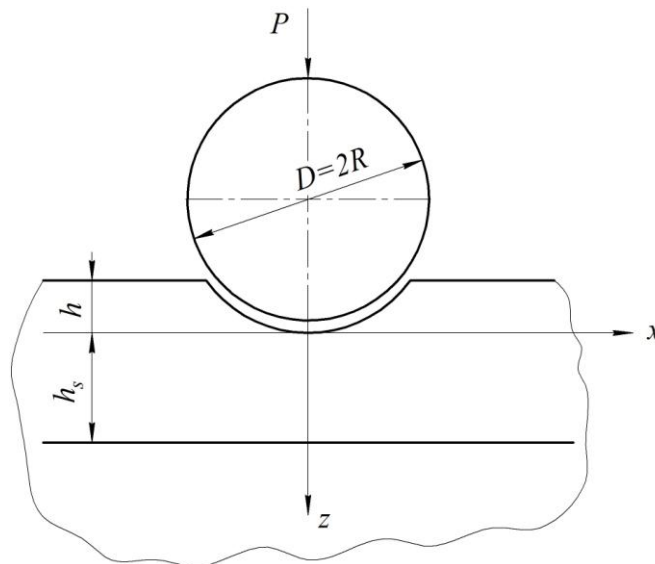


Рис. 2. Схема втиснення індентора в деталь

Величина  $h$  визначається за формулою:

$$h = \frac{P - P_0}{10\pi\sigma_T R}, \quad (7)$$

де  $P_0$  – умовне критичне навантаження.

Відомо, що пластичне деформування надає руху дислокації, створює умови для появи мікродеформацій, що сприяє наклепу, який викликає збільшення обсягу поверхневих шарів металу. Цьому заважають нижчі менш наклепані шари, які перешкоджають деформації верхніх шарів. Це викликає появу залишкових напружень стиску, які визначаються за формулою:

$$\sigma_{сис} = E \cdot \varepsilon_x \quad (8)$$

Дане рівняння дозволяє визначити рівень залишкових напружень стиску при обкатуванні роликками.

При обробці тисненням, величина подачі повинна бути менша за діаметр відтиску деформуючого елемента на поверхні, що оброблюють, бо на ній залишаються не оброблені ділянки. На рис. 3 показана залежність шорсткості поверхні від подачі при розкоченні отвору з зусиллям 100 Н.

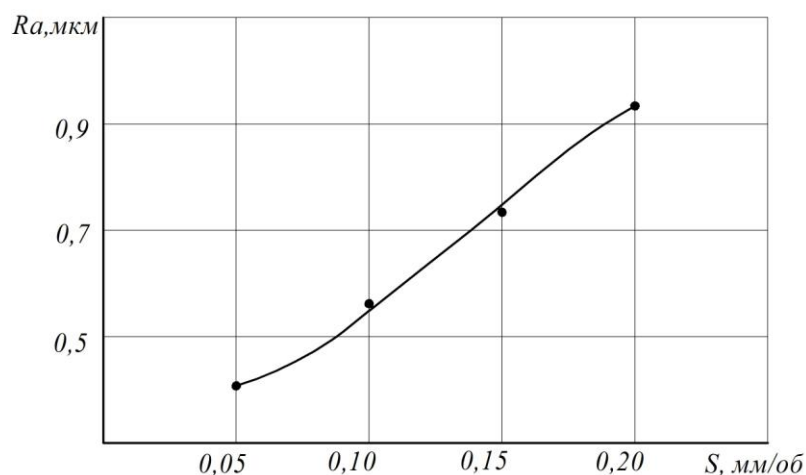


Рис. 3. Вплив подачі на шорсткість поверхні

При зміні загальної подачі при пластичному деформуванні змінюється кінцева досягнута шорсткість поверхні.

**Висновки.** Пластичне деформування створює умови для появи мікродеформацій та дозволяє не тільки збільшувати якість обробки поверхні, але й надає можливість збільшення продуктивності технологічного процесу.

#### Список використаних джерел

1. Царенко О.М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, М.В. Швайко та ін. –К.: Мета, 2003. – 448 с.
2. Гарбар И.И. О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных материалов трущихся пар / И.И. Гарбар // Трение и износ – 1990. – Т. 2. – №4. – С. 581-593.
3. Chen L.H., Rignex D.A. //Wear. 1985. Vol. 105. P. 47-61/
4. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий. – К.: Техника, 1976. – 291 с.
5. Леванов А.Н. Связь напряжений граничного трения при обработке металлов давлением с контактными скольжениями и приконтактными деформациями / А.Н. Леванов, А.В. Выдрин, В.Л. Колмогоров // Трение и износ – 1986. – Т. 7. – №3. – С. 437-445.
6. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Виттэнберг, В.А. Польмов. – М.: Наука. 1975. – 344 с.
7. Макушок Е.М. теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования / Е.М. Макушок, Т.В. Калинеевская, С.М. Красневский. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 184 с.

Стаття надійшла до редакції 07.11.2017

УДК 675.02.031.81

**Г.В. Єфімчук***Луцький національний технічний університет***ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОБВОДНЕННЯ ПРІСНОСУХОЇ СІРОВИНИ**

*У статті представлено узагальнені результати досліджень по впливу рН відмочувального середовища на швидкість та ступінь набухання шкур кроля. Пояснено особливості взаємодії продуктів електролізу з колагеном шкіри, а також встановлено, при яких технологічних режимах досягається раціоналізація процесу відмочування з використанням електроактивованих водних середовищ.*

*Ключові слова:* колаген шкіри, аноліт, католіт, відмочування шкур кроля.

**Г.В. Єфімчук****ІНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБВОДНЕНИЯ ПРЭСНОСУХОГО СЫРЬЯ**

*В статье представлены обобщенные результаты исследований по влиянию рН отмочной среды на скорость и степень набухания шкур кролика. Объяснено особенности взаимодействия продуктов электролиза с коллагеном кожи, а также установлено, при каких технологических режимах достигается рационализация процесса отмачивания с использованием электроактивированных водных сред.*

*Ключевые слова:* колаген кожи, анолит, католит, отмачивание шкур кролика.

**G. Yefimchuk****THE INTENSIFICATION OF THE SOAKING OF DRY RAW MATERIALS**

*The article presents the generalized results of investigation on the influence pH of the soaking medium on the velocity and degree of swelling of rabbit skins. The peculiarities of the interaction electrolysis products with collagen of the skin are explained. It has been established that in the acidic medium, the degree of swelling of the rabbit skin is greatest in the smallest period of time. The degree of swelling in the anolyte is greater than in the catholyte. The influence of medium nature (pH and capacity) on the duration wetting process has been revealed. The possibility of re-use anolyte for wetting of dry raw matter due to the presence of H<sup>+</sup> ions in the worked solution, which contributes to the saving of material and energy costs, has been determined.*

*The established at which technological regimes rationalization of the soaking process with the use of electroactivated aqueous media are reaching. The mechanism of interaction of electrolysis products with collagen rabbit dermis, which promotes intensification of wetting, is disclosed. It is explained that the degree of swelling of the dermis increases due to the growth of repulsion of one polypeptide chain from another under the action of the same charges*

*Key words:* skin collagen, anolyte, catholyte, soaking of rabbit skin.

**Постановка проблеми.** Шкіряно-хутрове виробництво в Україні характеризується наявністю значної сировинної бази, високопродуктивних технологій та обладнання, які дозволяють випускати якісну конкурентноспроможну продукцію. Жорстка конкуренція на зовнішніх та внутрішніх ринках збуту продукції ставить перед виробництвом завдання постійного вдосконалення технологічних процесів з метою зниження витрат енергії, матеріалів, підвищення екологічної чистоти, покращення експлуатаційних властивостей готових виробів. Вирішення цих завдань неможливе без використання нових підходів до вдосконалення фізичних та хімічних явищ при формуванні структури шкіри та хутра в підготовчих процесах шкіряно-хутрового виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В процесах приготування голини шкурка знаходиться у водному середовищі, що містить солі, кислоти та луги [1]. В роботі [2] було запропоновано використовувати в технологічних процесах взуттєвого виробництва електроактивовану воду – аноліт (рН 2...3) та католіт (рН 9,5...10,5). На першому етапі підготовчих процесів шкіряного виробництва (відмочування) проходить зміна ступені обводнення білків шкіри. Оскільки обводнення в лужному (католіт) та кислому (аноліт) середовищах протікає по ряду відмінностей від традиційного обводнення в чистій воді, доцільним є вивчення кожного процесу окремо.

**Постановка завдання.** Для отримання повної інформації про технологічний процес відмочування шкур кроля прісносухого методу консервування у кислому та лужному середовищах (аноліті та католіті) необхідно встановити особливості взаємодії продуктів електролізу з колагеном шкурки, а також визначити оптимальні фізико-хімічні показники шкурки, відмоченої в різних середовищах.

**Об'єкти та методи дослідження.** Дослідження по відмочуванню шкур кроля прісносухого методу консервування проводились за відомою [3] технологією. Сировина відповідала вимогам ГОСТ 2136-73 «Шкурки кроликів невыделанные».

З метою виключення впливу топографічних особливостей шкурки на результати експериментів дослідні зразки обирались за методом «асиметричної бахромки» [4], а кожен дослід

повторювався не менше трьох разів. Було сформовано три групи зразків по 10 зразків у кожній групі. Критерієм розподілу зразків на групи був вид відмочувальної рідини (табл. 1).

Таблиця 1.

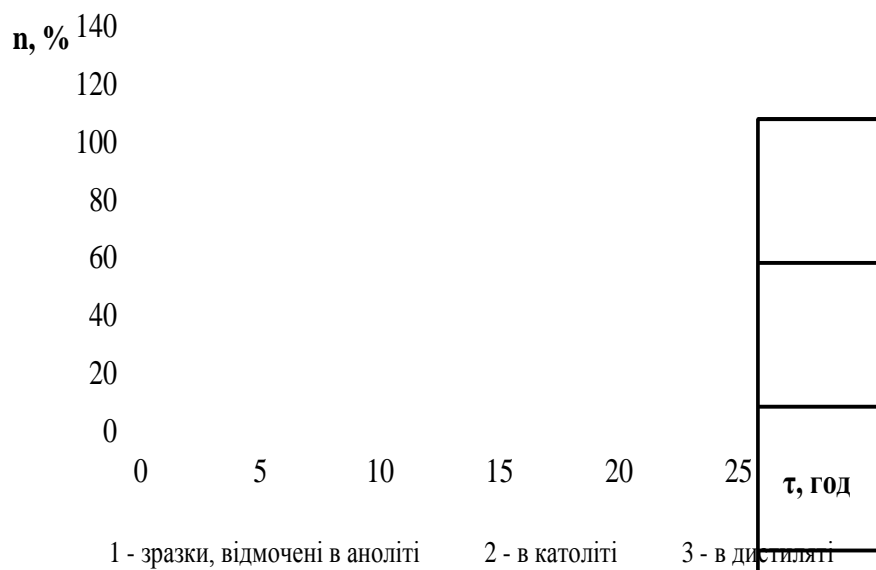
Характеристика відмочувальної рідини			
№ дослідної групи	I	II	III
Вид відмочувальної рідини	Аноліт	Католіт	Дистилят + NaCl 0,2 г/л
pH	1,7	10,5	5,4
Електропровідність, $\mu\text{S/cm}$	2300	820	450
Ємність [5], мг/л:			
$\text{H}^+$	6,9		–
$\text{OH}^-$		36	

Зразки першої групи відмочувались у воді, електроактивованій до pH 1,5...2,0 (аноліт), зразки другої групи – в воді, електроактивованій до pH 10...10,6 (католіт), зразки третьої групи – в дистильованій воді з додаванням NaCl 0,2 г/л. Електроактивована вода виготовлялась на дистиляті з додаванням NaCl.

Використання в якості контрольної рідини дистиляту з додаванням NaCl обумовлено необхідністю створення однакових початкових характеристик для різних видів відмочувальної рідини. Кількість NaCl, що додавалась в дистилят, визначалась досягненням постійних значень електропровідності розчину, рівних електропровідності водопровідної води даного району.

**Викладення основного матеріалу.** Пошукові дослідження процесу відмочування прісносухої шкіри кроля дозволили встановити доцільність використання в даному процесі електроактивованих водних розчинів. Було встановлено, що в кислому середовищі степінь набухання  $n$  шкіри кроля є найбільшим за найменший проміжок часу (рис. 1).

Відомо [6], що на степінь і швидкість набухання головним чином впливають температура і pH середовища. При підвищенні температури швидкість набухання збільшується, а степінь граничного набухання зменшується. Водневий показник pH середовища впливає на набухання реальних полімерів наступним чином: найменшу степінь набухання білки мають в області ізоелектричної точки, а по обидві сторони від неї степінь набухання зростає; досягнувши максимуму, вона знову починає зменшуватись, так що набухання переходить в повне розчинення. Результати дослідження впливу pH середовища на степінь набухання прісносухої шкіри кроля після її 4-годинного відмочування представлені на рис. 2.

Рис. 1. Степінь обводнення  $n$  прісносухої шкіри кроля після відмочування

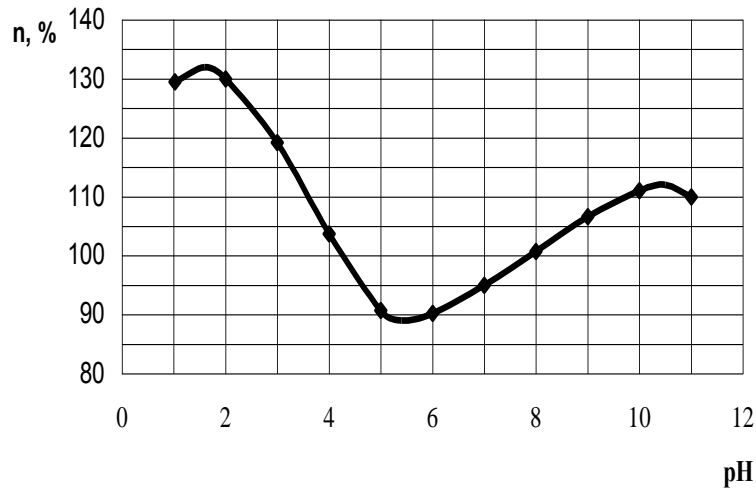


Рис. 2. Крива обводнення *n* прісносухої шкірки кроля в залежності від pH середовища

Такий вплив на набухання шкірки пов'язаний з тим, що в ізоелектричній точці заряд макромолекули білка самий мінімальний або рівний нулю, а разом з тим, мінімальна і степінь гідратації білка. Максимум набухання в кислому середовищі (аноліті) досягається при pH 1,7, а в лужному (католіті) – при pH 10,5. Степінь набухання в аноліті дещо більша, ніж в католіті. Це можна пояснити наступними положеннями. Теплоота гідратації іонів водню  $H^+$ , яка характеризує їх степінь гідратації, в 2,3 рази більша, ніж теплоота гідратації гідроксильних груп  $OH^-$  [7].

Крім цього, при однаковій кількості відмочувальної рідини та однаковій тривалості процесу для досягнення обводненого стану шкіри затрачається менша ємність [8] аноліта у порівнянні з католітом. При цьому питома сила дії аноліта на 1 г приросту вологи під час відмочування 100 г шкіри кроля прісносухою методом консервування становить 0,07 мг  $H^+$ , в той час як питома сила дії католіта – 0,48 мг  $OH^-$ . Це підтверджується тим, що після 4-годинного відмочування pH в аноліті зростає від 1,7 до 3,3, тоді як в католіті знижується від 10,5 до 7,5. Наявність іонів  $H^+$  у відпрацьованому розчині аноліта може дозволити його повторне використання.

Більшій степені обводнення шкірки в аноліті сприяє і той факт, що рухомість гідратованих іонів водню  $H^+$  більша у порівнянні з рухомістю гідратованих гідроксильних груп  $OH^-$  [9], про що свідчить більше значення електропровідності аноліта у порівнянні з електропровідністю католіта (див. табл. 1).

Обводнення шкірки в розчинах католіта та аноліта в технологічних процесах її виготовлення, зокрема на першому етапі підготовчих процесів – етапі відмочування, значно різняться між собою. Так, при відмочуванні в розчині аноліта має місце реакція взаємодії іонів водню з полярними карбоксильними групами колагену по схемі, приведеній на рис. 3.

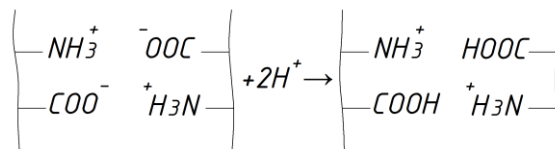


Рис. 3. Схема взаємодії іонів водню з колагеном шкірки кроля при її відмочуванні в аноліті

Як видно з реакції взаємодії (рис. 3), руйнується іонний зв'язок між аміно- і карбоксильними групами колагену, який наявний в структурі білка шкіри кроля прісносухою методом консервування. В результаті цієї реакції в структурі утворюється однойменний заряд аміногруп  $-NH_3^+$ , а карбоксильні групи переходять в незаряджений стан  $-COOH$ . Це призводить до наступних змін в структурі дерми. По-перше, заряджені аміногрупи притягують молекули води з утворенням дипольного зв'язку. По-друге, зростає відштовхування одного поліпептидного ланцюга від іншого за рахунок дії однойменних зарядів  $-NH_3^+$ .



Подібним чином, при відмочуванні в розчині католіта має місце реакція взаємодії гідроксильних груп з аміногрупами колагену (рис. 4).

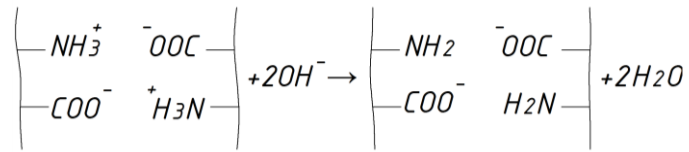


Рис. 4. Схема взаємодії гідроксильних груп з колагеном шкірки кроля при її відмочуванні в католіті

Ефект змін у структурі колагену також подібний до взаємодії аноліта з колагеном. Різниця полягає в тому, що прискорення відмочування відбувається за участю вільних карбоксильних груп  $\text{—COO}^-$ .

**Висновки.** На основі аналізу проведених досліджень можна стверджувати, що велике значення в процесі відмочування шкурок кроля прісносухого методу консервування має характер середовища, а саме його рН та ємність. Поряд з цим показано, що сила дії аноліта значно більша від сили дії католіта, що уможливило його повторне використання в технологічних процесах виробництва хутра.

### Література

1. Технология кожи / Н. В. Чернов, Ю. Н. Андронина, Л. П. Гайдаров и др.; под общей редакцией Н. В. Чернова. – М.: Гизлегпром, 1952. – 679 с.
2. Луцк Р.В., Матвієнко О.А., Бовсуновський О.В. Можливості використання електроактивованої води в технологічних процесах взуттєвого виробництва. Повідомлення №1. Оптимізація режимів утворення електроактивованої води. // Вісник КНУТД, 2005, №2, – с.53 – 59.
3. Единая технология обработки шкурок кролика. – М., 1980. – 140 с.
4. Методы испытаний обувных материалов и обуви. Ч. 1.: Физические и механические испытания обувных материалов и обуви. – М.: Гизлегпром, 1954. – 492 с.
5. Цимбаленко О. П., Савченко Г. В., Злотенко Б. М. Дослідження впливу рН електроактивованої води на її кислотну та лужну ємність // Сучасні екологічно безпечні технології виробництва шкіри та хутра: Збірник наукових праць III міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 80-річчю кафедри технології шкіри та хутра. – К.: КНУТД, 2010. – с. 170–172.
6. В. А. Волков, И. З. Пуримов, А. А. Фридлянд. Технология кожи. – М.: Легкая индустрия, 1976. – 343 с.
7. В. А. Киреев. Краткий курс физической химии. – М.: Госхимиздат, 1962. – 648 с.
8. Патент на корисну модель № 51940 Україна, МПК H01G 7/00. Спосіб визначення ємності електролітичного розчину. Савченко Г. В., Цимбаленко О. П., Злотенко Б. М., Матвієнко О. А., Данилкович А. Г. (Україна). – № u 2010 00586; Заявл. 21.01.2010; Опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.
9. Л. І. Антропов. Теоретична електрохімія: Підручник. – К.: Либідь, 1993. – 554 с.

### Рецензенти:

**Налобіна О. О.**, д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання Національного університету водного господарства та природокористування

**Пуць В. С.**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри галузевого машинобудування Луцького НТУ

Стаття надійшла до редакції 08.12.2017

УДК 628.356

**І.Б. Засідко<sup>1</sup>, М.С. Полутренко<sup>2</sup>, О.М. Мандрик<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Державне агентство водних ресурсів України<sup>2</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**РІВНЯННЯ ЛЕНГМЮРА В ДОСЛІДЖЕННЯХ АДСОРБЦІЇ ЦЕОЛІТОМ ЙОНІВ КУПРУМУ ТА МАНГАНУ**

*Досліджено процес адсорбції іонів купруму та мангану природним сорбентом (цеолітом). Отримана залежність адсорбційної здатності цеоліту від концентрації адсорбованих іонів при постійній температурі. Кількісно процес фізичної мономолекулярної адсорбції іонів купруму та мангану описується рівнянням Ленгмюра. Виведено рівняння ізотерм адсорбції цеолітом іонів купруму та мангану, що дає можливість розрахувати питому адсорбційну здатність цеоліту для будь-якої їх концентрації.*

*Ключові слова:* ізотерми адсорбції; цеоліт; питома адсорбційна здатність

**И.Б. Засидко<sup>1</sup>, М.С. Полутренко<sup>2</sup>, О.М. Мандрык<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Государственное агентство водных ресурсов Украины<sup>2</sup> Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа**УРАВНЕНИЕ ЛЭНГМЮРА В ИССЛЕДОВАНИЯХ АДСОРБЦИИ ЦЕОЛИТОМ ИОНОВ КУПРУМА И МАНГАНА**

*Исследован процесс адсорбции на границе раздела двух фаз адсорбент-жидкость, используя соотношение массы поглощенного вещества к массе адсорбента. Установлена зависимость равновесного значения адсорбции от концентрации адсорбированного вещества  $a = f(C)$  при постоянной температуре ( $T = \text{const}$ ). Количественно процесс физической мономолекулярной адсорбции ионов меди и марганца соответствует уравнению Ленгмюра. Рассчитаны уравнения изотерм адсорбции цеолитом ионов меди и марганца, которые дадут возможность рассчитать удельную адсорбционную способность цеолита для какой-либо концентрации этих ионов.*

*Ключевые слова:* изотермы адсорбции; цеолит; удельная адсорбционная способность.

**I.B. Zasidko<sup>1</sup>, M.S. Polutrenko<sup>2</sup>, O.M. Mandryk<sup>2</sup>**<sup>1</sup> State Agency of Water Resources of Ukraine<sup>2</sup> Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas**LANGMUIR'S EQUATION IN THE STUDIES OF ADSORPTION BY THE ZEOLITE OF THE COENZYME AND MANGAN IONS**

*The adsorption of copper and manganese ions by a natural sorbent (zeolite) has been studied. The dependence of the adsorption capacity of the zeolite on the concentration of adsorbed ions at a constant temperature is obtained. Quantitatively, the process of physical monomolecular adsorption of copper and manganese ions is described by the Langmuir equation. The equations of isotherms of adsorption by zeolite of copper and manganese ions are derived, which makes it possible to calculate the specific adsorption capacity of the zeolite for any concentration thereof.*

*Keywords:* adsorption isotherms; zeolite; Specific adsorption capacity

**Вступ**

Важкі метали, зокрема купрум і манган, при недостатньому очищенні стічних вод, потрапляють в ґрунтові води і далі в природні водні об'єкти. Акумуляція цих сполук в організмі негативно позначається на життєво важливих функціях гідробіонтів, в результаті виникає реальна загроза для питного та рибогосподарського водопостачання. В процесах очищення стічних вод від іонів важких металів серед широкого спектру адсорбентів особливе місце займають природні сорбенти (цеоліти), які при відносно невеликих затратах забезпечують високу адсорбційну здатність [1]. Основною характеристикою цеоліту є катіонообмінні властивості та висока ємність, тобто відношення сумарного об'єму пор до загального об'єму адсорбенту, його питома поверхня, визначена за водою, становить 59 м<sup>2</sup>/г [2,3]. Між адсорбційною здатністю цеоліту та концентрацією адсорбованої речовини при постійній температурі існує залежність  $a = f(C)$ , яку описує рівняння ізотерми адсорбції [4-6].

**Метою дослідження** є визначення питомої адсорбційної здатності цеоліту Сокирницького родовища по відношенню до іонів купруму та мангану, побудова ізотерм адсорбції та розрахунок їх рівнянь.

**Методика визначення ізотерм адсорбції.**

Дослідження адсорбції цеолітом іонів купруму та мангану проводили за статистичних умов при температурі  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$  для розчинів з концентрацією 0,05 мг/дм<sup>3</sup>, 0,1 мг/дм<sup>3</sup>, 1 мг/дм<sup>3</sup>, 5 мг/дм<sup>3</sup> та 10 мг/дм<sup>3</sup>, використовуючи цеоліт різного фракційного складу: вихідний сорбент, фракція з

діаметром зерен від 0,125 мм до 0,5 мм, яка є основою природного сорбенту, фракції з діаметром зерен від 0,5 мм до 1 мм і більше 1 мм.

Питому адсорбційну здатність  $a$  (мг/г<sub>адс</sub>) розраховували за формулою:

$$a = \frac{[(C_0) - C]}{m} \times W, \quad (1)$$

де  $C_0$  - початкова концентрація йонів  $\text{Cu}^{2+}$  та  $\text{Mn}^{2+}$  в розчині, мг/дм<sup>3</sup>;

$C$  - концентрація йонів  $\text{Cu}^{2+}$  та  $\text{Mn}^{2+}$  в розчині після контакту з цеолітом, мг/дм<sup>3</sup>;

$W$  - об'єм розчину, дм<sup>3</sup>;

$m$  - наважка цеоліту, г [4].

**Результати дослідження та обговорення.** Для опису експериментальних даних побудовані ізотерми адсорбції для йонів  $\text{Cu}^{2+}$  та  $\text{Mn}^{2+}$  фракцією цеоліту з розмірами зерен від 0,125 мм до 0,5 мм, рисунок 1.

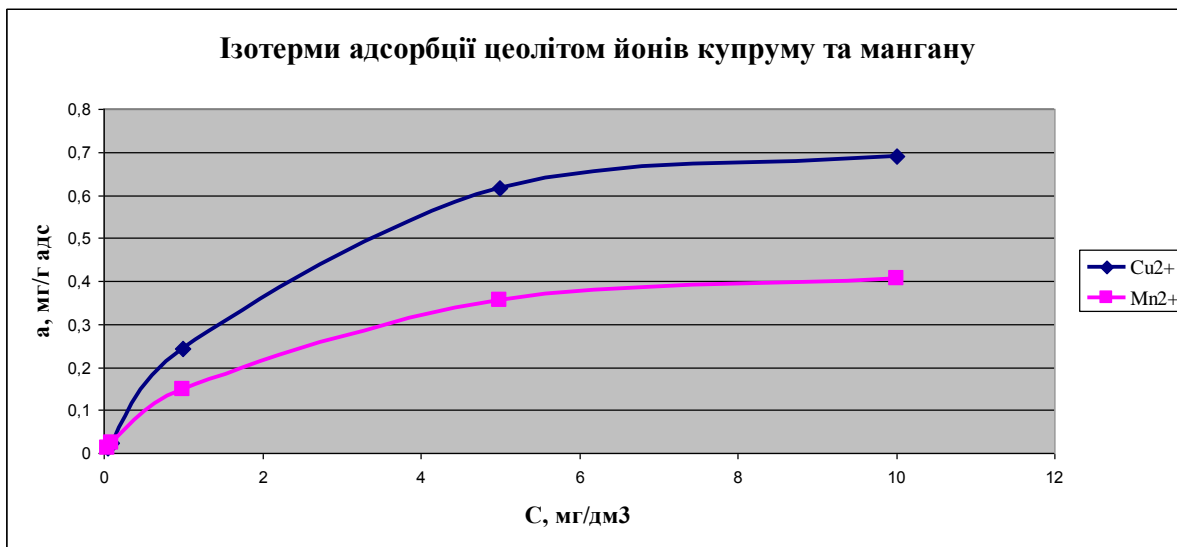


Рис. 1 – Ізотерми адсорбції цеолітом йонів купруму та мангану

Для встановлення залежності адсорбції йонів  $\text{Cu}^{2+}$  та  $\text{Mn}^{2+}$  від розмірів зерен цеоліту проведено визначення питомої адсорбційної здатності та побудову ізотерм адсорбції для фракцій різного діаметру, рисунок 2.

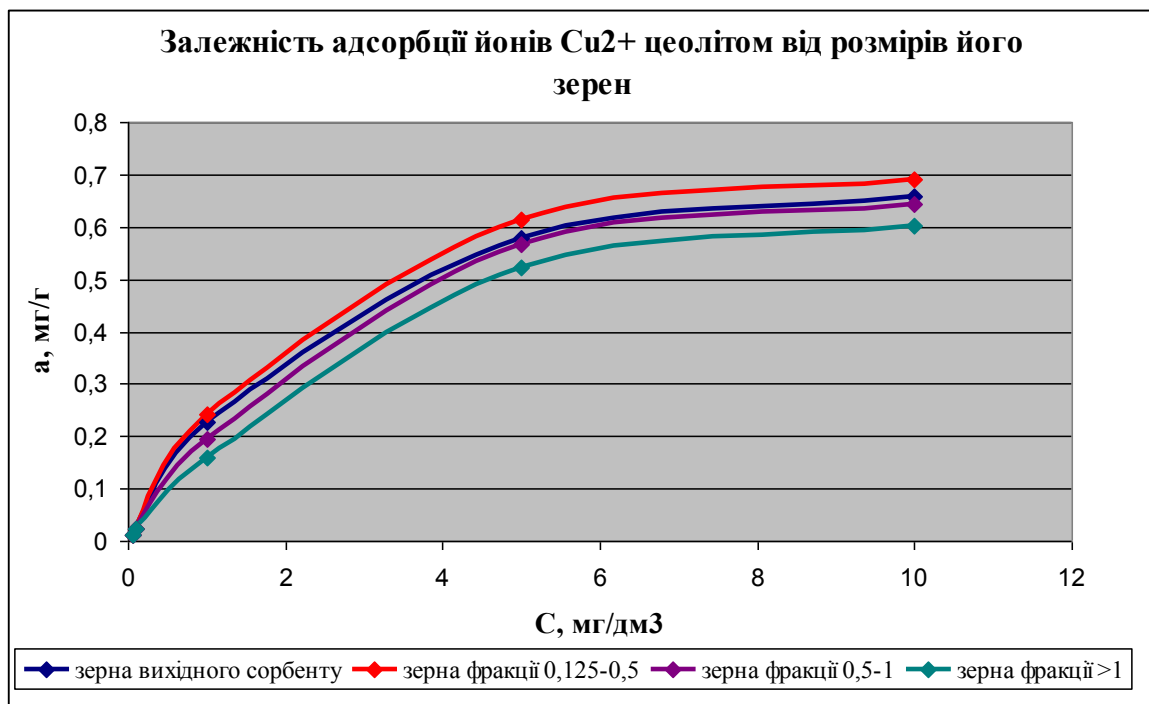


Рис. 2 – Залежність адсорбції йонів  $\text{Cu}^{2+}$  цеолітом від розмірів його зерен

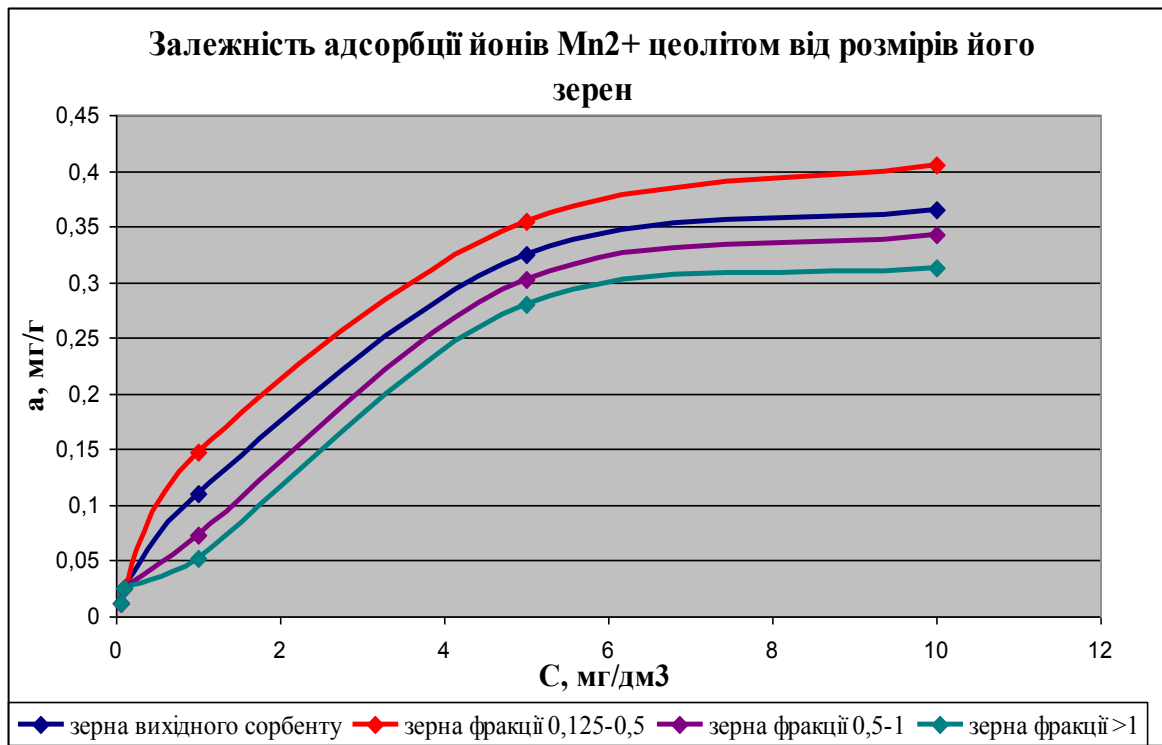


Рис 3 – Залежність адсорбції йонів  $Mn^{2+}$  цеолітом від розмірів його зерен

Отримані залежності підтверджують високу селективність цеоліту по відношенню до йонів купруму і значну селективність щодо йонів мангану. Аналіз сорбційної ємності цеоліту по відношенню до йонів купруму та мангану в залежно від розміру його зерен вказує на те, що найбільш ефективною є фракція зерен розміром 0,125-0,5 мм. Це пов'язано із збільшенням зовнішньої поверхні адсорбенту.

Ізотерми адсорбції як для  $Cu^{2+}$  так і для  $Mn^{2+}$  мають досить круту форму і це свідчить про те, що цеоліт має розвинену систему мікропор та ультрамікропор. У мікропористих адсорбентів спостерігається так званий ефект «сита», який полягає в тому, що адсорбуватися в мікропорах можуть тільки ті молекули, розмір яких менший або рівний радіусу пор [7].

За формою отримана ізотерма адсорбції відноситься до ізотерм I типу і описується теорією мономолекулярної адсорбції Ленгмюра:

- на поверхні адсорбенту утворюється моношар і адсорбовані молекули локалізовані, при цьому вони мають однакову енергію;
- адсорбція відбувається не на всій поверхні, а тільки на активних центрах, які мають некомпенсовані міжмолекулярні сили. Кожний активний центр утримує одну адсорбовану молекулу;
- адсорбційний процес перебуває в динамічній рівновазі зі зворотним процесом (десорбцією);
- мономолекулярна адсорбція відбувається за рахунок фізичної адсорбції при невеликих тисках і температурах, а також внаслідок хемосорбції [8,9].

Ізотерми адсорбції йонів  $Cu^{2+}$  та  $Mn^{2+}$  вказують на те, що проходить процес перерозподілу компонентів системи між поверхневим шаром та об'ємною фазою. При цьому відбувається концентрування розчиненої речовини на межі поділу фаз. Рушійною силою у компонентів між об'ємом і поверхневим шаром є вирівнювання їх хімічних потенціалів в об'ємі та у поверхневому шарі.

Відповідно до структури цеоліту можуть утворитися комплексні солі  $M_2(Cu(SO_4)_2) \cdot 6H_2O$  та  $M_2(Mn(SO_4)_2) \cdot 6H_2O$ , де  $M_2$  – лужні метали (Na, K) [10].

Отримані ізотерма адсорбції описуються рівнянням Ленгмюра:

$$a^* = a_{\infty} \times \frac{bC}{1 + bC} \quad (2)$$

$a_{\infty}$  - гранична кількість поглинутої речовини адсорбентом, мг/г<sub>адс</sub>;

$a$  - кількість поглинутої речовини адсорбентом мг/г<sub>адс</sub>;

$b$  - константа;

$C$  - концентрація забруднюючої речовини, мг/дм<sup>3</sup>.

Для знаходження константи  $b$  використана лінійна форма рівняння Ленгмюра:

$$\frac{1}{a^*} = \frac{1}{a_\infty \times b} \times \frac{1}{c} + \frac{1}{a_\infty} \quad (3)$$

Побудовані графічні залежності у координатах  $\frac{1}{a} = f\left(\frac{1}{c}\right)$  для йонів купруму та мангану,

що дасть можливість визначити  $a_\infty$  та описати ізотерму адсорбції рівнянням Ленгмюра, рисунок 4.

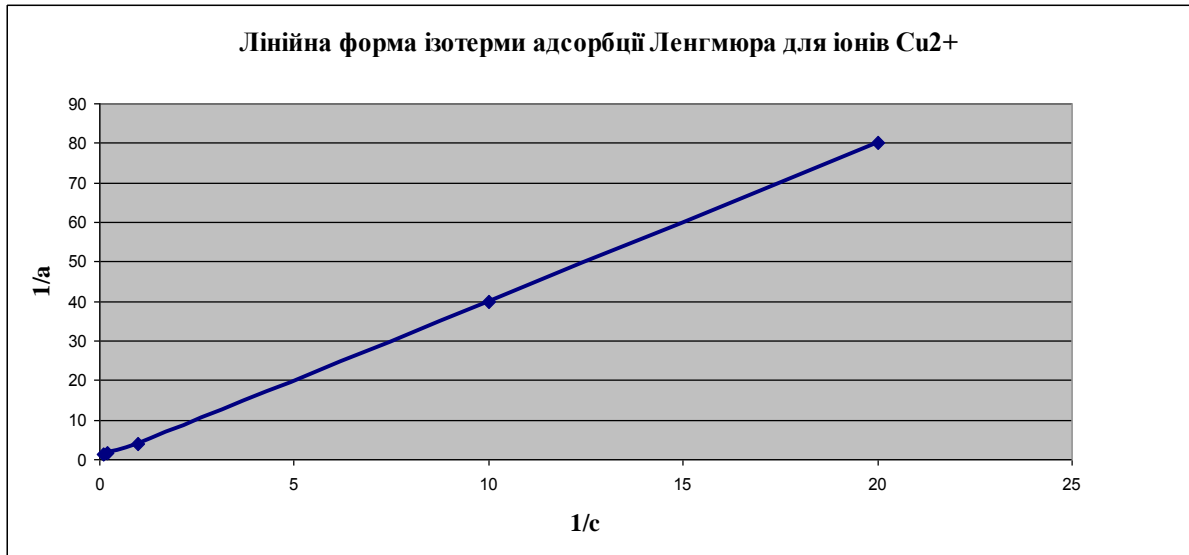


Рис. 4 - Залежність  $\frac{1}{a} = f\left(\frac{1}{c}\right)$  для йонів Cu<sup>2+</sup>

З ізотерми адсорбції Cu<sup>2+</sup> визначаємо  $a_\infty$

$$\frac{1}{a_\infty} = \frac{1}{0,690} = 1.4492 \quad a_\infty = 0.690 \text{ мг/Галс}$$

$$\text{tg}c = 0.3793$$

$$b = \frac{1}{0,690} \times 0.3793 = 0.5497$$

Рівняння ізотерми адсорбції для іонів Cu<sup>2+</sup>:

$$a = 0.690 \times \frac{0.5497c}{1 + 0.5497c}$$

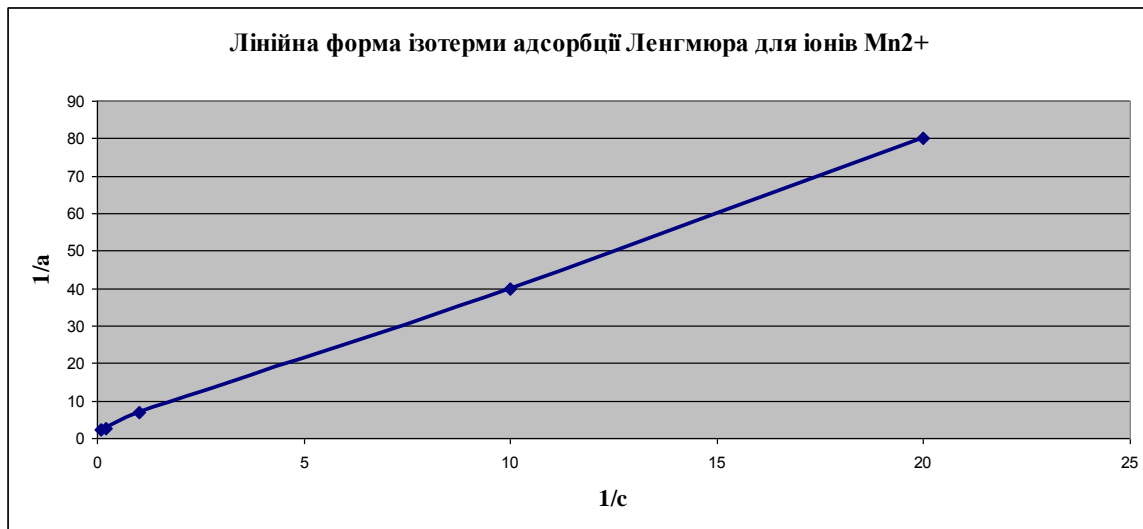


Рис. 5 - Залежність  $\frac{1}{a} = f\left(\frac{1}{c}\right)$  для іонів Mn<sup>2+</sup>

З допомогою ізотерми адсорбції Mn<sup>2+</sup> визначасмо a<sub>∞</sub>:

$$\frac{1}{a_{\infty}} = \frac{1}{0.405} = 2.47 \quad a_{\infty} = 0.405$$

$$tg\alpha = 0.3214$$

$$b = \frac{1}{0.405} \times 0.3214 = 0.7935$$

Рівняння ізотерми адсорбції для іонів Mn<sup>2+</sup>:

$$a = 0.405 \times \frac{0.7935c}{1 + 0.7935c}$$

#### Висновки:

- 1 Підтверджено високу селективність цеоліту по відношенню до іонів купруму і значну селективність щодо іонів мангану.
- 2 Встановлено максимальну адсорбцію іонів купруму та мангану в області низьких концентрацій, що свідчить про розвинену систему мікропор та ультра мікропор цеоліту.
- 3 Виведено рівняння ізотерм адсорбції іонів купруму та іонів мангану, що дає можливість розрахувати питому адсорбційну здатність цеоліту для будь-якої їх концентрації.

#### Список використаних джерел:

- 1 Scott M., Kathleen A., Prabir K. Handbook of zeolite science and technology, eds. CRC Press, 2003, p.16.
- 2 Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: пер.с англ. 2 изд. – М.: Мир, 1984. – с.306.
- 3 Киселев А.В. Поверхностные явления и адсорбция / А.В.Киселев, Я.И.Герасимов // Курс физической химии. – М.: Госхимиздат, 1963. – Т.1. – 624 с.
- 4 Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія: Підручник / Гомонай В.І. – Вінниця: Нова книга, 2007 – 496 с.
- 5 Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю.Г. Фролов – М.: Химия, 1989. – 462 с.
- 6 Воловик Л.С. Колоїдна хімія / Л.С.Воловик, Є.І.Ковалевська, В.В. Манк та ін.; за ред. В.В. Манка. – Київ.: УДУХТ, 1999. – 238 с.
- 7 Дубинин М.М. Молекулярно-ситовые эффекты как следствие активированного характера физической адсорбции / М.М. Дубинин, К.М. Николаев, Н.С. Поляков // Труды III Всесоюзной конференции по теоретическим вопросам адсорбции. – 1973. – с. 26-31.
- 8 Akyil, S. Preparation of composite adsorbents and their characteristics / S. Akyil, M. Eral // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2005. – P. 33-37.
- 9 Toth J. Calculation of the BET-compatible surface area from any type I isotherms measured above the critical temperature / J.Toth // Colloid Interface Sci. – 2000. – № 225. – P. 378-383.
- 10 Некрасов Б.В. Основы общей химии. Т.2. М., Химия, 1973. – с.668.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2017

УДК 622.831.2:539.422.3

**Л.М. Захарова***Інститут фізики гірничих процесів НАН України***ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР ПІД ЧАС НЕОБОРОТНИХ  
ДЕФОРМАЦІЙ МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

*На фізичній і комп'ютерній моделях досліджено еволюцію дисипативних структур, які спонтанно виникали у масиві гірських порід під час їх необоротного деформування. Вказані структури відображаються у вигляді кластерів, що складаються з фрагментів зруйнованої породи, вектори інкрементальних зміщень яких мають певну орієнтацію або паттерн. Розроблено методіку кластеризації на основі методу K-середніх, причому границі кластерів визначаються за допомогою діаграм Вороного.*

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

**Л.Н. Захарова****ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ НЕОБРАТИМЫХ  
ДЕФОРМАЦИЯХ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

*На физической и компьютерной моделях исследована эволюция диссипативных структур, спонтанно возникающих в массиве горных пород при их необратимом деформировании. Указанные структуры отображаются в виде кластеров из фрагментов разрушенной породы, векторы инкрементальных смещений которых имеют определенную ориентацию или паттерн. Разработана методика кластеризации на основе метода K-средних, причем границы кластеров определяются с помощью диаграмм Вороного.*

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

**L. Zakharova****INVESTIGATION OF DISSIPATIVE STRUCTURES THAT EMERGED DURING  
IRREVERSIBLE DEFORMING OF THE GROUND**

*Dissipative structure evolution has been investigated by physical modeling and computer simulation of irreversibly moving ground around underground opening. Mosaic of clusters comprising rock fragments having approximately the same vector of movement represented the dissipative structures. These structures replaced one another in discrete moments of time that facilitated effective dissipation of ground pressure energy. Distribution of the clusters and vector orientations were not symmetrical relatively the general direction of ground movement. Irreversible ground movement inside the clusters was not symmetrical too that is consequence of sequential displacement of the rock fragments and the clusters. They moved by turn, one after another minimizing entropy production. New method has been developed for identifying the dissipative structures. Irreversibly moving ground was dividing with K-meansclustering and boundaries of the clusters have been located with Voronoi tessellation.*

*Key words:* rock pressure, fracture mechanics, irreversible deformation, dissipative structure.

**Вступ**

Необоротні деформації ґрунту й масивів гірських порід супроводжують ґрунтові зсуви схилів, бортів кар'єрів, підземну розробку корисних копалин, просадку споруд та гребель. Вказані процеси створюють небезпеку для експлуатації споруд, будівель, загрожують життю людей, порушують екологічну рівновагу. Незважаючи на велику кількість виконаних досліджень, механізм необоротних деформацій твердого тіла залишається вивченим недостатньо, про що свідчать останні публікації [1]. Особливо це стосується необоротних процесів зрушення й деформування ґрунтів та масивів гірських порід навколо тунелів і підземних виробок а також зсувів ґрунтових схилів[2].

Особливістю процесу незворотного деформування масиву гірських порід є його схильність до створення складних структур навколо виробки [3]. Вказані структури мають дискретний характер і суттєво впливають на процес розширення зони непружних деформацій навколо виробки. Було доведено, що після переходу породного масиву у позамежний стан у зоні зруйнованих порід виникають короткоживучі кластери [4], які можна зафіксувати лише за умов вичленення інкрементальних необоротних зрушень. Величина таких інкрементальних зрушень повинна бути більша похибки вимірювання зміщень оточуючих виробку порід, але разом з тим, не перевищувати певний рівень. Цей рівень визначається приблизно десятикратною похибкою вимірювання зміщень.

Після руйнування оточуючі підземну виробку породи зміщуються в основному у радіальних напрямках до центру порожнини виробки. Проте детальний аналіз результатів дослідження на фізичних моделях з еквівалентних матеріалів показали, що кінематика необоротних зрушень є



набагато складнішою [4]. Виявилось, що інкрементальні необоротні зміщення порід після їх руйнування можуть змінювати напрямок відносно генерального напрямку необоротних зрушень. Тому інкрементальні зміщення порід можуть нейтралізувати одне одного, у результаті чого втрачається важлива інформація щодо складного механізму необоротного деформування порід навколо виробки, або у процесі розвитку зсуву ґрунту на похилій земній поверхні.

Встановлено [5], що короткоживучі кластери відображають еволюцію дисипативних структур. Такі структури закономірні й обумовлені другим законом термодинаміки необоротних процесів [6], згідно якому у відкритих термодинамічних системах, які пропускають через себе потоки енергії й речовини, можуть за певних умов спонтанно виникати структури, що розсіюють енергію. Наприклад, система «виробка – оточуючий масив гірських порід» є відкритою термодинамічною системою, що перетворює енергію гірського тиску у поверхневу енергію тріщин і тепло. Важливим наслідком еволюції дисипативних структур є почергове у часі і просторі зміщення порід, що суттєво знижує стійкість гірничих виробок й сприяє зсувам похилих ґрунтових поверхонь. Почерговий характер зміщення суміжних породних блоків на контурі підземної виробки було доведено шахтними інструментальними спостереженнями [8]. Проте дисипативні структури розвиваються у тривимірному просторі і для їх детального вивчення необхідно розробити відповідні методи. Отже невирішеною частиною проблеми є вдосконалення методики кластеризації інкрементальних зрушень, що сприятиме підвищенню достовірності висновків щодо почергового деформування масиву гірських порід.

Таким чином цілком статті є вдосконалення методики кластеризації інкрементальних зрушень масиву гірських порід, що дозволить дослідити дисипативні структури, які виникають під час його необоротних зрушень і деформування.

#### Вдосконалення методики кластеризації

Еволюція дисипативних структур була зареєстрована у вигляді варіації мозаїки полів інкрементальних зрушень [7,4]. На рис. 1 показано двовимірну модель виробки, яка мала прямокутний переріз розмірами 2 м x 5 м. Моделювання виконувалось у геометричному масштабі 1:35,8. У якості еквівалентних матеріалів використовувалась суміш піску, гіпсу, крейди і води у співвідношенні 92.26:2.77:1.37:3.6.

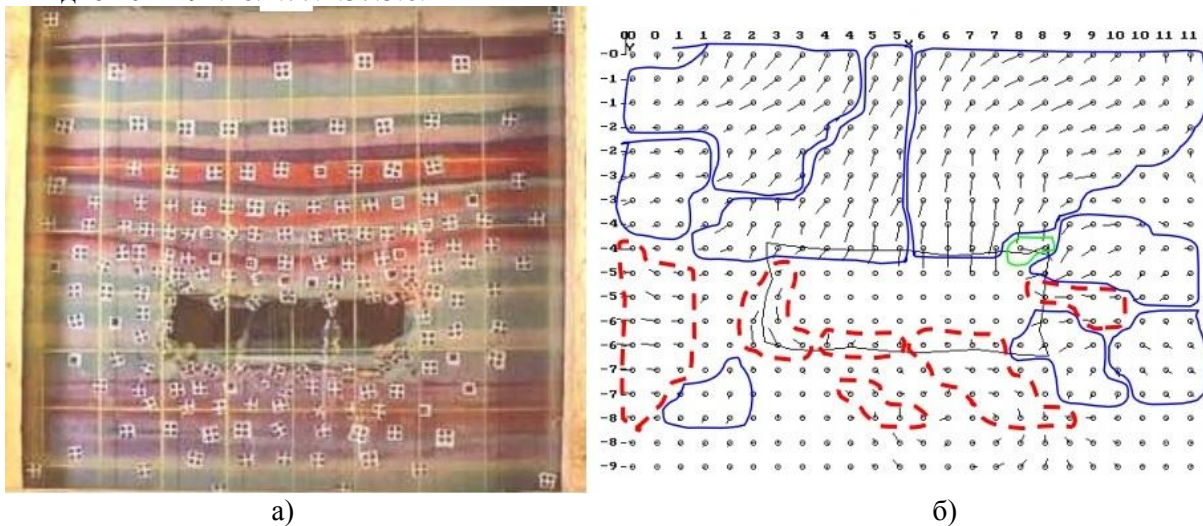


Рис. 1. - Зовнішній вигляд моделі (а) й розподіл кластерів на одному з етапів відпрацювання моделі (б)

Середня міцність уміщуючих порід становила у перерахунку на натурні умови 45 МПа, що відповідало граничному коефіцієнту стійкості виробки на глибині 600 м. У покрівлю виробки було встановлено п'ять сталеполімерних анкерів довжиною 1,8 м кожен. За таких умов навколо виробки розвивається зона зруйнованих порід, проте покрівля не обвалюється, що дозволяє здійснити детальний моніторинг необоротних зрушень і деформацій оточуючих порід з задовільною достовірністю (не менш ніж 0.95). Іншими словами такі умови дозволяють зафіксувати інкрементальні зрушення порід, амплітуда яких перевищує у 3-5 разів стандартну похибку вимірювання зрушень.



Інкрементальні зрушення фіксувались шляхом періодичної зйомки реперів (міток) на поверхні моделі нерухомою цифровою камерою. Протягом усього періоду випробування моделі було зроблено 15 знімків, за допомогою яких вдалось зафіксувати 7 дисипативних структур, які змінювали одна одну до моменту обвалення покрівлі виробки. На фрагменті (б) рис. 1 показано типову мозаїку кластерів інкрементальних зрушень, яка відображала дисипативну структуру, що виникла навколо виробки під час її випробування. Як видно, розподіл інкрементальних векторів необоротних зрушень не є симетричним. Про це свідчить як взаємне положення кластерів, так і напрямок та амплітуда векторів інкрементальних зрушень породних фрагментів. Для такого висновку достатньо простої кластеризації поля інкрементальних зрушень. У даному випадку відрізнялись чотири типи кластерів, у межах яких напрямок векторів змінювався по вертикалі (уверх – вниз) та горизонталі (вліво – вправо).

Проте для більш ґрунтовних висновків необхідна більш тонка методика розрізнення кластерів, яка б враховувала як напрямок, так і амплітуду векторів інкрементальних зрушень. Для більш детального розпізнавання самих кластерів і положення їх меж авторкою даної статті використовувалися сучасні методи кластеризації [9,10]. У даній роботі використаний один з найбільш популярних методів кластеризації К-середніх [9]. Ідея методу заснована на одночасній мінімізації варіації відстаней між векторами всередині кластерів і максимізації розкиду відстаней між центрами тяжіння кластерів. Кількість можливих кластерів змінювалася від двох і далі у бік збільшення. Перша оцінка числа кластерів виконувалася спрощеним візуальним методом, описаним вище. Далі процес класифікації контролювався динамікою дисперсій відхилень відстаней від центрів кластерів до спільного центру. Важливо підкреслити, що для візуалізації кластерної мозаїки використовувалося інтерпольоване поле зсувів гірських порід (рис. 1,б), тоді як у процесі кластерного аналізу використовувалися тільки фактичні зміни координат реперів (тобто інкрементальні зміщення), установлені на експериментальній ділянці.

Для досягнення достовірних результатів процесу кластеризації перебирались усі варіанти. У таблиці 1 показані результати обчислення відстаней між кластерами на етапі, коли їх було дев'ять штук.

Таблиця 1.

Номер кластеру	Значення Евклідових відстаней між кластерами								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00	0,87	0,69	18,75	1,05	2,70	1,63	4,38	4,17
2	0,93	0,00	1,04	12,67	1,54	0,96	3,77	3,81	8,82
3	0,83	1,02	0,00	13,96	3,20	3,96	1,01	1,60	5,69
4	4,33	3,56	3,74	0,00	22,68	14,72	20,76	8,85	37,31
5	1,03	1,24	1,79	4,76	0,00	1,46	5,14	9,03	6,41
6	1,64	0,98	1,99	3,84	1,21	0,00	8,10	8,25	12,88
7	1,28	1,94	1,00	4,56	2,27	2,85	0,00	2,86	2,63
8	2,09	1,95	1,26	2,98	3,00	2,87	1,69	0,00	10,97
9	2,04	2,97	2,38	6,11	2,53	3,59	1,62	3,31	0,00

Нижче діагоналі вказані відстані, вище – їх квадрати.

Зауважимо, що кластеризація здійснюється за величинами інкрементальних зрушень. Координати реперів, а також центрів кластерів до уваги поки не приймаються. У міру збільшення числа кластерів довжина і орієнтація векторів зсувів їх центрів змінювалася. Деякі вектори демонстрували відносну стабільність, тоді як ряд векторів розпадалися на складові, що свідчило про різноманіття кластерної мозаїки і необхідність подальшого ітераційного процесу вичленування кластерів.

Процес насичення дисперсій відстаней між кластерами векторів переміщень гірських порід і всередині кластерів наочно ілюструється графіками на рис. 2. На цьому рисунку показана динаміка дисперсії відстаней між векторами зрушень всередині кластерів і між центрами окремих кластерів. При цьому розкид відстаней вказано окремо за компонентами зрушень уздовж осей X і Y. Підкреслимо, що кластеризація векторів здійснювалася з врахуванням обох компонент інкрементальних зрушень, оскільки важлива не тільки довжина векторів, а й їх напрямок.

Як видно з рис. 2, розкид Евклідових відстаней між векторами інкрементальних зміщень у середині кластерів зменшився до мінімального рівня й стабілізувався. Аналогічне насичення настало відносно зростання варіації відстаней між парами кластерів, що свідчить про можливість завершення процесу кластеризації. У таблиці 2 наведено членство міток (реперів) у кожному кластері починаючи з дев'ятого і закінчуючи першим. На наступному етапі визначають середнє значення координат міток у кожному кластері  $X_{кл}, Y_{кл}$  (табл. 3).

Остання операція пов'язана з нанесенням меж кластерів. Ця задача не є тривіальною, оскільки мітки сусідніх кластерів достатньо перемішані у просторі, що обумовлює деяку невизначеність їх меж. Тому для побудови меж кластерів залучено діаграми Вороного, які мінімізують невизначеність результатів. Варто додати, що теорія діаграм Вороного узгоджується з мінімумом ентропії положення границь. Це додатково посилює обґрунтованість застосування діаграм Вороного для визначення положення меж кластерів.

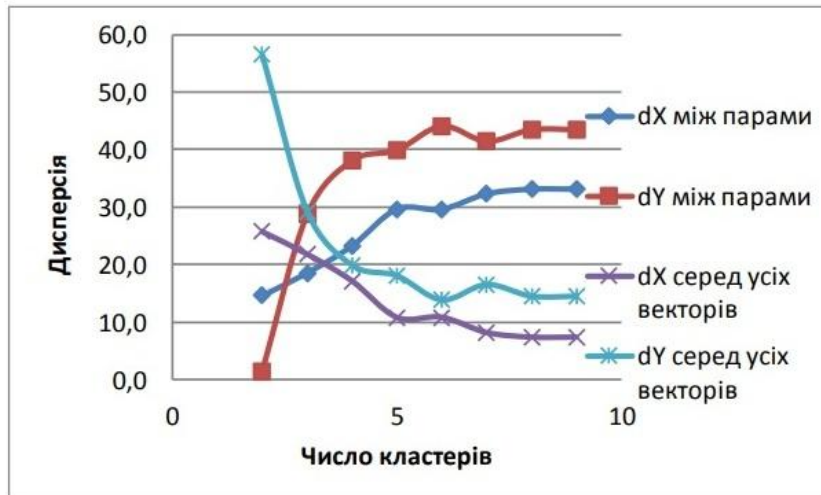


Рис. 2 – Характер стабілізації дисперсій зі зростанням числа кластерів

Таблиця 2.

**Приналежність міток (реперів) до відповідних кластерів**

9	8	7	6	5	4	3	2	1
C_16	C_14	C_3	C_1	C_17	C_83	C_2	C_20	C_5
C_65	C_32	C_4	C_8	C_22		C_31	C_21	C_7
C_85	C_39	C_6	C_9	C_33		C_35	C_30	C_25
	C_43	C_15	C_11	C_34		C_40	C_46	C_29
	C_59	C_23	C_13	C_37		C_44	C_47	C_36
	C_60	C_27	C_19	C_41		C_52	C_50	C_38
	C_82	C_28	C_24	C_45		C_64	C_51	C_42
	C_84	C_57	C_26	C_48		C_66	C_55	C_53
	C_86	C_61	C_67	C_49		C_88	C_56	C_54
	C_90	C_73	C_77	C_62			C_58	C_68
		C_74		C_71			C_63	C_70
		C_75		C_89			C_69	C_72
		C_93					C_76	C_80
							C_78	C_81
							C_79	C_91
							C_87	C_92

На рис. 3 показано накладення меж кластерів на розподіл інкрементальних векторів зрушень масиву гірських порід. Центри кластерів показані кружками. Незважаючи на те, що поле інкрементальних зрушень має досить складну структуру й інтенсивно насичене градієнтами векторів, розроблений метод кластеризації задовільно ідентифікував основні паттерни дисипативних структур.

Таблиця 3.  
Зважені параметри кластерів

$\Delta X_{кл}$	$\Delta Y_{кл}$	$X_{кл}$	$Y_{кл}$
0,26	0,025	315,1	293,6
1,27	0,87	69,3	311
-0,16	1,12	179,4	351,3
2,3	5,8	381,6	263,9
1,4	-0,87	210	301,6
2,56	0,38	105,2	353,7
-1,46	0,57	250,8	280,1
-0,68	2,83	92,4	247,9
-2,1	-2,83	141,3	361,3

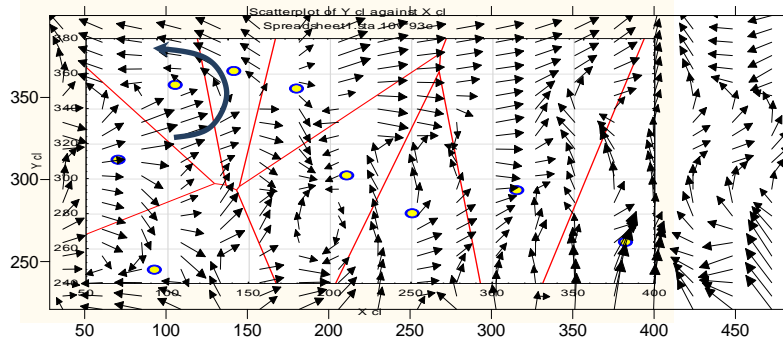


Рис. 3. - Накладення меж кластерів на поле інкрементальних зрушень

Так кластер, що має координати (69,3; 311) відображає структуру віяла, в якому потоки векторів розходяться зліва направо. Кластери (105,2; 353,7) і (141,3; 361,3) формують ротор, що закручує потік інкрементальних зрушень проти часової стрілки. Аналіз накладення показує, що деякі кластери доцільно додатково розділити. Наприклад це стосується кластеру з координатами (210; 301,6).

### Висновки

Дисипативні структури у масиві гірських порід після його переходу у позамежний стан виникають у результаті взаємодії породних фрагментів й їх кластерів, що сприяє ефективному розсіяню енергії гірського тиску. Вказані структури виявляються моніторингом елементарних або інкрементальних зрушень ґрунту та масиву гірських порід, величина яких знаходиться у межах 2-10 середньо-квадратичних похибок вимірювання зрушень, причому центри кластерів визначаються методом К-середніх, а їх межі полігонами Вороного у Евклідовому просторі.

Подальшими дослідженнями планується вдосконалення методики кластеризації дисипативних структур у частині обґрунтування і розробки додаткового критерію зупинки процесу кластеризації, який забезпечив би необхідну і достатню деталізацію паттернів дисипативних структур.

Робота виконана згідно тематики досліджень НАН України, номер держреєстрації теми 0117U00219.

### Література.

1. Гануліч Б. К., Матвійв Ю.Я. Про розвиток смуг плинності біля еліптичних вирізів та тріщин в умовах плоскої деформації. Наукові нотатки, 2017, Вип. 57. - С. 52-56.
2. Zhang J.C., Xu W.Y., Wang H.L., Wang R.B., Meng Q.X., Du S.W. (2016) A coupled elastoplastic damage model for brittle rocks and its application in modelling underground excavation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; 84:130-141.
3. Khomenko O., Kononenko M., Netecha M. (2016) Industrial research into massif zonal fragmentation around mineworkings. Mining of Mineral Deposits. 12(2)50 - 56.
4. Zacharov V.S., Hohotva A.I., Nazimko V. V., Alexandrov S.N., Sazhnev V. P., Zakharova L.N. (2003) Ground behavior investigation during roof fall in a roadway // 30 th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. - Johannesburg. 2003.
5. Захарова Л.М. Дисипативні структури, що супроводжують руйнування й не-оборотне деформування ґрунту і масиву гірських порід. Фізика і хімія твердого тіла. Т. 18, №2 (2017) С. 252-258. DOI: 10.15330/pcss.18.2.252-258
6. Kondepudi D. Prigogin I. (2015) Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. Second edition. John Wiley & Sons; XXVI. 524.
7. Хохотва А.И., Захарова Л.Н. Механизм обрушения кровли в выработке, закрепленной породными болтами. Труды 1-й международной научно-практической конференции «Технологические проблемы разработки месторождений минерального сырья в сложных геотехнологических условиях». - Тула, ТулГУ, 2000. - С.53-54.
8. Zakharova L. (2017) Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. Metallurgical and mining industry. 6:39-42.
9. Berikov V., Pestunov I. (2016) Ensemble clustering based on weighted co-association matrices: Error bound and convergence properties. Pattern Recognition, 63(3): 427-436.
10. González S., García S., Lázaro M., Figueiras-Vidal A.R., Herrera F. (2017) Class Switching according to Nearest Enemy Distance for learning from highly imbalance data-sets. Pattern Recognition, 70(10): 12-24.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2017

УДК 621.7

**В.Л. Калюжний, В.М. Горностай, А.М. Потятиник***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДНОГО ПРЯМОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПО СХЕМІ «ЗАГОТОВКА ЗА ЗАГОТОВКОЮ» КРУГЛИХ СТЕРЖНІВ ІЗ СТАЛІ**

*Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз холодного прямого видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою» круглих стержнів із сталі. Встановлені ступінь деформації і кут конусу матриці, які забезпечують необхідне пропрацювання структури металу пластичною деформацією для отримання заданої по кресленню деталі величини межі текучості zdeформованого металу по перерізу стержнів. Пропрацювання структури металу оцінювалося по розподілу інтенсивності деформацій. Також визначені залежність зусилля видавлювання від переміщення деформуючого інструмента, розподіли питомих зусиль на інструменті, кінцеві форми та розміри стержнів. По розрахункових даних розроблена та виготовлена конструкція штампів для виконання прямого видавлювання на гідравлічному пресі. Проведені експериментальні дослідження прямого видавлювання відпалених циліндричних заготовок для отримання круглих стержнів. Виконане порівняння даних розрахунків і експериментальних результатів по зусиллях видавлювання, формі стержнів та по величині межі текучості zdeформованого металу по перерізу стержнів. Моделювання методом скінченних елементів дозволяє прогнозувати механічні властивості zdeформованого металу при холодному формоутворенні виробів.*

*Ключові слова:* круглий стержень, холодне пряме видавлювання, метод скінченних елементів, зусилля видавлювання, питоми зусилля, форма і розміри стержнів, інтенсивність деформацій, межа текучості zdeформованого металу.

**В.Л. Калюжний, В.Н. Горностай, А.Н. Потятиник****РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПО СХЕМЕ "ЗАГОТОВКА ЗА ЗАГОТОВКОЙ" КРУГЛЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ СТАЛИ**

*Методом конечных элементов проведен расчетный анализ холодного прямого выдавливания по схеме «заготовка за заготовкой» круглых стержней из стали. Установлены степень деформации и угол конуса матрицы, которые обеспечивают необходимую проработку структуры металла пластической деформацией для получения заданной по чертежу детали величины предела текучести sдеформованного металла по сечению стержней. Проработка структуры металла оценивалась по распределению интенсивности деформаций. Также определены зависимость усилия выдавливания от перемещения деформирующего инструмента, распределения удельных усилий на инструменте, конечные формы и размеры стержней. По расчетным данным разработана и изготовлена конструкция штампа для выполнения прямого выдавливания на гидравлическом прессе. Проведены экспериментальные исследования прямого выдавливания отожженных цилиндрических заготовок для получения круглых стержней. Выполнено сравнение данных расчетов и экспериментальных результатов по усилиям выдавливания, форме стержней и по величине предела текучести sдеформованного металла по сечению стержней. Моделирование методом конечных элементов позволяет прогнозировать механические свойства sдеформованного металла при холодном формообразовании изделий.*

*Ключевые слова:* круглый стержень, холодное прямое выдавливание, метод конечных элементов, усилия выдавливания, удельные усилия, форма и размеры стержней, интенсивность деформаций, предел текучести sдеформованного металла.

**V. Kaljuzhny, V. Gornostay, A. Potjatynik****COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF COLD FORWARD EXTRUSION ACCORDING TO THE SCHEME "WORKPIECE BEHIND THE WORKPIECE" OF THE ROUND STEEL RODS**

*Using the finite element method conducted research of cold forward extrusion according to the scheme "workpiece behind the workpiece" of round steel rods. There are determined the degree of deformation and the matrix's angle of the cone, which provide the necessary deformation of the metal structure by plastic deformation to obtain the value of yield stress detail given in the drawing of deformed metal by cross-section of rods. The deformation of the metal structure was evaluated along the distribution of the strain intensity. Also identified the dependence of the extrusion force on the displacement of the deforming tool, distribution of specific forces on the tool, the final shape and sizes of the rods. According to calculated data developed the design of the stamp for forward extrusion on a hydraulic press. There are conducted experimental research of the forward extrusion of annealed cylindrical workpieces for getting round rods. There're performed comparison of calculation data and experimental results on extrusion forces, form of the rods and value of the yield stress of the deformed metal along the cross-section of the rods. Modeling by the finite element method allows to predict the mechanical properties of the deformed metal by the cold forming of products.*

*Keywords:* round rod, cold forward extrusion, finite element method, extrusion force, specific force, shape and sizes of the rods, intensity of deformation, yield strength of the deformed metal.

Существенным преимуществом процессов холодной объемной штамповки (ХОШ) является возможность изготовления высокоточных изделий с необходимой проработкой структуры металла пластической деформацией для обеспечения заданных механических свойств в сформированном металле. Это приводит к повышению надежности и долговечности таких изделий. В работе [1] приведены рекомендации по проектированию технологии холодного прямого выдавливания стержней и штамповой оснастки, которые базируются на производственном опыте и экспериментальных данных. При этом приводится мало сведений по влиянию конструктивных, технологических и физико-механических параметров на механические свойства сформированного металла. В источниках [2-4] приведены экспериментальные данные по упрочнению металла при формообразовании изделий методами гидроэкструзии заготовок из инструментальных сталей, различных сплавов и порошковых заготовок. Однако в настоящее время проведение экспериментальных работ связано со значительными материальными и временными затратами. В работах [5-8] показана возможность прогнозирования механических свойств сформированного металла при холодном прямом выдавливании фасонных стержней на основании данных, которые получены моделированием методом конечных элементов (МКЭ). Расчетный анализ с использованием МКЭ существенно сокращает время на подготовку производства изделий с заданными механическими свойствами методом холодного прямого выдавливания. Актуальной задачей является применения МКЭ для определения параметров холодного прямого выдавливания по схеме «заготовка за заготовкой» круглых стержней конкретных размеров с одновременным обеспечением заданных механических свойств по сечению.

Целью работы является проведение расчетно-экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных и технологических параметров при холодном прямом

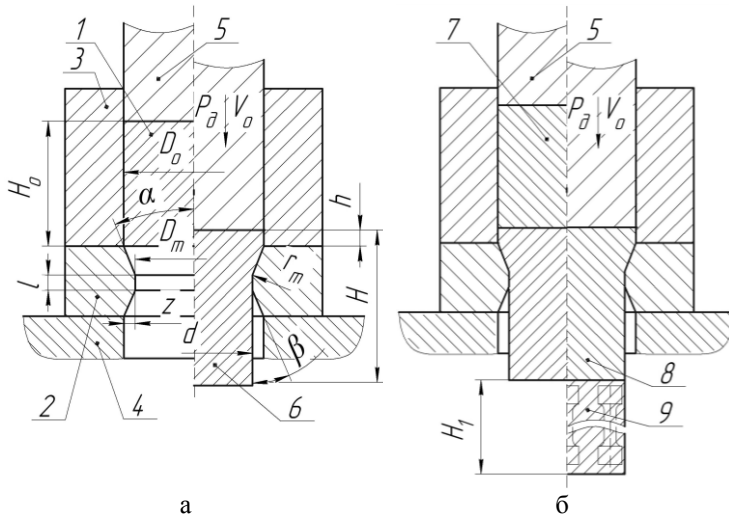


Рис. 1. Прямое выдавливание стержней по схеме «заготовка за заготовкой»

выдавливании круглых стержней по схеме «заготовка за заготовкой» для обеспечения необходимой проработки металла пластической деформацией и установлению параметров для разработки технологии выдавливания стержней конкретных размеров с заданными механическими свойствами сформированного металла по сечению.

Прямое выдавливание стержней по схеме «заготовка за заготовкой» с обозначениями приведена на рис. 1. На рис. 1а приведена схема выдавливания первой заготовки. Слева от оси симметрии показано положение в начале выдавливания,

справа – в конце выдавливания. Исходную заготовку 1 устанавливают на конической матрице 2, на которой размещен контейнер 3. Матрицу 2 и контейнер 3 фиксируют на плите 4. Усилия деформирования  $P_0$  прикладывают пуансоном 5, который смещается со скоростью  $V_0$ . За первый ход ползуна пресса получают полуфабрикат 6. Выдавливание второй заготовки приведено на рис. 1б. После подъема пуансона на выдавленный полуфабрикат 6 устанавливают следующую заготовку 7. За второй ход ползуна пресса из этой заготовки получают полуфабрикат 8. При этом из первой заготовки происходит формообразование стержня 9, который выпадает через отверстия в плите 4 и в столе пресса. По такой схеме необходимо получить стержень из стали 45ХНМФА с диаметром  $d = 32$  мм, высотой  $H_1 = 332$  мм и пределом текучести сформированного металла по сечению стержня не менее  $\sigma_s = 700$  МПа. Величину напряжения  $\sigma_s$  определяли путем испытания на растяжение стандартных образцов, которые были вырезаны на оси стержня и около внешней поверхности.

Для проведения расчетных исследований использовали конечно-элементную программу DEFORM. Металл исходных отожженных цилиндрических заготовок считался упругопластическим, а деформирующий инструмент абсолютно жестким. Влияние трения на контактных поверхностях учитывали по Кулону с коэффициентом трения  $\mu = 0,08$ , что

соответствует смазке фосфатирование с омыливанием. Скорость деформирования составляла  $V_o = 2$  мм/сек с учетом проведения экспериментальных работ по выдавливанию на гидравлическом прессе ДБ 2432. Постоянными размерами матрицы были (см. рис. 1а): высота калибрующего пояса  $l = 3$  мм,  $r_m = 5$  мм,  $D_m = 32$  мм,  $\beta = 30^\circ$ ,  $z = 0,2$  мм. Размеры исходной заготовки  $D_o$  и  $H_o$ , угол матрицы  $\alpha$  устанавливали моделированием для обеспечения необходимой проработки структуры металла пластической деформацией, которую оценивали по распределению интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  в стержне после выдавливания. По экспериментальной диаграмме истинных напряжений и расчетным значениям  $\varepsilon_i$  можно установить величину напряжения текучести сформированного металла  $\sigma_s$  по сечению стержня после выдавливания.

Результаты расчетных исследований приведены для установленных размеров исходной заготовки  $D_o = 38$  мм и  $H_o = 250$  мм и угла матрицы  $\alpha = 16^\circ$ , которые обеспечили необходимую проработку структуры металла пластической деформации по сечению стержня и заданную величину предела текучести сформированного металла по сечению стержня. Расчетные схемы в разрезе в начале и в конце выдавливания первой и второй заготовок приведены на рис. 2. На рис. 2а показана схема в начале выдавливания первой заготовки. Исходная заготовка 1 размещена в контейнере 2 на матрице 3. Усилие деформирования прикладывают с помощью пуансона 4. В результате выдавливания первой заготовки получают полуфабрикат 5 (рис. 2б). Вторую заготовку 6 устанавливают на полуфабрикат 5 (рис. 2в). После выдавливания второй заготовки получают стержень 7 и полуфабрикат 8 (рис. 2г).

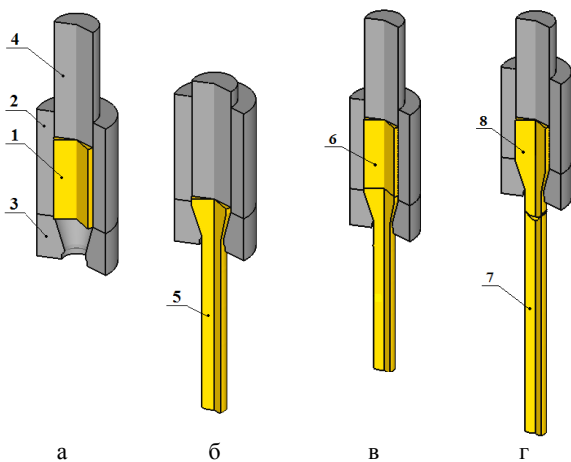


Рис. 2. Расчетные схемы в разрезе в начале и в конце выдавливания первой и второй заготовок

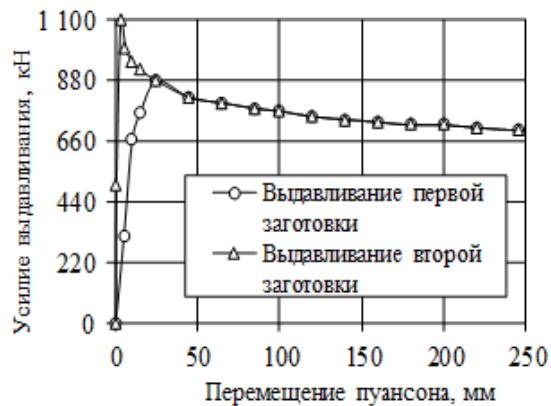


Рис. 3. Зависимости усилия выдавливания первой и второй заготовок от перемещения пуансона

На рис. 3 показаны зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона при выдавливании первой и второй заготовок. Максимальное усилие выдавливания первой заготовки получено при перемещении пуансона на 22 мм и составляет 900 кН, после чего усилие снижается и в конце выдавливания составляет 720 кН. При выдавливании второй заготовки усилие достигает 1100 кН, что связано с воздействием в конусе матрицы оставшейся части первой заготовки. Для проектирования штамповой оснастки необходимо иметь величины удельных усилий на деформирующем инструменте. Величины удельных усилий определяли по распределению нормальных напряжений на поверхностях заготовки, которые контактируют с инструментом. На рис. 4 наведены распределения нормальных напряжений на деформирующем инструменте при максимальном значении усилия выдавливания второй заготовки. На рис. 4а показано распределение таких напряжений по радиусу пуансона. С увеличением радиуса возрастают нормальные напряжения. Распределение нормальных напряжений по высоте контейнера приведены на рис. 4б. На контейнере наибольшее значение напряжений 612 МПа получено в месте контакта контейнера с верхним торцом заготовки, а значение 578 МПа имеет место в нижней части контейнера. При таких удельных усилиях контейнер необходимо выполнять однобандажированным. На матрице максимальное нормальное напряжение 2100 МПа возникает в



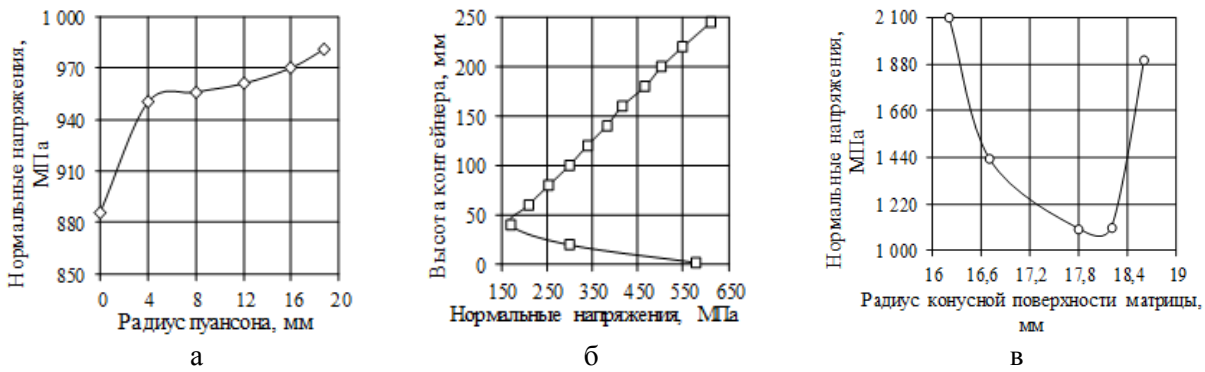


Рис. 4. Распределения нормальных напряжений на деформирующем инструменте

месте перехода конусной части в калибрующий пояс с дальнейшим уменьшением до 1100 МПа на радиусе конусной поверхности 18 мм, а потом идет увеличение до 1900 МПа на радиусе 18,7 мм (рис. 4в). При таких значениях удельных усилий необходимо применение двухбандажированной матрицы.

Моделированием установлено, что разъединение заготовок при выдавливании происходит во время формообразования второй заготовки в конусе матрицы. Начало разъединения между заготовками и распределение интенсивности деформаций  $\epsilon_i$  в продольном сечении стержня приведены на рис. 5. Начало разъединения и образование утяжины на верхнем торце первой заготовки изображено на рис. 5а. На рис. 5б приведено распределение интенсивности деформаций  $\epsilon_i$ . Проработка металла пластической деформацией происходит неравномерно по поперечному сечению стержня. В слоях металла на оси симметрии получена величина  $\epsilon_i=0,38$ . Слои металла на наружной поверхности стержня деформируются интенсивнее, что приводит к достижению величины интенсивности деформаций  $\epsilon_i=0,63$ . По экспериментальной диаграмме истинных напряжений для рассматриваемой стали при величине интенсивности деформаций больше 0,25 предел текучести имеет величину не менее 700 МПа, что соответствует требованиям по чертежу детали.

Для проведения экспериментальных работ по расчетным данным была спроектирована и изготовлена конструкция штампа для прямого выдавливания по схеме "заготовка за заготовкой". Конструкция штампа изображена на рис. 6. Двухбандажированная матрица 1 и

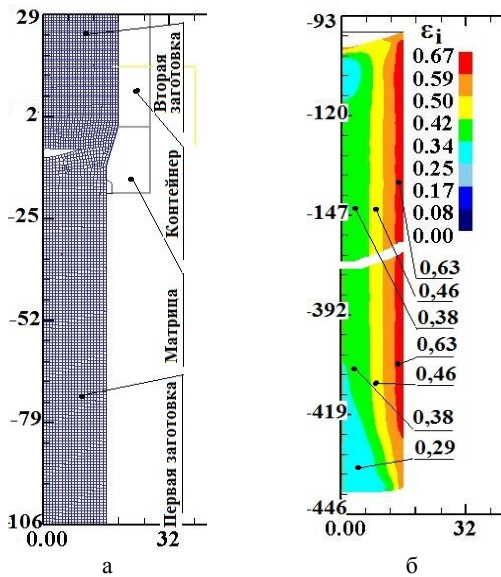


Рис. 5. Начало разъединения заготовок и распределение интенсивности деформаций  $\epsilon_i$  в продольном сечении стержня. Размеры по осям в миллиметрах

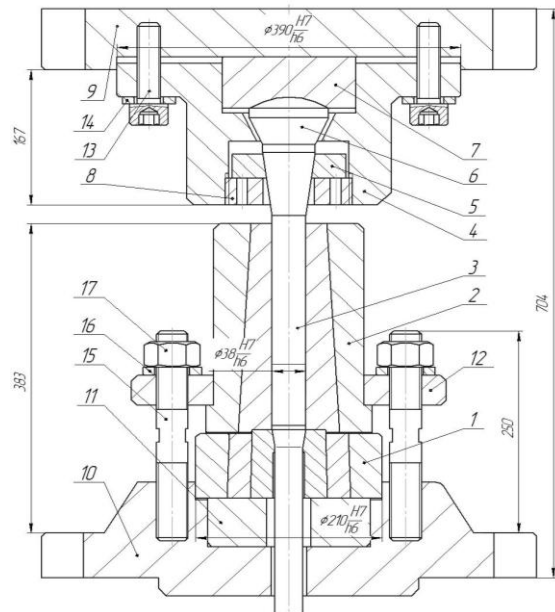


Рис. 6. Конструкция штампа для прямого выдавливания по схеме «заготовка за заготовкой»

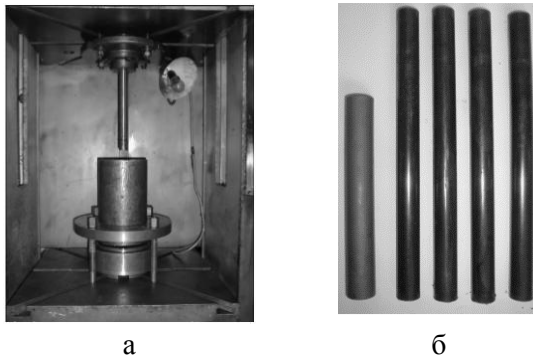


Рис. 7. Фотографії штампа на пресі, вихідна заготовка і отримані стержні

однобандажированный контейнер 2 установленны на опоре 11 и закреплены к нижней плите 10 с помощью кольца 12, шпилек 15, шайб 16 и гаек 17. К верхней плите 9 винтами 13 с шайбами 14 закреплен пуансонодержатель 4 с пятой 6 и подпятником 7. В пуансонодержателе 4 также размещены конусное кольцо 5 с пуансоном 3 и зафиксированы гайкой 8. В контейнер 2 устанавливают первую исходную заготовку. При ходе ползуна вниз деформируют первую заготовку с прессостатком высотой 5 мм. После этого в контейнер 2 размещают вторую заготовку, которая после выдавливания выжимает первую заготовку из матрицы. Штамп

устанавливали на гидравлическом пресе ДБ 2432 усилием 1,6 МН. На отожжённые заготовки из стали 45ХНМФА наносили смазку фосфатирование с омыливанием. Фотографии штампа на пресе, исходной заготовки и полученных стержней показаны на рис. 7. На рис. 7а приведена фотография штампа на пресе. Исходная заготовка с нанесенной смазкой и полученные стержни наведены на рис. 7б. Экспериментальные величины максимальных усилий выдавливания первой и второй заготовок определяли по показаниям манометра преса, которые соответственно составили 930 и 1120 кН. Максимальное значение расхождения с расчетными данными (см. рис. 3) получено 4%.

У первой и второй сформированных заготовках проведены замеры в сечении размеров торцов. На рис. 8 показаны расчетные формы и размеры первой и второй сформированных заготовок, а также точками отмечены результаты измерений. Экспериментальные результаты практически совпали с данными моделирования. На верхнем торце первой заготовки образуется утяжина глубиной 4 мм, на нижнем торце получен выступ высотой 1,2 мм. На нижнем торце второй заготовки имеет место выступ высотой 3 мм.

При холодном выдавливании повышается температура сформированного металла. На рис. 9 приведено распределение температуры в сформированного металла в первой и второй заготовках. В стержне первой заготовки температура достигает 85°C (рис. 9а). Экспериментальное значение температуры по пирометру составило 82°C. У второй заготовки максимальная температура сформированного металла по результатам моделирования достигает 91°C (рис. 9б). Величина по показаниям пирометра составила 89°C. Установленные значения температуры позволяют уточнить требования к смазкам для холодного выдавливания.

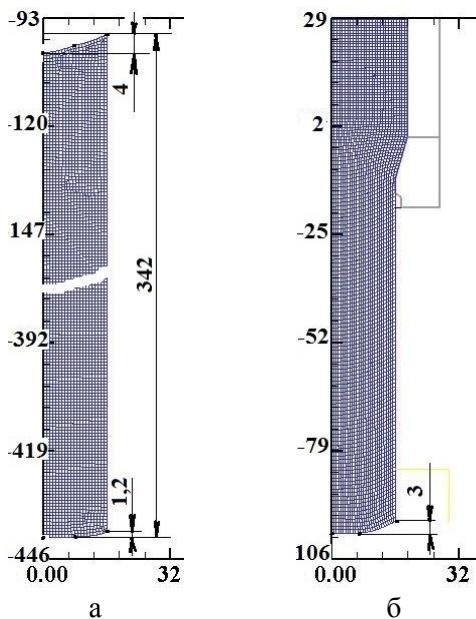


Рис. 8. Форма и размеры первой и второй сформированных заготовок

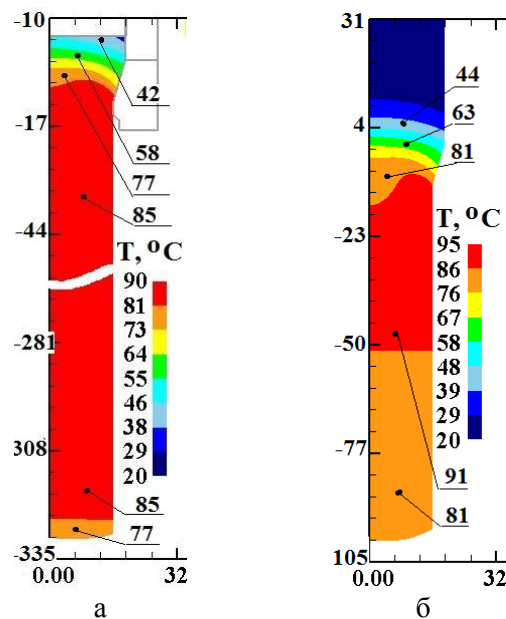


Рис. 9. Температура сформированного металла первой и второй заготовок



Для определения предела текучести  $\sigma_s$  сформированного металла в продольном сечении полученных стержней были вырезаны для испытания на растяжение стандартные образцы на оси стержня и вблизи внешней поверхности. На оси стержня получена величина  $\sigma_s = 720$  МПа, вблизи внешней поверхности -  $\sigma_s = 950$  МПа.

**Выводы.** Методом конечных элементов проведен анализ холодного выдавливания круглых стержней по схеме «заготовка за заготовкой». Установлены степень деформации и угол конуса матрицы, которые обеспечили необходимую проработку структуры металла пластической деформацией и достижение заданного по чертежу детали предела текучести сформированного металла по сечению стержня. Моделированием выявлены зависимости усилия выдавливания от перемещения деформирующего инструмента, распределение удельных усилий на контактирующих поверхностях, температура сформированного металла, конечные формы и размеры стержней после выдавливания. По расчетным данным спроектирована и изготовлена штамповая оснастка для проведения экспериментальных исследований холодного прямого выдавливания. Проведены экспериментальные работы по холодному выдавливанию стержней по схеме «заготовка за заготовкой». Результаты экспериментов подтвердили расчетные данные по усилию выдавливания, форме и размерам полученных стержней, а также по пределу текучести сформированного металла по сечению стержней.

#### Список использованных источников:

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. - 384 с.
2. Черный Ю.Ф. Гидропрессование инструментальных сталей / Ю.Ф. Черный, В.З. Спусканюк, А.А. Лядская и др. – К: Техника, 1987. – 216 с.
3. Волков К.В. Упрочнение материалов методами гидропрессования / К.В. Волков, А.И. Капустин, В.З. Спусканюк и др. – К.: Наукова думка, 1991. – 200 с.
4. Белошенко В.А. Теория и практика гидроэкструзии / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк. – К: Наукова думка, 2007, - 246 с.
5. Калюжный В.Л. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів / В.Л. Калюжный, О.В. Калюжный В.М. Горностай // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2009. - №1 (20). - С. 23-27.
6. Калюжный В.Л. Створення високопродуктивних, ресурсозберігаючих технологій виготовлення холодним об'ємним штампуванням високоточних виробів з пластичних і малопластичних металів / В. Л. Калюжный // Вестник Машиностроение. - К: НТУУ «КПИ», 2010. - №60. – С. 19-25.
7. Калюжный В.Л. Прямое холодное выдавливание с раздачей профилей из сталей / В.Л. Калюжный, В.Н. Горностай, А.С. Запороженко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Х: НТУ «ХПИ», 2012. – № 47 (953). – С. 110–115.
8. Кузьменко В.И. Влияние контактного трения на характер течения и силовой режим процесса прямого выдавливания с уширением / В.И. Кузьменко, В.Н. Горностай, В.О. Василенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Х: НТУ «ХПИ», 2013. – № 42 (1015). – С. 110–114.

#### Рецензенты:

**Гожий Сергей Петрович**, д.т.н., профессор кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов, КПИ им. Игоря Сикорского.

**Баглюк Геннадий Анатолиевич**, д.т.н., с.н.с., заместитель директора по научной работе ИПМ НАН Украины.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2017

УДК 624.012.45

**І.Б. Корнесва***Одеська державна академія будівництва та архітектури***ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК СТАЛЕФІБРОБЕТОННОЇ БАГАТОПУСТОТНОЇ ПЛИТИ ПЕРЕКРИТТЯ**

*Запропоновано конструкцію багатопустотної плити перекриття із застосуванням сталевібробетона. Плита має такі самі характеристики міцності, що і аналогічна серійна, але при цьому підвищена тріщиностійкість за рахунок введення в бетон сталевібробетону. Також це дозволяє зменшити витрати на виготовлення конструкції, ремонт і збільшити терміни експлуатації. З метою досягнення рівномірного розподілу фібри між порожнечами проектованої плити та покращення якості ущільнення бетонної суміші прийнята модель із п'ятьма порожнечами.*

*При розрахунку сталевібробетонних конструкцій, що згинаються, доцільно враховувати роботу розтягнутої зони сталевібробетона, що дозволить зменшити площу перерізу робочої арматури без шкоди для несучої здатності конструкції.*

**Ключові слова:** *фібробетон, бетон, сталевібробетон, панель перекриття, багатопустотна плита, армування.*

**И.Б. Корнеева****ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ МНОГОПУСТОТНОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ**

*Предложена конструкция многопустотной плиты перекрытия с применением сталевібробетона. Плита обладает теми же прочностными характеристиками, что и аналогичная серийная, но при этом повышена тріщиностійкість за счет введения в бетон стальной фибры. Также это позволяет уменьшить затраты на изготовление конструкции, ремонт и увеличить сроки эксплуатации. С целью достижения равномерного распределения фибры в межпустотных пространствах проектируемой плиты и повышения качества уплотнения бетонной смеси принята модель с пятью пустотами.*

*При расчете изгибаемых сталевібробетонных конструкций целесообразно учитывать работу растянутой зоны сталевібробетона, что позволит уменьшить площадь сечения рабочей арматуры без ущерба для несущей способности конструкции.*

**Ключевые слова:** *фібробетон, бетон, стальной фибра, панель перекриття, многопустотная плита, армирование.*

**I.B. Korneieva****DESIGN AND CALCULATION MULTIHOLLOW SLAB OF OVERLAP STEEL FIBER CONCRETE**

*The construction of a hollow-core slab with the use of steel-fiber-reinforced concrete is proposed. The plate has the same strength characteristics as the same serial, but the crack resistance is increased due to the introduction of steel fiber into the concrete. Also it allows to reduce expenses for manufacturing of a design, repair and to increase terms of operation. In order to achieve an even distribution of fiber in the interstice spaces of the designed plate and to improve the quality of compaction of the concrete mix, a model with five voids is adopted.*

*When calculating bent steel-fiber-concrete structures it is advisable to take into account the work of the stretched zone of steel-fiber-concrete, which will allow reducing the cross-sectional area of the working reinforcement without damaging the bearing capacity of the structure.*

**Keywords:** *fiber-reinforced concrete, concrete, steel fiber, overlap panel, hollow core, reinforcement.*

**Постановка проблеми.** Результати досліджень фахівців в області залізобетону у нас та за кордоном показали, що додавання в бетон сталевих фібрових волокон дозволяє створити новий матеріал, який має властивості композиту [1, 2]. Таким чином, сталевібробетон — матеріал, що складається з бетонної матриці, армованої хаотично розташованими сталевими волокнами. Бетонна матриця зазвичай — це дрібнозернистий бетон (при необхідності та обґрунтуванні з додаванням крупного заповнювача), в якому довільно або із заданою орієнтацією розміщена сталевібробетонна фібра. Даний композит складається як мінімум з двох різнорідних матеріалів з чіткою межею поділу бетону і сталі, на межі поділу формується міжфазовий шар, що володіє властивостями, притаманними тільки йому, утворюється об'ємним поєднанням матеріалів і його властивості істотно відрізняються від властивостей компонентів.

Область застосування сталевібробетону досить широка. Це будівництво монолітних і збірних покриттів доріг, злітно-посадочних смуг аеродромів, виготовлення постійного і тимчасового оброблення склепін тунелів, елементів мостових конструкцій, фундаментів під обладнання ударної та динамічної дії, конструкцій збірного залізобетону.

Ефективність застосування сталевібробетону в будівельних конструкціях може досягатися за рахунок зниження трудовитрат на арматурні роботи, суміщення технологічних операцій при приготуванні, армування, укладання та ущільнення суміші, а також за рахунок продовження терміну експлуатації конструкцій та зниження витрат на різні види поточного ремонту. Виходячи з цих міркувань, представляється необхідним запропонувати конструкцію плити з сталевібробетону, аналогічну до багатопустотної плити ПК 30.12-8 серії 1.141-1, але з поліпшеними характеристиками.

**Результати досліджень.** Для порівняльного аналізу було взято багатопустотну плиту ПК 30.12-8 (рис. 1) серії 1.141-1, яка досить часто застосовується в будівництві, навантаження прийняті відповідно до ДБН В.1.2-2: 2006 [3]. Виконано розрахунки за першим та другим граничними станами відповідно до ДБН В.2.6-98: 2009 [4], які підтверджують вибір площі перерізу робочої арматури при заданих умовах експлуатації. Серійна плита виконана з бетону марки С16/20, тому для коректності порівняння конструкцій пропонується плита буде виконана з бетону тієї ж марки. Плита армується зварними каркасами з робочою арматурою в розтягнутій зоні, загальна витрата сталі на виріб становить 0,1274 кН. Дана плита досить часто застосовується при влаштуванні перекриттів і якщо зменшити витрати на її виробництво, то це спричинить за собою значну економію коштів.

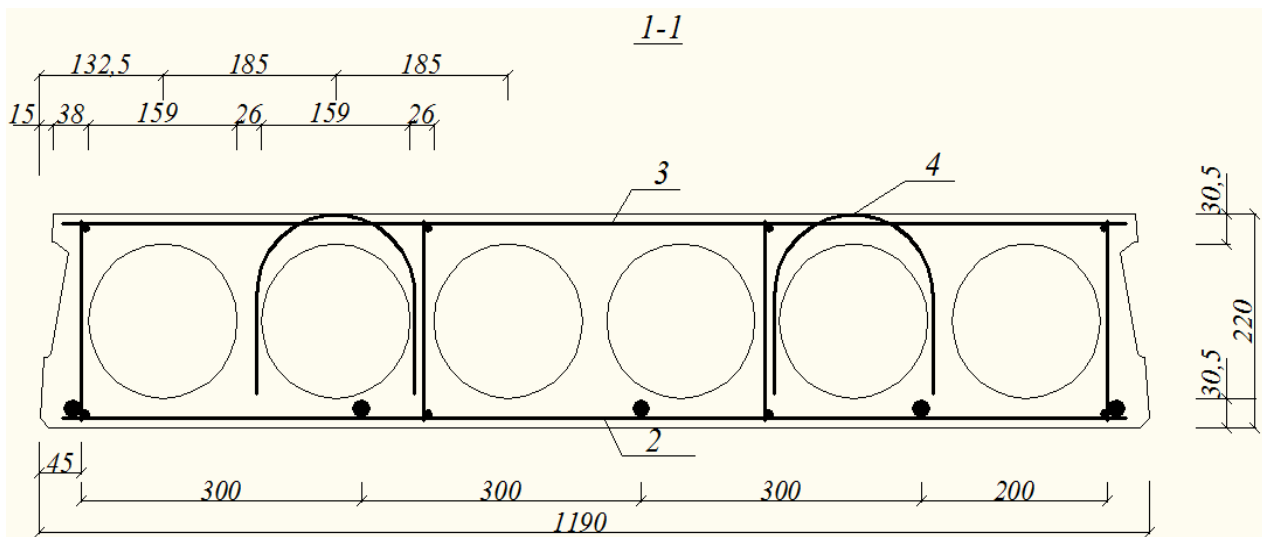


Рис. 1. Поперечний переріз багатопустотної плити ПК 30.12-8

Армування залізобетонних конструкцій сталеву фібру на доповнення до стержневої арматури покращує механічні характеристики бетону: підвищується міцність, збільшується модуль пружності, знижуються деформації усадки та повзучості, підвищується тріщиностійкість, ударна міцність, зносостійкість, морозостійкість та ін. [1, 2]. З цієї причини запропонована аналогічна плита з сталевібробетону (рис. 2) з тією різницею, що якщо в залізобетонній плиті 6 пустот, то в сталевібробетонній тільки 5, для коректного розташування фібри згідно ДСТУ-Н Б В.2.6-78: 2009 [5] і ДСТУ Б В.2.6-2: 2009 [6].

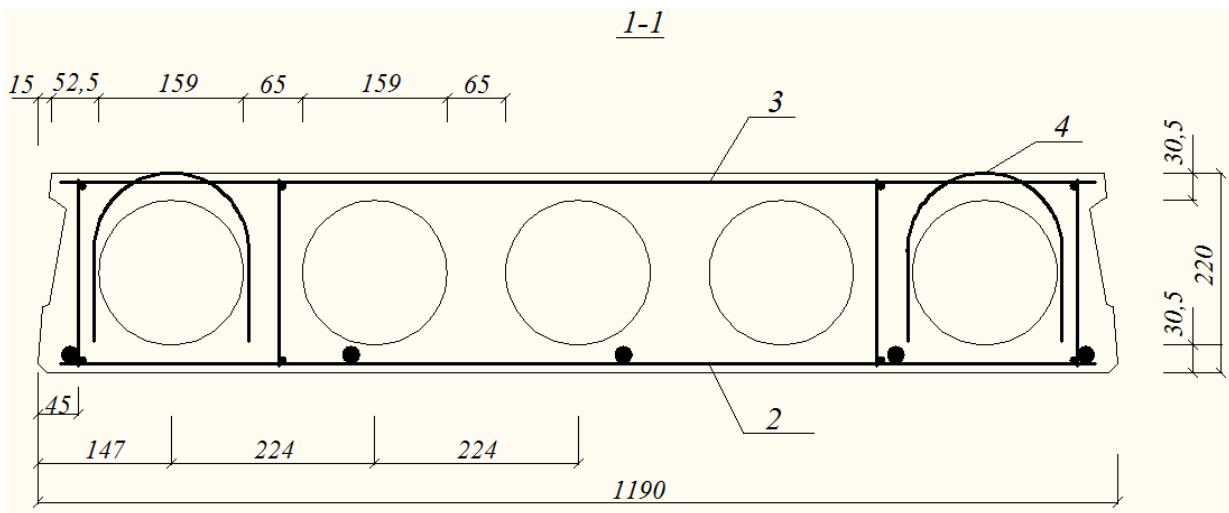


Рис. 2. Поперечний переріз багатопустотної плити з сталевібробетону

Передбачається використання сталевібробетону з загнутими кінцями (її довжина 50 мм, діаметр 1 мм), що випускається ПАТ ВО «Стальканат-Силур» відповідно до європейського стандарту EN 14 889 - 1: 2006. Така фібра другого класу виготовляється з дроту з тимчасовим опором 1335 МПа. Фібра з загнутими кінцями практично не утворює «їжаків» і це дозволяє домогтися її рівномірного розподілу за обсягом, що важливо для коректної роботи конструкції в цілому.

Для запропонованої плити з сталевібробетону також виконані розрахунки за першим та другим граничними станами [5].

Порівняльні характеристики наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняльні характеристики плит залізобетонної та сталевібробетонної**

Характеристика	Залізобетонна конструкція	Сталевібробетонна конструкція
Повне розрахункове навантаження, кПа	11,3	11,8
Розрахункове навантаження без урахування власної ваги, кПа	8	8
Об'єм плити, м <sup>3</sup>	0,78	0,78
Об'єм бетону, м <sup>3</sup>	0,43	0,49
маса, кН	10,8	11,5
$f_{cd}$ , МПа	11,5	13,2
Прогин, см	0,64	0,59
Ширина розкриття тріщин, мм	0,25	0
Витрата сталі на виріб, кН	0,1274	0,2424
Робоча арматура	5 Ø 8 A III	5 Ø 8 A III

Як видно з таблиці, плита вийшла трохи важче серійної, що не вплинуло на площу перерізу робочої арматури навіть при розрахунку в першому наближенні без урахування роботи розтягнутої зони сталевібробетону. Розрахункове навантаження (без урахування власної ваги) на плити прийняте однакове.

З введенням в дію ДБН В.2.6-98: 2009 [4] в Україні для розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій прийнята деформаційна модель з використанням діаграми деформування бетону і арматури, включаючи непружну роботу.

За новими діючими нормами можна простежити процес зміни напружень в бетоні і арматурі в міру зміни деформацій, тобто є можливість враховувати пружно-пластичні властивості бетону та арматури замість пружної постановки завдання в межах дії закону Гука. Однак цей метод є досить трудомістким і розрахунок нормальних перерізів простих залізобетонних конструкцій в деяких країнах СНД дозволений за старими союзними нормами, що враховують умовно пластичну роботу бетону і арматури.

При розрахунку нормальних перерізів, переріз багатопустотної плити приведено до двотаврового, але тому що в обох випадках нейтральна лінія виявляється в межах верхньої полиці, розраховується як прямокутне (без урахування роботи бетону в розтягнутій зоні навіть для сталевібробетонних конструкцій в першому наближенні).

Так як висота стиснутої зони мала, то зміна на кілька відсотків розрахункового опору бетону через додавання фібри не позначається на площі робочої арматури, хоча плита з сталевібробетону важче, ніж залізобетонна, за рахунок видалення однієї з порожнин. Міцність при стисненні збільшується пропорційно вмісту фібри [1]. Можна зробити висновок, що при малих прольотах плит введення фібри в бетон не позначається на площі робочої арматури, хоча ускладнює конструкцію. Але для розрахунку сталевібробетонної конструкції необхідно прийняти іншу схему розташування внутрішніх зусиль, а саме врахувати роботу розтягнутої зони сталевібробетону, тоді зменшиться площа робочої арматури, притому на малих прольотах зменшиться значно.

Прогин також змінюється незначно за рахунок збільшення наведених характеристик матеріалу. А ось розрахунок на розкриття тріщин показує, що при рівних навантаженнях тріщини в сталевібробетонній плиті не розкриваються.

**Висновки.** Використання сталевібробетону для виготовлення багатопустотної плити перекриття дозволяє поліпшити її характеристики, такі як тріщиностійкість і тому довговічність. При розрахунку сталевібробетонних конструкцій, що згинаються, доцільно враховувати роботу розтягнутої зони сталевібробетону, що дозволить зменшити площу перерізу робочої арматури.

#### Література:

1. Талантова К.В. Сталевібробетон с заданными свойствами и строительные конструкции на его основе: дисс. ... д-ра. техн. наук / К.В. Талантова. – Барнаул, 2013. – 287 с.
2. Смирнов Д.А. Упругость и ползучесть сталевібробетона: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. А. Смирнов. – СПб., 2011. – 20 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 77 с.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 73 с.
5. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. Конструкції будинків і споруд. Настанова з проектування та виготовлення сталевібробетонних конструкцій. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 46 с.
6. ДСТУ Б В.2.6-2:2009. Конструкції будинків і споруд. Вироби бетонні і залізобетонні. Загальні технічні умови. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 29 с.

Стаття надійшла до редакції 04.07.2017

УДК 539.43: 621.64

**О.О. Ларін, К.Є. Потопальська***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»***ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ КРИВОЛІНІЙНОЇ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ ЗІ СТАТИСТИЧНО ЗАДАНИМ КОРОЗІЙНИМ ДЕФЕКТОМ, ЩО РОЗВИВАЄТЬСЯ У ЧАСІ**

*В даній роботі проводилося дослідження з оцінки впливу корозійного об'ємного дефекту на працездатність коліна трубопроводу. Розвиток дефекту моделюється у часі. Оцінка характеристик напружено-деформованого стану конструкцій з пошкодженням проводилась в рамках засобів комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів. Визначено зони, в яких є локалізація максимальних напружень в пошкодженій ділянці трубопроводу з урахуванням стохастичного характеру розвитку корозійного пошкодження та наведена оцінка його впливу на залишкову міцність конструкції в період експлуатації від 35 до 45 років.*

*Ключові слова:* корозійне пошкодження, магістральний трубопровід, надійність.

**А.А. Ларин, К.Е. Потопальская****ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА СО СТАТИСТИЧЕСКИ ЗАДАНЫМ КОРРОЗИОННЫМ ДЕФЕКТОМ, КОТОРЫЙ РАЗВИВАЕТСЯ ВО ВРЕМЕНИ**

*В данной работе проводилось исследование по оценке влияния коррозионного объемного дефекта, развивающегося во времени, на работоспособность колена трубопровода. Оценка характеристик напряженно-деформированного состояния конструкции с повреждением проводилась в рамках современных средств компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов. Определены зоны, в которых происходит локализация максимальных напряжений в поврежденном участке трубопровода с учетом стохастического характера развития коррозионного повреждения и приведена оценка его влияния на остаточную прочность конструкции в период эксплуатации от 35 до 45 лет.*

*Ключевые слова:* коррозионное повреждение, магистральный трубопровод, надежность

**O. Larin, K. Potopalska****AN ESTIMATION OF RESIDUAL STRENGTH OF CURVELINEAR PIPELINE PART BASED ON A STATISTICAL CORROSION DEFECT WHICH IS DEVELOPING OVER A TIME**

*Pipelines are used as one of the most practical and low cost methods for transmission of different liquid petroleum products and gases. Damage on the pipeline is capable to appears during operation due to the accumulation of fatigue and arising of corrosion. In this paper, the assess of effect of a corrosion volumetric defect which is developing over time on the working capacity of the pipeline elbow has been carried out. The estimation of the characteristics of the stress-strain state of a design with damage is carried out with the framework of computer simulation using the finite element method (FEM). Corrosion damage models explicitly as volumetric defect on the out surface of the pipeline elbow. The zones on the damaged section of the pipeline on which the maximum stresses are localized has been defined, taking into account the stochastic nature of the development of corrosion damage. On the basis of the obtained results, the probabilistic characteristics of the stress strain state has been determined, such as mean value, coefficients of variation and asymmetry. On the basis of these data, probability densities function of plasticity appearance have been obtained for different design time in operation at appropriate loading levels.*

*Keywords:* corrosion damage, pipeline, reliability

**Постановка проблеми.** Трубопроводи це один з найпоширеніших засобів транспортування різних рідких речовин і газів. Пошкодження трубопроводу, які виникають під час тривалої експлуатації, здатні з'являтися як наслідок накопичення втоми та прояву процесів корозії на поверхні елементів конструкції та можуть призвести до появи тріщин. На зародження та розвиток дефекту впливає багато зовнішніх факторів, таких як навколишнє середовище в якому знаходиться конструкція, варіація експлуатаційного навантаження та інше. Тому розвиток поверхневих корозійних дефектів слід розглядати у ймовірнісній постановці. Своєчасне діагностування таких пошкоджень може запобігти виникненню аварійно-небезпечних ситуацій, екологічних катастроф та забруднення. Попередження відповідних подій за рахунок вчасного проведення технічного обслуговування та ремонту є вкрай важливою задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток корозійних дефектів, особливості їх росту в елементах конструкцій та вплив на залишкову міцність викликають інтерес у інженерів і дослідників в галузі аналізу та прогнозування ініціації корозії, а також моделювання її розвитку [1]. Питання вивчення причин зародження корозії знаходяться в компетенції фізичної хімії та матеріалознавства. При цьому розглядаються задачі визначення технологічних засобів підвищення стійкості матеріалу конструкції до окислення або інших хімічних реакцій. Розвитку корозії, як процесу також приділено багато уваги [2–4]. Звичайно, велику увагу в цих роботах приділяють

експериментальним дослідженням росту корозійних пошкоджень, аналізують швидкість росту, а також вплив на неї зовнішніх чинників [5]. З іншого боку дуже поширені підходи математичного моделювання процесу росту корозії, які можна використовувати для прогнозування надійності та оцінки залишкової міцності конструкцій, що вже є пошкодженими. В сучасних дослідженнях досить часто оцінюють міцність конструкції за допомогою явного моделювання пошкодження [6–14], яке зазвичай проводиться у програмних комплексах з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). Такій підхід дозволяє чисельно дослідити зміни напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводу з дефектами різної форми та в різних місцях конструкції. Найвідоміші в літературі дослідження зосереджено на оцінці залишкової міцності трубопроводів з корозійними дефектами на його прямих ділянках [2,4,15,16]. Є роботи в яких аналізується напружений стан коліна трубопроводу, де показано, що корозійне пошкодження на криволінійній частині трубопроводу призводить до більшої концентрації напружень [10,17]. Але в зазначених дослідженнях розглядаються дефекти з фіксованими розмірами, хоча розвиток корозії це процес, який слід розглядати залежно від часу експлуатації. Таким чином актуальним є проведення досліджень щодо міцності криволінійної частини трубопроводу на основі тривимірних моделей з одночасним моделюванням процесу можливого корозійного пошкодження.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є оцінка залишкової міцності пошкодженого коліна трубопроводу на основі статистичної оцінки концентрації НДС конструкції з корозійним дефектом, що задається із випадковими розмірами в залежності від часу його виникнення.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити параметричну математичну модель визначення НДС конструкції, яка має складну тривимірну криволінійну геометрію і об'ємний поверхневий дефект корозійної природи.
- Провести оцінку його впливу на залишкову міцність конструкції на основі статистичного моделювання методом Монте-Карло з урахуванням експлуатаційного навантаження і стохастичного характеру розвитку розмірів корозійного пошкодження.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі моделюється фрагмент коліна трубопроводу з урахуванням його криволінійної геометрії, нелінійними властивостями матеріалу та навантаженням, які відповідають стандарту ASME B31G. Модель складається з тороїдальної і циліндричної частин. Для розрахунку було обрано наступні значення розмірів конструкції: зовнішній радіус трубопроводу  $D = 508$  мм; товщина стінки  $h = 12,5$  мм; довжина досліджуваної частини трубопроводу  $l = 1,5$  м (відповідно до X42 типу трубопроводу). Довжину прямої частини секції труби вибирали апостеріорно після низки попередніх випробувань, коли крайові ефекти в моделі не впливають на деформований стан в досліджуваному перерізі труби. Матеріалом є сталь, властивості якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Властивості матеріалу трубопроводу

Параметр	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Границя плинності	Границя міцності
Позначення	$E$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Значення	205	0.3	290	430

Ділянку трубопроводу навантажено внутрішнім тиском  $P$  і зафіксовано по краях. Для такого типу трубопроводів номінальний (робочій) тиск дорівнює 3 МПа. Також треба зазначити, що при експлуатації з певною частотою буває включення та виключення подачі речовини у трубопровід. При цьому значення внутрішнього тиску може бути більше робочого. Рівень максимального навантаження залежить від області розташування трубопроводу та відповідно до ASME B31.8 (2003) може змінюватися від 6 МПа до 12,8 МПа (табл. 2), де LC1- LC4 – характерні місця розташування ділянки, що досліджується.

Таблиця 2.

Зміна внутрішнього тиску

Область розташування	Типове значення	LC1	LC2	LC3	LC4
Максимальний тиск, МПа	6	12.8	10.6	8.6	7.1

**Моделювання поверхневого дефекту.** Об'ємний поверхневий дефект моделюється в центрі зовнішньої поверхні ділянки коліна трубопроводу (рис.2). Для дослідження було обрано дефект у формі паралелепіпеду із закругленими границями. Оскільки дефект розташований на поверхні вигину труби, ескіз був спроектований в локальній тороїдальній системі координат, яка залежить від радіуса коліна трубопроводу  $R$ . Геометричні параметри, такі як довжина ( $d_1$ ), ширина ( $d_2$ ) та глибина ( $d_3=h-d$ ), задано параметрично. Це дозволяє автоматично перебудовувати модель в залежності від розмірів.

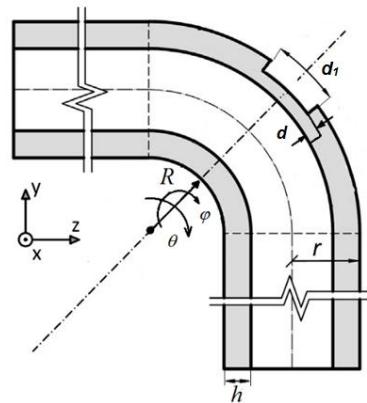


Рис. 1. Ескіз розрахункової моделі

Конкретні розміри дефекту визначаються з аналізу поточного стану його розвитку. Тому в роботі пропонується отримувати розрахункові моделі з дефектом певного рівня розвитку та вивчати залишкову міцність трубопроводу у певний час його експлуатації. З аналізу відомих досліджень можна підсумувати, що зазвичай при оцінці росту дефектів використовують лінійні [8] або нелінійні [18,19] моделі для кінетики росту корозії.

В даній роботі пропонується враховувати ріст дефекту у часі у вигляді степеневі функції, яка пов'язує час експлуатації та характерний розмір  $d_j(t)$  [9]

$$d_j(t) = k(t - t_0)^\alpha, \quad (1)$$

де  $t_0$  – час появи корозійного пошкодження,  $\alpha$  та  $k$  – це показники кінетики росту пошкоджуваності. З літературних даних та практики експлуатації трубопроводів відомо, що типово за 5 років на поверхні трубопроводу виникають пошкодження корозійного типу. Тому при розрахунках було обрано  $t_0 = 5$  років. Процес розвитку корозії є випадковим, що може бути враховано, якщо показники рівняння кінетики її росту (1):  $\alpha$  та  $k$  вважати випадковими величинами. Такий підхід широко використовується в літературі [5,18,20]. При цьому відомо [18,20] багато статистичних даних щодо можливих значень параметрів  $\alpha$  та  $k$  і їх можливої варіації, зокрема і в залежності від зовнішніх чинників, а також різних напрямків росту корозійного пошкодження (тобто у глибину та по поверхні у ширину і довжину).

Параметр  $k$  здатен суттєво змінюватись, навіть за більш-менш однакових зовнішніх факторах. Параметр  $\alpha$  в деяких дослідженнях вважається сталою детермінованою величиною [18], але є робота, що аналізує його зі статистичної точки зору [20]. Проте його можлива варіація є не суттєвою, тому в даній роботі пропонується вважати параметр  $\alpha$  фіксованим та таким, що дорівнює 0,73 [17].

Із статистичних даних відомо, також що розподіл значень розмірів дефекту із достатньою точністю можна вважати підпорядкованим підпорядковується логнормальному закону розподілення [20]

$$f(d_j, t) = \frac{1}{d_j \sigma_j(t) \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{(-\ln d_j - \mu_j(t))^2}{2\sigma_j^2(t)} \right], \quad (2)$$

де  $\sigma_j(t)$  та  $\mu_j(t)$  – це параметри закону, які залежать відповідно до розміру дефекту у поточний час експлуатації та визначаються через співвідношення (1) з коефіцієнту варіації та математичного очікування габаритних розмірів дефекту наступим чином:



$$\mu_j(t) = \ln \left( \frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)}}} \right), \quad \sigma_j^2(t) = \ln \left( 1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)} \right), \quad (3)$$

$$m_j(t) = \langle d_j(t) \rangle = \langle k_j \rangle (t - t_0)^\alpha, \quad \sigma_{d_j}^2(t) = \langle d_j(t)^2 \rangle = \sigma_{k_j}^2 (t - t_0)^{2\alpha}, \quad v_j = \frac{\sigma_{d_j}(t)}{m_j(t)} = \frac{\sigma_{k_j}}{k_j} = \text{const}, \quad (4)$$

де  $\langle \dots \rangle$  – оператор усереднення,  $m_j(t)$  – математичне очікування,  $v_j$  – коефіцієнт варіації, який залежить від часу. На рисунку 2 на схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження  $m_3(t)$  та можливий розкид її значень у часі.

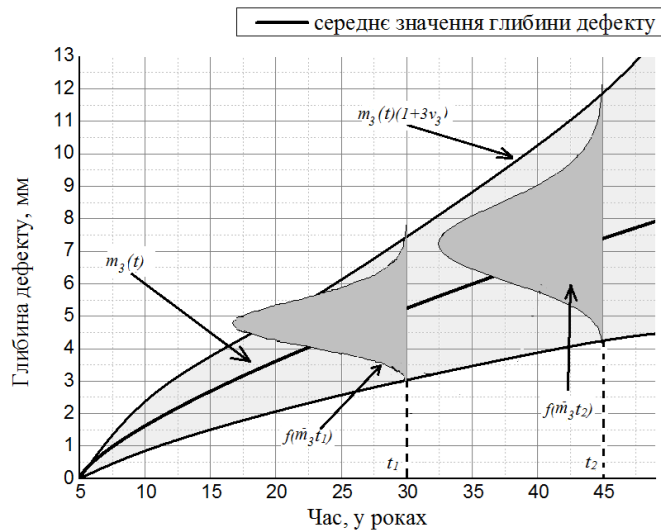


Рис.2. Графік можливої зміни глибини дефекту у часі та у поточний рік експлуатації

**Скінчено-елементна модель.** Для визначення НДС криволінійної частини трубопроводу використовували МСЕ. При розрахунках було використано чверть моделі, в якій враховано симетрію трубопроводу.

При створенні сітки враховували особливості моделі. Розмір елемента поступово зменшується при наближенні до зони з пошкодженням. Задано чотири елементи за товщиною. На непошкоджених ділянках трубопроводу будували впорядковану гексагональну сітку, у зоні дефекту – тетраедральну. Використовували ізопараметричний скінчений елемент з 8-ма вузлами та зі 3-ма ступенями вільності у вузлі. Сітку усєї моделі та детально поверхневий дефект зображено на рис.3.

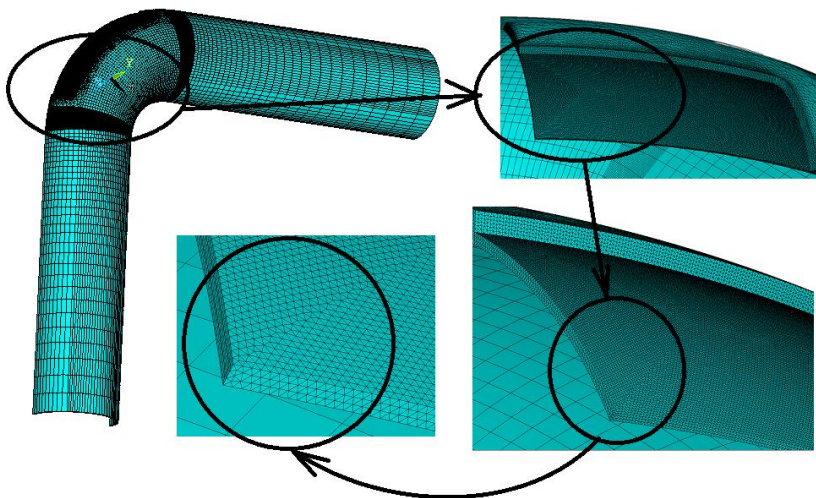


Рис. 3. Сітка чверті коліна трубопроводу

**Результати досліджень.** Попередньо було проведено серію розрахунків коліна трубопроводу з середніми розмірами дефекту відповідно до геометричних параметрів, що

відповідали різному часу життя пошкодженого трубопроводу (період від 10 до 45 років). Виявлено, що пластичні деформації у першу чергу з'являються у поздовжньому напрямку пошкодження. Також треба зазначити, що при експлуатації конструкції з фіксованими розмірами дефекту, що до 23 років пластичні деформації починають з'являтися у протилежному напрямку відносно дефекту, тобто у місці найбільшої кривизни. Більш того ці деформації з'являються за великих значень внутрішнього тиску, які не відповідають умовам експлуатації. Таким чином можна зробити висновок, що поверхневий дефект з середніми габаритними розмірами протягом перших 23 років не впливає суттєво на НДС конструкції. На рис. 4 показано при якому навантаженні в конструкції з середніми розмірами дефекту еквівалентні напруження досягають границі плинності та міцності.



**Рис.4. Значення внутрішнього тиску, що призводить до появи пластичних деформацій в конструкції та досягання границі міцності при середніх розмірах об'ємного дефекту**

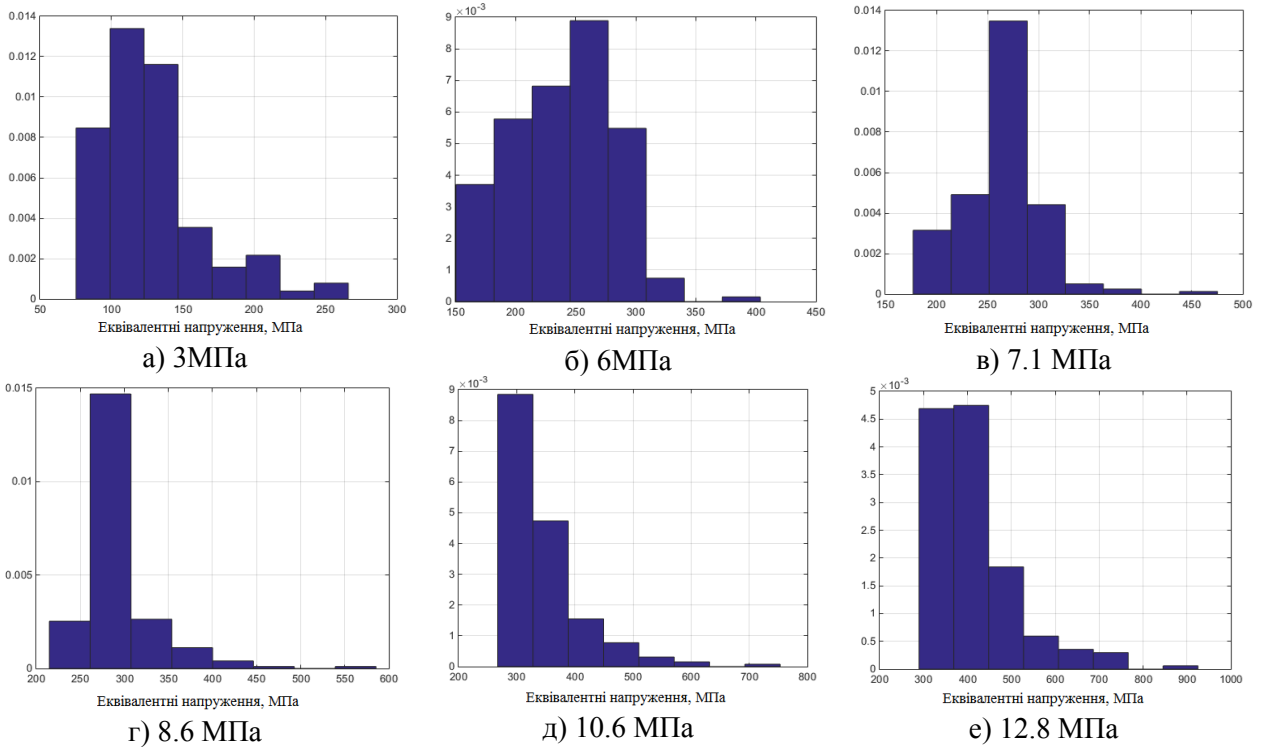
На рис.4 лінією з прямокутними маркерами відображено зміну значення внутрішнього тиску, при якому в конструкції виникають пластичні деформації у відповідний період експлуатації трубопроводу з об'ємним дефектом середніх розмірів. Прямими лініями вказано значення максимального зовнішнього навантаження в залежності від області розташування трубопроводу.

Виявлено, що у період після 35 років експлуатації у трубопроводі можуть з'являтися пластичні деформації при типовому навантаженні (рис.4 лінія з прямокутними маркерами). В період експлуатації від 37 років у трубопроводі з відповідним дефектом при дії максимально можливого навантаження виникають напруження, які привішують границю міцності (рис.4 лінія з круглими маркерами).

Тому подальші дослідження пошкодженого трубопроводу проводилось для періоду експлуатації з 35 до 45 років. Для кожного моменту часу (від 35 до 45 років) було проведено біля 200 розрахунків з випадковими розмірами дефекту, які підпорядковуються логнормальному закону розподілення та мають відповідні відомі ймовірнісні характеристики (3-4).

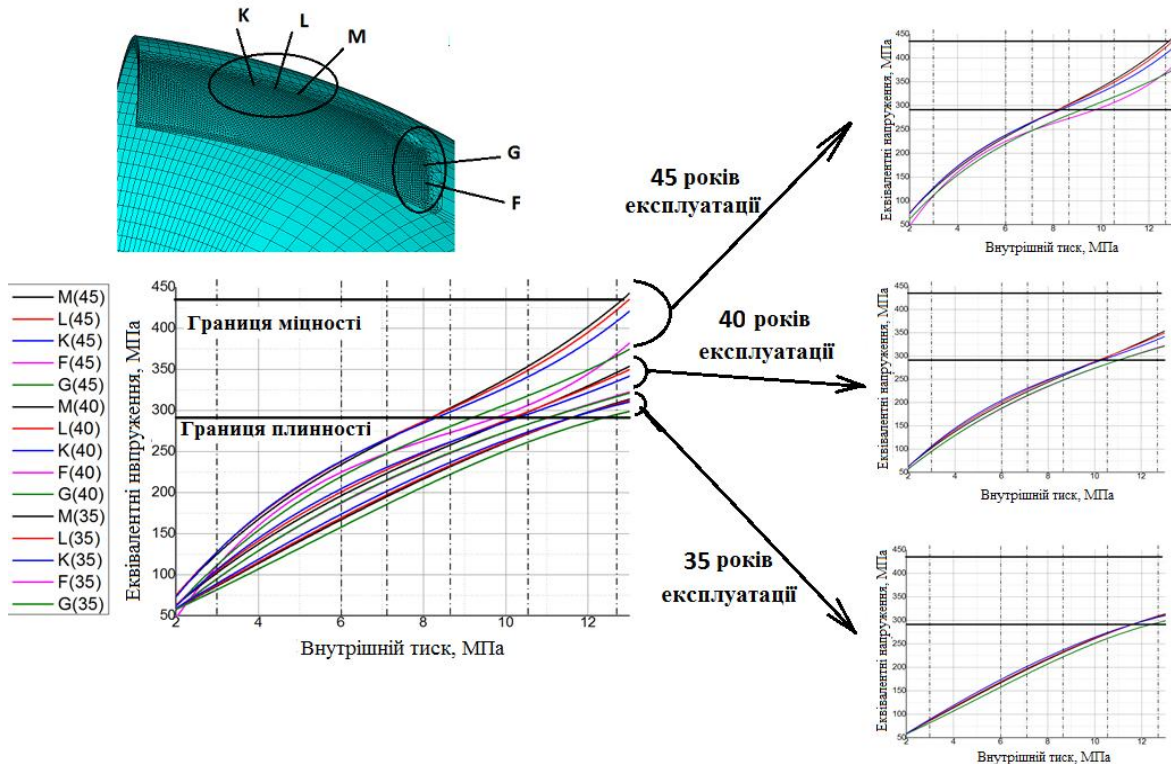
Для аналізу результатів було обрано 5 вузлів (K,L,H,G,F на рис.5) на конструкції в зоні з дефектом, що знаходяться в типових місцях появи пластичних деформацій, які були виявлені при попередніх дослідженнях.

Після проведених розрахунків отримані ймовірнісні характеристики НДС конструкції при різних рівнях навантаження та у різний термін експлуатації. Отримані дані по еквівалентним напруженням за критерієм Мізеса, які було статистично оброблено. Сформовані гістограми для різних рівнів навантаження та визначені середні значення, дисперсії та коефіцієнти асиметрії гістограм.



**Рис.5. Гістограми розподілу максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням при терміні експлуатації 45 років при різних рівнях навантаження**

На рис. 6 показана залежність математичного очікування напружень від внутрішнього тиску. З отриманих результатів визначено, що при експлуатації трубопроводу при максимальному навантаженні починаючи з 35 років напруження, що виникають привіщують границю плинності. А при експлуатації 45 років в декількох точках конструкції виникаючі напруження привіщують границю міцності. З графіків видно, що характер зміни напружень однаковий в усіх розглянутих випадках. Але відомість є в тому, що при збільшенні терміну експлуатації розкид напружень у відповідних вузлах починає збільшуватись.



**Рис.6. Математичне очікування еквівалентних напружень при різних термінах експлуатації в вузлах у дефекті**

На рис.7 представленні результати статистичної обробки коефіцієнтів варіації та асиметрії напружень в дефекті. З отриманих результатів можна зробити висновок, що при тиску від 6 МПа до 9 МПа розкид значень еквівалентних напружень не великий, що свідчить про те, що у цьому діапазоні навантаження значення виникаючих еквівалентних напружень близький та досягають границі плинності.

Залежність коефіцієнту асиметрії гістограми напружень в дефекті (рис 7 б) від внутрішнього тиску показує, що розподіл напружень відхиляється вліво при навантаженні від 2 МПа до 4 МПа та від 9 МПа до 12 МПа. А при навантаженні від 4 до 9 МПа розподіл майже симетричний.

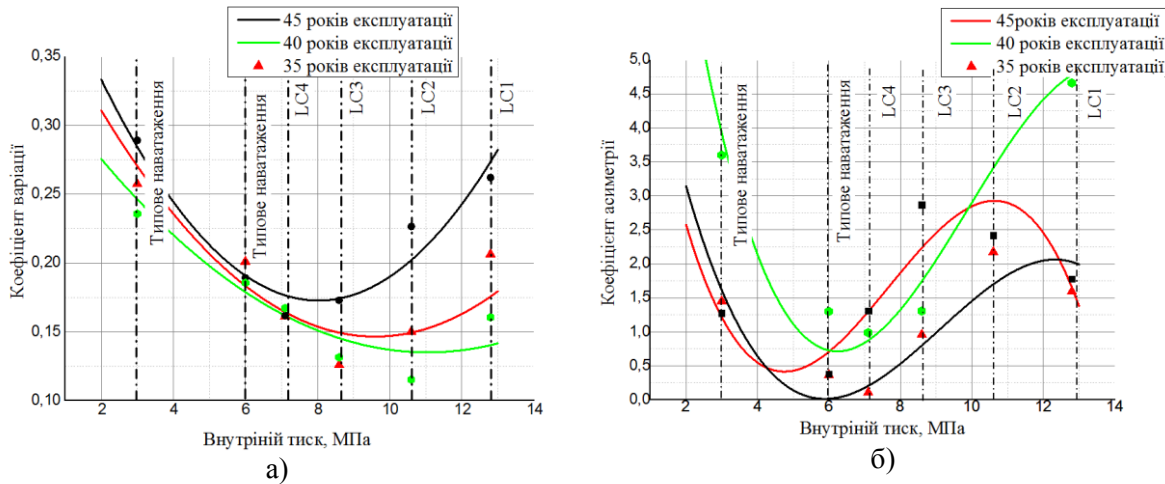


Рис.7. Коефіцієнти варіації (а) та асиметрії (б) гістограм напружень

Аналіз виду гістограм та отриманих показників вказує на те що, нажаль дані не підпорядковуються відомим законам розподілення. Через те, що при різних рівнях навантаження характер розподілу напружень різний (або асиметрія в ліво, або симетрія відносно центру)

Тому для апроксимації гістограм пропонується щільність ймовірності розглядати як ортогональний ряд Лагера [21]. Вибір такого розподілу обумовлено тим, що даний ряд дає функцію, яка є позитивно визначеною та при врахуванні тільки одного члену ряду приймає вид гамма-розподілення, яке саме по собі добре підходить для багатьох результатів. Апроксимація за допомогою ряду Лагера має наступний вигляд [21]:

$$f_1(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n e^{-x} x^{\alpha} L_n^{(\alpha)}(x), \quad (5)$$

де  $L_n^{(\alpha)}(x)$  – це узагальнений поліном Лагера,  $x$  – випадкова величина,  $\alpha$  – довільна константа,  $c_n$  – коефіцієнт розкладання. Узагальнений поліном Лагера має такий вигляд [20]:

$$L_n^{(\alpha)}(x) = e^x \frac{x^{-\alpha}}{n!} \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x} x^{n+\alpha}) \quad (6)$$

При використанні даної щільності ймовірності було достатньо обмежитись першими чотирма членами ряду:

$$\begin{aligned} L_0^{(\alpha)}(x) &= 1; \\ L_1^{(\alpha)}(x) &= 1 + \alpha - x; \\ 2L_2^{(\alpha)}(x) &= (\alpha + 1)(\alpha + 2) - 2x(\alpha + 2) + x^2; \\ 6L_3^{(\alpha)}(x) &= (\alpha + 1)(\alpha + 2)(\alpha + 3) - 3x(\alpha + 2)(\alpha + 3) + 3x^2(\alpha + 3) - x^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Коефіцієнти ряду визначаються зі статистичних моментів, які було проаналізовано як функції робочого тиску та очікуваного часу експлуатації (рис. 7). Для їх визначення зробимо заміну випадкової величини  $y = x/\beta$  з щільністю ймовірності  $f(y)$ , при чому  $f(y) = f(x/\beta)/\beta$ .

$$f(y) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n e^{-y} y^{\alpha} L_n^{(\alpha)}(y), \quad (8)$$

де коефіцієнти  $b_n$  виражаються наступним чином:

$$b_n = \frac{n!}{\Gamma(n+\alpha+1)} \int_0^\infty L_n^\alpha(y) f(y) dy = \frac{n!}{\Gamma(n+\alpha+1)} \int_0^\infty L_n^\alpha\left(\frac{\alpha}{\beta}\right) f_1(x) dx \quad (9)$$

Якщо підставити вирази поліномів Лагера (6) у (8) та врахувати умову нормування щільності ймовірності та визначення початкових моментів, то можна отримати:

$$b_1 = \frac{1+\alpha - m_{n1}/\beta}{\Gamma(\alpha+2)}, \quad (10)$$

$$b_2 = \frac{1}{\Gamma(\alpha+3)} \left[ (\alpha+1)(\alpha+2) - \frac{2m_{n1}}{\beta}(\alpha+2) + \frac{m_{n2}}{\beta^2} \right]$$

Оскільки в (7) та (8) коефіцієнти  $\alpha$  та  $\beta$  довільні, то їх можна вибрати [21] таким чином, щоб  $b_1 = b_2 = 0$ . Для цього прирівнюємо праві частини виразів (10) нулю та вирішуємо систему рівнянь, після чого отримуємо коефіцієнти  $b_n$ , які виражаються через початкові статистичні моменти  $m_{ni}$ . Тобто виразити через математичне очікування  $m_\sigma$ , дисперсію  $\sigma_\sigma^2$  та коефіцієнт асиметрії  $a_\sigma$ . Дійсно:

$$\alpha = \frac{m_\sigma^2}{\sigma_\sigma^2} - 1; \quad \beta = \frac{\sigma_\sigma^2}{m_\sigma}, \quad (11)$$

$$b_0 = \frac{1}{\Gamma(\alpha+1)}, \quad b_1 = 0, \quad b_2 = 0, \quad b_3 = \frac{1}{\Gamma(\alpha+4)} \left[ \frac{m_{n2}}{\beta^2}(\alpha+3) - \frac{m_{n3}}{\beta^3} \right]. \quad (12)$$

де

$$m_{n1} = m_\sigma(p, t), \quad m_{n2} = m_\sigma^2(p, t) + \sigma_\sigma^2(p, t), \quad m_{n3} = a_\sigma(p, t)\sigma_\sigma^3 + 3m_\sigma(p, t)\sigma_\sigma^2 + m_\sigma^3(p, t) \quad (13)$$

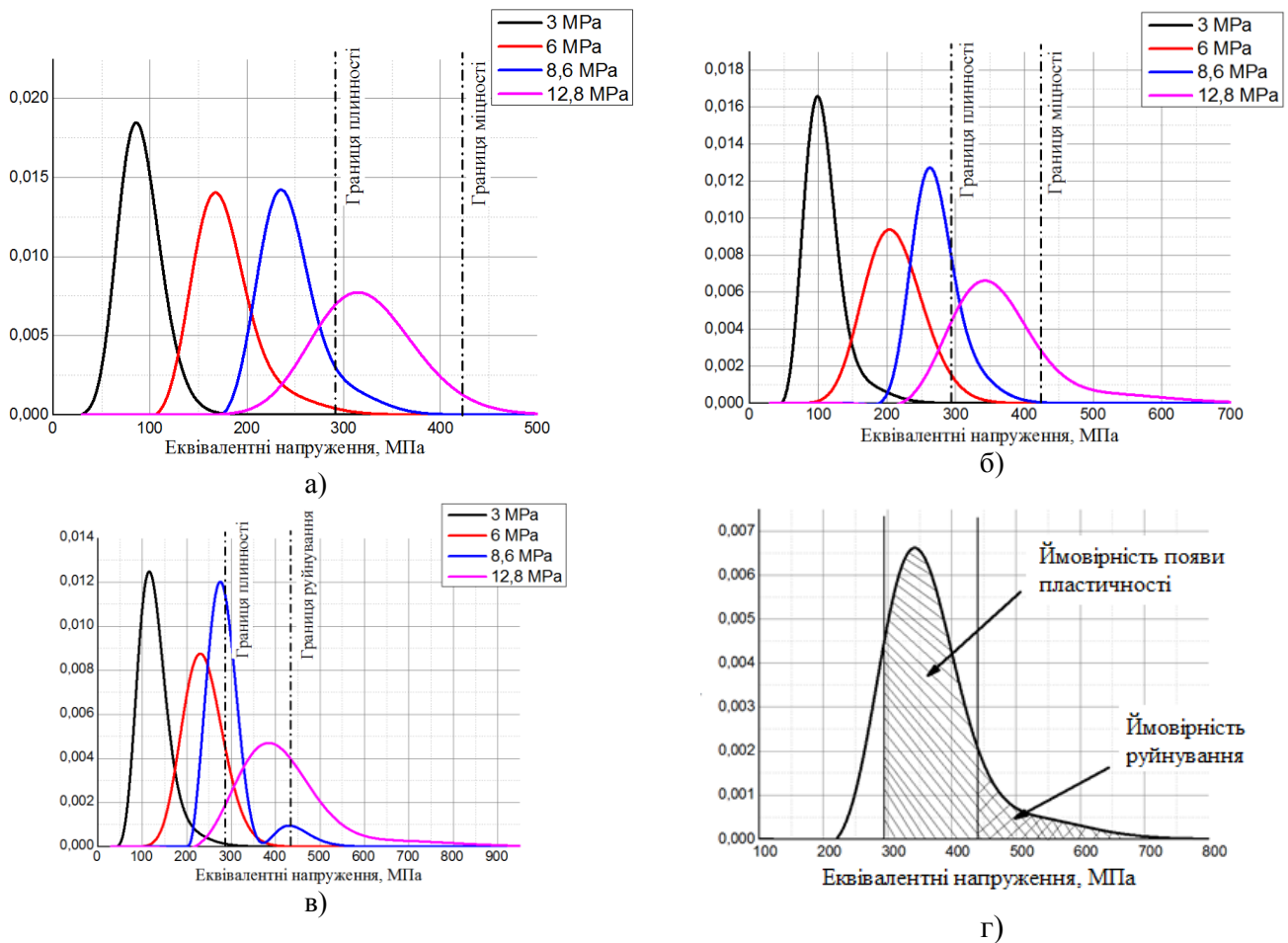
Після підстановки отриманих даних у (8) з використанням (7),(10)-(12) були отримані щільності ймовірності для термінів експлуатації 35, 40 та 45 років відповідно та для різних рівнів робочого навантаження. Зазначений розкид показано на рис. 7абв.

Після інтегрування отриманих щільностей ймовірності (7) по внутрішньому навантаженню відповідно до терміну експлуатації за наступною формулою можна отримати залежність ймовірність появи пластичності  $Q$  від рівня навантаження та часу, який відпрацювала конструкція:

$$Q(p, t) = 1 - \int_0^{\sigma_y} f(y|p, t) dy \quad (13)$$

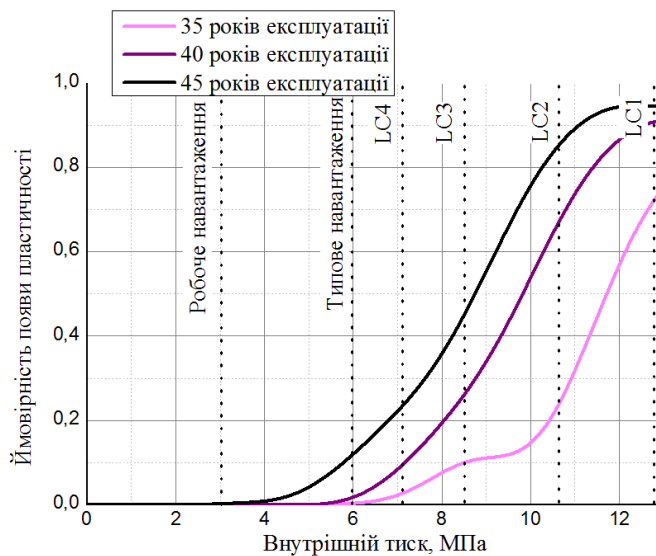
На рис. 8 приведено щільності ймовірності для різних рівнів навантаження для різних термінів експлуатації. Вертикальними лініями зображені границі плинності та міцності матеріалу відповідно. З графіків видно, що при номінальному навантаженні 3 МПа тільки при експлуатації терміном 45 років можуть з'являтися пластичні деформації. Ймовірність руйнування виникає при навантаженні 12,8 МПа при всіх представлених розрахунках та дорівнює відповідно для 35 років – 0,117, 45 років – 0,4. На рис.8 з схематично показано зону площі якої відповідає ймовірності появи пластичних деформації у конструкції (штриховка однією лінією). А площа зони, яка заштрихована двома лініями це ймовірність того, що еквівалентні напруження перевищують границю міцності, тобто ймовірність руйнування.





**Рис.8. Щільності ймовірності максимальних еквівалентних напружень в конструкції з пошкодженням при терміні експлуатації 35 (а), 40 (б) та 45 (в) років при різних рівнях навантаження**

Таким чином, окремо для кожного рівня навантаження та для відповідного терміну експлуатації можна отримати ймовірність появи пластичності у матеріалі рис.9.



**Рис.9. Ймовірність появи пластичних деформації в конструкції при різних термінах експлуатації та рівні навантаження**

При експлуатації 45 років ймовірність появи пластичних деформації при навантаженні 12 МПа дорівнює 0,943. З графіку (рис.9) видно, що при експлуатації 40 років з відповідним

дефектом, поява пластичності спостерігається вже не тільки при максимальному навантаженні у відповідній зоні, а при типовому навантаженні у 6 МПа. При максимальному навантаженні у 12,8 МПа, ймовірність появи пластичності майже дорівнює одиниці, що свідчить про те, що майже при усіх варіаціях розмірів дефектів з'являються пластичні деформації.

**Висновки.** В роботі проведено серію розрахунків криволінійної частини трубопроводу з пошкодженням, що стохастично розвивається при різних термінах експлуатації. На основі отриманих результатів було визначено ймовірнісні характеристики НДС, такі як математичне очікування, коефіцієнт варіації та асиметрії в залежності від внутрішнього тиску та часу який перебуває в експлуатації трубопроводу. На основі цих даних було отримано щільності ймовірностей для різних термінів експлуатації конструкції при відповідних рівнях навантаження. Визначено, що при експлуатації коліна трубопроводу з пошкодженням, яке розвинулось за час експлуатації від 35 до 45 років при максимально можливому навантаженні у всіх відповідних зонах існує ймовірність появи пластичних деформацій відповідно від 0,117 до 0,94, а при типовому навантаженні у 6 МПа при терміні експлуатації від 45 років ймовірність появи пластичності 0,125. Також треба зазначити, що у випадку виникнення значних пластичних деформацій у конструкції, може відбуватись накопичення втомних пошкоджень, що у свою чергу зменшує залишковий ресурс елемента трубопроводу та потребує самостійного вивчення.

#### Список використаних джерел:

1. Побережний Л., Станецький А., Рудко В. Л. Poberezhny, A. Stanetsky, V. Rudko. 2011. P. 20–26.
2. Netto T.A., Ferraz U.S., Botto A. On the effect of corrosion defects on the collapse pressure of pipelines // Int. J. Solids Struct. 2007. Vol. 44, № 22–23. P. 7597–7614.
3. da Costa-Mattos H.S. et al. An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins // Mater. Des. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 30, № 9. P. 3581–3591.
4. Chen Y. et al. Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects // Eng. Fail. Anal. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 47, № PA. P. 67–76.
5. Valor A. et al. Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits // Corros. Sci. 2007. Vol. 49, № 2. P. 559–579.
6. Silva R.C.C., Guerreiro J.N.C., Loula A.F.D. A study of pipe interacting corrosion defects using the FEM and neural networks // Adv. Eng. Softw. 2007. Vol. 38, № 11–12. P. 868–875.
7. De Leon D., Macías O.F. Effect of spatial correlation on the failure probability of pipelines under corrosion // Int. J. Press. Vessel. Pip. 2005. Vol. 82, № 2. P. 123–128.
8. Li S.X. et al. Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model // J. Pet. Sci. Eng. Elsevier B.V., 2009. Vol. 65, № 3–4. P. 162–166.
9. Caleyó F. et al. Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study // Corros. Sci. Elsevier Ltd, 2009. Vol. 51, № 9. P. 1925–1934.
10. Khalaj Khalajestani M., Bahaari M.R. Investigation of pressurized elbows containing interacting corrosion defects // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 123. P. 77–85.
11. Ma B. et al. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects // Eng. Fail. Anal. Elsevier Ltd, 2013. Vol. 32. P. 209–219.
12. Vodka O. Computation tool for assessing the probability characteristics of the stress state of the pipeline part defected by pitting corrosion // Adv. Eng. Softw. 2015. Vol. 90. P. 159–168.
13. Методом М., Елементів С. Дослідження впливу корозійних пошкоджень на напружено-деформований стан сталевих труб магістрального нафтопроводу шляхом моделювання методом скінчених елементів. 2013. Vol. 4, № 39. P. 209–215.
14. Seminar B., Project W. NDT DAYS 2016. 2016. Vol. 1, № 187.
15. Ahammed M. Prediction of remaining strength of corroded pressurised pipelines // Int. J. Pres. Ves. Ki Pq-q. 1997. Vol. 161, № 96. P. 213–217.
16. Larin O., Barkanov E., Vodka O. Prediction of reliability of the corroded pipeline considering the randomness of corrosion damage and its stochastic growth // Eng. Fail. Anal. 2016. Vol. 66. P. 60–71.
17. Cunha D.J.S. et al. Fatigue analysis of corroded pipelines subjected to pressure and temperature loadings // Int. J. Press. Vessel. Pip. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 113. P. 15–24.
18. Bazán F.A.V., Beck A.T. Stochastic process corrosion growth models for pipeline reliability // Corros. Sci. 2013. Vol. 74. P. 50–58.
19. Valor A. et al. Reliability assessment of buried pipelines based on different corrosion rate models // Corros. Sci. Elsevier Ltd, 2013. Vol. 66. P. 78–87.
20. Teixeira A.P. et al. Reliability of pipelines with corrosion defects // Int. J. Press. Vessel. Pip. 2008. Vol. 85, № 4. P. 228–237.
21. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. Москва "РАДИО И СВЯЗЬ", 1982. 624 с.

**Грінченко Є.М.**, ст.н.с. науково-дослідної лабораторії захисту інформації та кібербезпеки ХНУВД, к.т.н, доцент.

**Водка О.О.**, доцент кафедри Динаміки та міцності машин НТУ «ХП», к.т.н, доцент.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2017

УДК 621.834

**Н.В. Ліщенко***Одеська національна академія харчових технологій***ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ ЗУБОШЛІФУВАННЯ ЗА ТЕМПЕРАТУРНИМ КРИТЕРІЄМ**

*Розроблено прикладну методику визначення режимів профільного зубошліфування на основі показників питомої інтенсивності шліфування  $Q'_w$  і питомого обсягу матеріалу  $V'_w$ , що видаляється, які можна використовувати для технологічної діагностики операції профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК.*

*Ключові слова: профільне зубошліфування, етапи зубошліфування, питома інтенсивність шліфування, питомий обсяг матеріалу, що видаляється, теплонапруженість зубошліфування, питома робота шліфування.*

**Н.В. Лищенко***Одесская национальная академия пищевых технологий***ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ ПО ТЕМПЕРАТУРНОМУ КРИТЕРИЮ**

*Разработана прикладная методика определения режимов профильного зубошлифования на основе показателей удельной интенсивности шлифования  $Q'_w$  и приведенного объема удаляемого материала  $V'_w$ , которые можно использовать для технологической диагностики операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ.*

*Ключевые слова: профильное зубошлифование, этапы зубошлифования, удельная интенсивность шлифования, удельный объем удаляемого материала, теплонапряженность зубошлифования, удельная работа шлифования.*

**N.V. Lishchenko***Odessa National Academy of Food Technologies***DETERMINATION OF GRINDING MODES BY TEMPERATURE CRITERIA**

*An applied technique for determining the profile gear grinding conditions is developed on the basis of both the specific material removal rate  $Q'_w$  and the material removal rate  $V'_w$  which the two might be used for form gear grinding operation diagnostics on CNC machine.*

*Keywords: form gear grinding, gear grinding stages, specific material removal rate, material removal rate, the heat stress of the gear grinding, the specific grinding work.*

Для оцінки продуктивності і проектування шліфувальної операції використовується ряд характеристичних величин, до числа яких відносяться: обсяг матеріалу, що видаляється за одиницю часу (material removal rate)  $Q_w$  ( $\text{мм}^3/\text{с}$ ), загальний обсяг  $V_w$  матеріалу, що видаляється, ( $\text{мм}^3$ ). У закордонній літературі перші два показники додатково наведені до одиниці ефективної (далі активної) ширини (width) шліфувального круга і позначені відповідно:  $Q'_w$  у  $\text{мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$  і  $V'_w$  у  $\text{мм}^3/\text{мм}$  [1]. У роботі [2] відмічається зв'язок показника  $Q'_w$  з теплонапруженістю процесу зубошліфування, у роботі [3] параметр  $V'_w$  є характеристикою ресурсу роботи шліфувального круга по мірі його зношування. У роботі [4] дана методика визначення  $Q'_w$ .

У роботі [5] автори розглядають структуру операції зубошліфування, що складається із трьох етапів: чорнового, напівчистового і чистового. Причому режими на кожний етап обираються виходячи з параметрів  $Q'_w$  і  $V'_w$ . Але в зазначеній роботі [5] не наведено технологічні критерії, за якими визначено чисельні значення показників  $Q'_w$  і  $V'_w$ . Видно тільки, що вони зменшуються від етапу до етапу. Не зазначено спосіб одержання режимних параметрів.

Таким чином у літературі не наведено прикладні методики визначення режимів зубошліфування на основі зазначених показників технологічної операції.

**Метою статті** є розробка методики визначення режимних параметрів профільного зубошліфування на основі показників  $Q'_w$  і  $V'_w$  і їх спільного використання з теплофізичною моделлю операції шліфування, а також розробка способу технологічної діагностики операції.

**Основний матеріал.** Максимальна температура шліфування на поверхні на етапі нагрівання  $T_H$  описується математичною залежністю, що представляє собою рішення одновимірного диференціального рівняння теплопровідності. Ця залежність при  $x = 0$  має вигляд [6]



$$T_H = \frac{2q\sqrt{a\tau_n}}{\lambda\sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

де  $q$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$a$ ,  $\lambda$  – коефіцієнти температуро – і теплопровідності, у м<sup>2</sup>/с і Вт/(м·°С), відповідно;

$\tau_n = \frac{\sqrt{D} t_v}{V_f}$  – час дії теплового джерела на етапі нагрівання, с;

$t_v$  – вертикальна глибина шліфування, мм;

$D$  – миттєвий діаметр шліфувального круга в розглянутому перетині його профілю, мм;

$V_f$  – осьова подача, мм/с.

Щільність теплового потоку  $q$  (у Вт/мм<sup>2</sup>) може бути знайдена на основі формули, яка наведена в роботі [7], тобто

$$q = A_{num} \Psi \frac{V_f t_v \sin \alpha}{\sqrt{D t_v}}, \quad (2)$$

де  $\Psi$  – частка теплоти, що поступає в заготовку;

$A_{num}$  – питома робота шліфування, Дж/мм<sup>3</sup>;

$\alpha$  – кут профілю, рад.

Формула (1) з урахуванням формули (2) може бути представлена у вигляді

$$T_H = 2 \cdot 10^6 A_{num} \Psi \frac{t_v^{0,75} V_f^{0,5} \sin \alpha}{D^{0,25} \lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (3)$$

В формулі (3) параметри мають такі одиниці вимірювання:  $A_{num}$  [Дж/мм<sup>3</sup>];  $t_v$  [мм];  $V_f$  [мм/с];  $\alpha$  [рад];  $a$  [м<sup>2</sup>/с];  $D$  [мм];  $\lambda$  [Вт/(м·°С)].

Враховуючи, що  $Q'_w = t_v V_f$ , формулу (3) можна представити у вигляді

$$T_H = 2 \cdot 10^6 A_{num} \Psi \frac{Q_w'^{0,75} V_f^{-0,25} \sin \alpha}{D^{0,25} \lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (4)$$

З огляду літератури встановлено, що показники  $Q'_w$  і  $V'_w$  характеризують відповідно інтенсивність шліфування та ресурс стійкості шліфувального круга.

Інтенсивність шліфування  $Q'_w$  пов'язана з теплонапруженістю, оскільки з величиною цього параметра зв'язують появу шліфувальних припиків [2]. Шліфувальний круг по мірі роботи може мати різні проміжні стани, тобто змінюється його ріжуча здатність. Але при зміні ріжучої здатності параметр  $Q'_w$  не враховує цю зміну, що підтверджує його формальний характер. Можна навіть сказати, що  $Q'_w$  – інтенсивність шліфування для миттєвого стану шліфувального круга. Тому самому показнику  $Q'_w$  будуть відповідати різні температури шліфування, які залежать від фактичного стану шліфувального круга. Отже, необхідно встановити зв'язок  $Q'_w$  з температурою шліфування. Показник  $Q'_w$  можна зв'язати з температурою шліфування, якщо в рівняння зв'язку ввійде питома робота  $A_{num}$ . Для встановлення зв'язку  $Q'_w$  і температури шліфування розглянемо рівняння (4) при  $A_{num} = 50$  Дж/мм<sup>3</sup>. Нижче наведено розрахунки виконані для фіксованих значень змінних  $\Psi = 0,8$ ;  $A_{num} = 50$  Дж/мм<sup>3</sup>;  $\alpha = 20^\circ$  (або  $\frac{20\pi}{180}$  рад); теплофізичні параметри сталі 20X2H4A  $a = 5,68276 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 24$  Вт/(м·°С);  $D = 400$  мм. При цьому параметри зубчастого колеса:  $z = 40$ ;  $m = 3,75$ ;  $d_\delta = 150$  мм;  $d_a = 153,75$  мм;  $d_b = 140,954$  мм;  $d_f = 139$  мм; коефіцієнт зсуву вихідного контуру  $x = -0,3$ ;  $\alpha = 20^\circ$ ;  $\beta = 0$ ; ширина вінця  $B = 24$  мм. Характеристика шліфувального круга: 400x32x127; 54A80F15VPMF604H (фірма Winterthur).

Змінними параметрами будуть наступні (рис.1):  $V_f$  в інтервалі від 500 мм/хв (8,33 мм/с) до 7000 мм/хв (116,7 мм/с);  $Q'_w$  в інтервалі від 0,25 мм<sup>3</sup>/(с·мм) до 8,6 мм<sup>3</sup>/(с·мм).

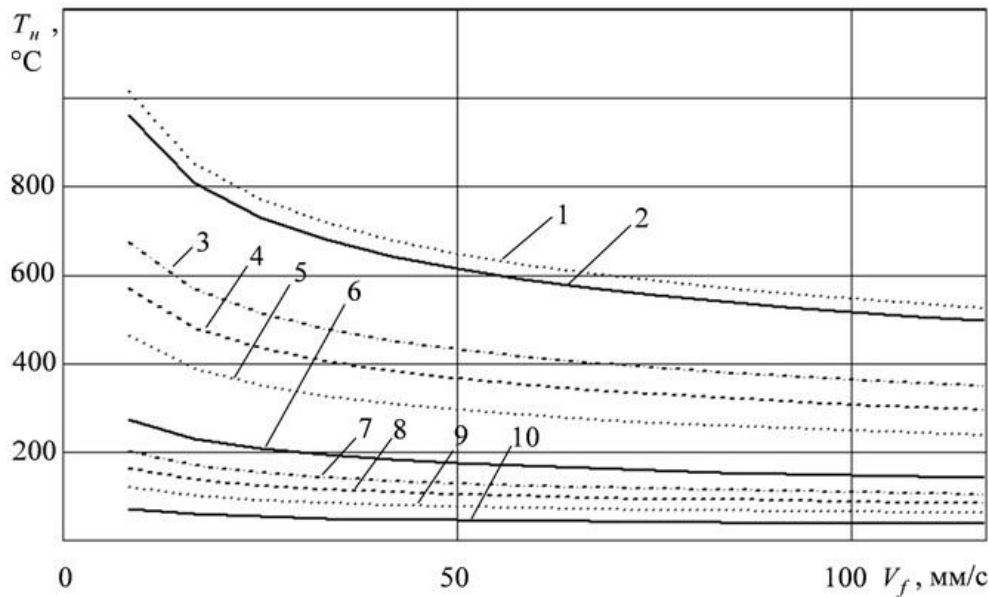


Рис.1. Залежності  $T_H(V_f, Q'_w)$  при  $A_{num} = 50$  Дж/мм<sup>3</sup> в інтервалі зміни  $Q'_w$  0,25 – 8,6 мм<sup>3</sup>/(с·мм): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 –  $Q'_w = 8,6; 8; 5; 4; 3; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25$  мм<sup>3</sup>/(с·мм)

Щоб встановити вплив  $A_{num}$  на температуру шліфування, побудовано аналогічні залежності при  $A_{num} = 25$  Дж/мм<sup>3</sup> (рис. 2).

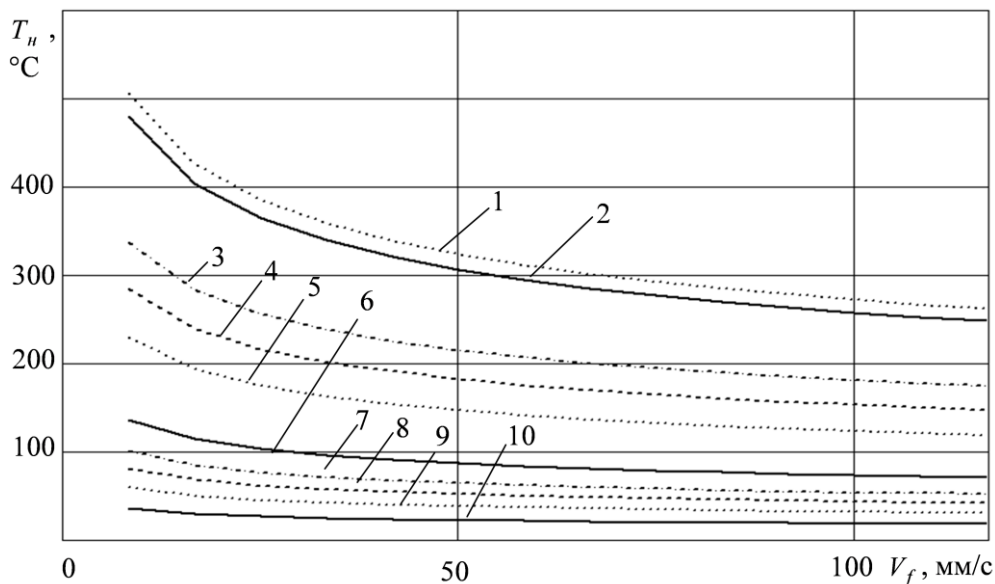


Рис.2. Залежності  $T_H(V_f, Q'_w)$  в інтервалі зміни  $Q'_w$  0,25 – 8,6 мм<sup>3</sup>/(с·мм) і  $A_{num} = 25$  Дж/мм<sup>3</sup>: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 –  $Q'_w = 8,6; 8; 5; 4; 3; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25$  мм<sup>3</sup>/(с·мм)

З рис.1 і 2 видно, що зменшення  $A_{num}$  у два рази від 50 Дж/мм<sup>3</sup> до 25 Дж/мм<sup>3</sup> призводить до прямопропорційної зміни температури  $T_H(V_f, Q'_w)$ . Розділивши вісь ординат на величину  $A_{num}$  одержимо відносну температуру  $\frac{T_H}{A_{num}}$ , що відповідає одиниці питомої роботи шліфування

(рис.3). Тобто для одержання абсолютної температури шліфування відповідне значення по осі ординат необхідно помножити на величину  $A_{num}$ . Отримане при цьому значення температури буде в градусах Цельсія.

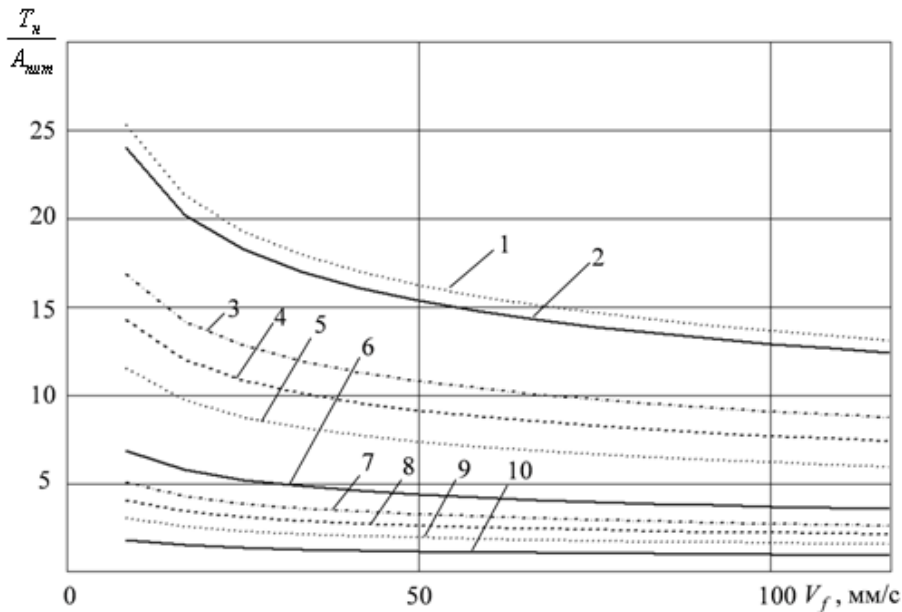


Рис.3. Залежності  $\frac{T_H}{A_{num}}$  в інтервалі зміни  $Q'_w$  0,25 – 8,6 мм<sup>3</sup>/(с·мм): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 –  $Q'_w = 8,6; 8; 5; 4; 3; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25$  мм<sup>3</sup>/(с·мм)

Вибір режимів зубошліфування на чорновий, напівчистовий і чистовий етапи виконують за наступною методикою. Попередньо встановлено величину питомої роботи  $A_{num} = 50$  Дж/мм<sup>3</sup>.

1. Задають показник  $Q'_w$  залежно від етапу шліфування відповідно до табл. 1.

Таблиця 1.

Параметр  $Q'_w$  по етапах

Етап	чорновий	напівчистовий	чистовий
$Q'_w$ , мм <sup>3</sup> /(с·мм)	8,6...5	5...1	1...0,25

Наприклад, для першого етапу шліфування задають, наприклад,  $Q'_w = 8,6$  мм<sup>3</sup>/(с·мм).

2. Обирають максимально можливу осьову подачу  $V_f$ . Наприклад, для першого етапу  $V_f = 116,667$  мм/с (7000 мм/хв).

3. За номограмою рис.3 визначають відносну температуру, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування. У цьому випадку відносна температура становить  $\frac{T_H}{A_{num}} = 10,478$ .

Абсолютну температуру шліфування одержують добутком відносної температури 10,478 на питому роботу  $A_{num} = 50$  Дж/мм<sup>3</sup>. У цьому випадку температура шліфування  $T_H = 10,478 \cdot 50 = 524$  °С. Таким чином,  $T_H(V_f, Q'_w) = T_H(7000 \text{ мм/хв.}, 8,6 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})) = 524$  °С.

4. Порівнюють отриману температуру  $T_H$  із критичним рівнем температури припікоутворення  $T_{KP}$ . Наприклад, порівнюють із  $T_{KP} = 550$  °С. Тому що  $524$  °С <  $550$  °С, знайдене значення осрової подачі фіксують. У цьому випадку  $V_f = 7000$  мм/хв. Якщо  $T_H > T_{KP}$ , то значення параметра  $Q'_w$  зменшують.

5. Для заданого значення показника  $Q'_w = 8,6 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$  і фіксованого значення осьової подачі  $V_f = 116,667 \text{ мм/с}$  (7000 мм/хв) за формулою  $t_v = Q'_w / V_f$  знаходять  $t_v$ . Тобто

$$t_v = \frac{Q'_w}{V_f}.$$

$$\text{У цьому випадку } t_v = \frac{8,6}{116,667} = 0,07371 \text{ мм.}$$

Тому що припуск на обробку обчислюють у нормальному напрямку до оброблюваної поверхні (сума подач на сторону), при визначенні числа ходів необхідно визначити нормальну глибину шліфування (подачу на сторону). Можна використовувати наступну спрощену залежність між цими глибинами різання

$$t_n = t_v \sin \alpha, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – кут профілю в радіанах.

У цьому випадку при  $\alpha = 20^\circ$  нормальна глибина шліфування  $t_n = 0,02521 \text{ мм}$ .

Таким чином, режими на чорновий етап шліфування наступні:  $t_n = 0,02521 \text{ мм}$ ;  $t_v = 0,07371 \text{ мм}$ ;  $V_f = 7000 \text{ мм/хв}$ .

Наприклад, загальний припуск за нормальним вирахуванням є 0,77 мм і видаляється послідовно на трьох етапах шліфування: на першому етапі  $z_1 = 0,5 \text{ мм}$ ; на другому етапі  $z_2 = 0,25 \text{ мм}$ ; на третьому етапі  $z_3 = 0,02 \text{ мм}$ .

6. Визначають число робочих ходів на перший етап зубошліфування

$$i_1 = \frac{z_1}{t_{n1}}.$$

$$\text{У цьому випадку } i_1 = \frac{0,5}{0,02521} = 19,832 \text{ мм.}$$

Округляють знайдене число ходів до найближчого цілого. У цьому випадку  $i_1 = 19$ . Перераховують нормальну глибину різання  $t_n = 0,026 \text{ мм}$ . Перераховують температуру шліфування з урахуванням скоректованого значення вертикальної глибини  $t_v = 0,077 \text{ мм}$ . Температура шліфування  $T_H$  за формулою (3) становить 541 °С.

Визначають обсяг матеріалу, що видаляється, на одиницю активної ширини шліфувального  $V'_w$  круга за формулою

$$V'_w = B t_v. \quad (6)$$

Наприклад, для першого етапу  $V'_w = 24 \cdot 0,077 = 1,847 \text{ мм}^3/\text{мм}$ .

Формують вихідні дані для ЧПК верстата (табл.2) із вказівкою розрахункової температури шліфування.

Таблиця 2.

Режими зубошліфування на 1 етап (чорновий)

№	Подача на сторону ( $t_n$ ), мм	Радіальна подача ( $t_v$ ), мм	Осьова подача ( $V_f$ ), мм/хв	$Q'_w$ , мм <sup>3</sup> /(\text{с}\cdot\text{мм})	$V'_w$ , мм <sup>3</sup> /мм	$T_H$ , °С
1	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541
2	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541
3	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541
...	...	...	...	...	...	...
19	0,026	0,077	7000	8,977	1,847	541

Аналогічно обирають режими зубошліфування на другий етап для видалення припуску  $z_2 = 0,25 \text{ мм}$ .

Наприклад, для другого етапу шліфування задаємо  $Q'_w = 5 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$ .

Вибирають максимально можливу осьову подачу  $V_f$ . Наприклад, для другого етапу  $V_f = 116,667 \text{ мм/с}$  ( $7000 \text{ мм/хв}$ ).

За номограмою рис.3 визначають відносну температуру, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування. У цьому випадку відносна температура становить  $\frac{T_H}{A_{num}} = 6,97655$ . Абсолютну температуру шліфування одержують добутком відносної температури  $6,97655$  на питому роботу  $A_{num} = 50 \text{ Дж/мм}^3$ . У цьому випадку температура шліфування  $T_H = 6,97655 \cdot 50 = 349 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким чином,  $T_H(V_f, Q'_w) = T_H(7000 \text{ мм/хв}; 5 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})) = 349 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Порівнюють отриману температуру  $T_H$  із критичним рівнем температури припікоутворення  $T_{KP}$ . Наприклад, порівнюють із  $T_{KP} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тому що  $349 \text{ }^\circ\text{C} < 550 \text{ }^\circ\text{C}$ , знайдене значення осьової подачі фіксують. У цьому випадку  $V_f = 7000 \text{ мм/хв}$ .

Для заданого значення показника  $Q'_w = 5 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$  і фіксованого значення осьової подачі  $V_f = 7000 \text{ мм/хв}$  знаходять  $t_v$ .

$$\text{У цьому випадку } t_v = \frac{5}{116,667} = 0,04286 \text{ мм.}$$

Нормальна глибина шліфування (подачу на сторону)  $t_n = 0,01466 \text{ мм}$ . Таким чином, режими на напівчистовий етап шліфування наступні:  $t_n = 0,01466 \text{ мм}$ ;  $t_v = 0,04286 \text{ мм}$ ;  $V_f = 7000 \text{ мм/хв}$ .

Визначають число робочих ходів на другий етап зубошліфування

$$i_2 = \frac{z_2}{t_{n2}}$$

$$\text{У цьому випадку } i_2 = \frac{0,25}{0,015} = 17,056.$$

Округляють знайдене число ходів до найближчого цілого. У цьому випадку  $i_2 = 17$ . Перераховують нормальну глибину різання  $t_n = 0,015 \text{ мм}$ .

Перераховують температуру шліфування з урахуванням скоректованого значення вертикальної глибини  $t_v = 0,043 \text{ мм}$ . Температура шліфування  $T_H$  за формулою (3) становить  $350^\circ\text{C}$ .

Для другого етапу  $V'_w = 24 \cdot 0,043 = 1,032 \text{ мм}^3/\text{мм}$ .

Формують вихідні дані для ЧПК верстата (табл.3) із вказівкою розрахункової температури шліфування.

Таблиця 3.

### Режими зубошліфування на 2 етап (напівчистовий)

№	Подача на сторону ( $t_n$ ), мм	Радіальна подача ( $t_v$ ), мм	Осьова подача ( $V_f$ ), мм/хв	$Q'_w$ , мм <sup>3</sup> /(\text{с}\cdot\text{мм})	$V'_w$ , мм <sup>3</sup> /мм	$T_H$ , °C
1	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350
2	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350
3	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350
...	...	...	...	...	...	...
17	0,015	0,043	7000	5,016	1,032	350

Аналогічно обирають режими зубошліфування на третій етап для видалення припуску  $z_1 = 0,02 \text{ мм}$ .

Наприклад, для третього етапу шліфування задають,  $Q'_w = 0,5 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{мм})$ .

Вибирають осьову подачу  $V_f$ . Наприклад, для третього етапу осьова подача  $V_f = 41,667$  мм/с (2500 мм/хв).

Визначають відносну температуру, що відповідає одиниці питомої роботи шліфування. У цьому випадку відносна температура становить  $\frac{T_H}{A_{num}} = 1,60484$ . Абсолютну температуру шліфування одержують добутком відносної температури 1,60484 на питому роботу  $A_{num} = 50$  Дж/мм<sup>3</sup>. У цьому випадку температура шліфування  $T_H = 1,60484 \cdot 50 = 80,242$ . Таким чином,  $T_H(V_f, Q'_w) = T_H(2500 \text{ мм/хв}; 0,5 \text{ мм}^3/(\text{с} \cdot \text{мм})) = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Порівнюють отриману температуру  $T_H$  із критичним рівнем температури припікоутворення  $T_{KP}$ . Наприклад, порівнюють із  $T_{KP} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тому що  $80 \text{ }^\circ\text{C} < 550 \text{ }^\circ\text{C}$ , знайдене значення осьової подачі фіксують. У цьому випадку  $V_f = 2500$  мм/хв.

Для заданого значення показника  $Q'_w = 0,5 \text{ мм}^3/(\text{с} \cdot \text{мм})$  і фіксованого значення осьової подачі  $V_f = 2500$  мм/хв знаходять  $t_v$ .

$$\text{У цьому випадку } t_v = \frac{0,5}{41,667} = 0,012 \text{ мм.}$$

Нормальна глибина шліфування (подачу на сторону)  $t_n = 0,0041$  мм. Таким чином, режими на чистовий етап шліфування наступні:  $t_n = 0,0041$  мм;  $t_v = 0,012$  мм;  $V_f = 2500$  мм/хв.

Визначають число робочих ходів на третій етап зубошліфування

$$i_3 = \frac{z_3}{t_{n3}}$$

$$\text{У цьому випадку } i_3 = \frac{0,02}{0,0041} = 4,873.$$

Округляють знайдене число ходів до найближчого цілого. У цьому випадку  $i_3 = 4$ . Перераховують нормальну глибину різання  $t_n = 0,005$  мм. При цьому вертикальна глибина  $t_v = 0,015$  мм.

Перераховують температуру шліфування з урахуванням скоректованого значення вертикальної глибини  $t_v = 0,015$  мм. Температура шліфування  $T_H$  за формулою (3) становить  $93^\circ\text{C}$ .

Для третього етапу  $V'_w = 24 \cdot 0,015 = 0,351 \text{ мм}^3/\text{мм}$ .

Формують вихідні дані для ЧПК верстата (табл.4) із вказівкою розрахункової температури шліфування.

Таблиця 4.

**Режими зубошліфування на 3 етап (чистовий)**

№	Подача на сторону ( $t_n$ ), мм	Радіальна подача ( $t_v$ ), мм	Осьова подача ( $V_f$ ), мм/хв	$Q'_w$ , мм <sup>3</sup> /(\text{с} \cdot \text{мм})	$V'_w$ , мм <sup>3</sup> /мм	$T_H$ , °C
1	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93
2	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93
3	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93
4	0,005	0,015	2500	0,609	0,351	93

У межах чистового етапу для одержання необхідної шорсткості осьову подачу можна зменшувати, тому що це дозволить зменшити шорсткість, якщо вимоги до шорсткості високі. Для високих класів точності зубчастих коліс значення осьової подачі обирають, виходячи із забезпечення необхідного охолодження заготовки по мірі формування її остаточного розміру, щоб

усунути вплив теплових деформацій на точність обробки, у тому числі змінюючи структуру циклу шліфування (пропуск робочого ходу - тільки зустрічне, або тільки попутне, секторне шліфування).

Використовувані при розрахунку показники  $Q'_w$  (рис.4) і  $V'_w$  (рис.5) використовують як параметри стану в технологічній системі діагностики.

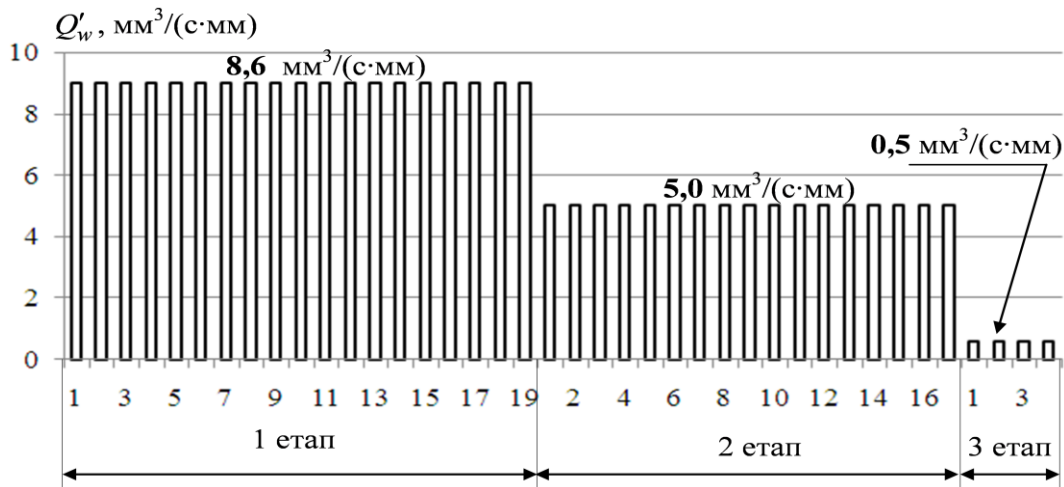


Рис. 4. Зміна параметра  $Q'_w$  за етапами і робочими ходами

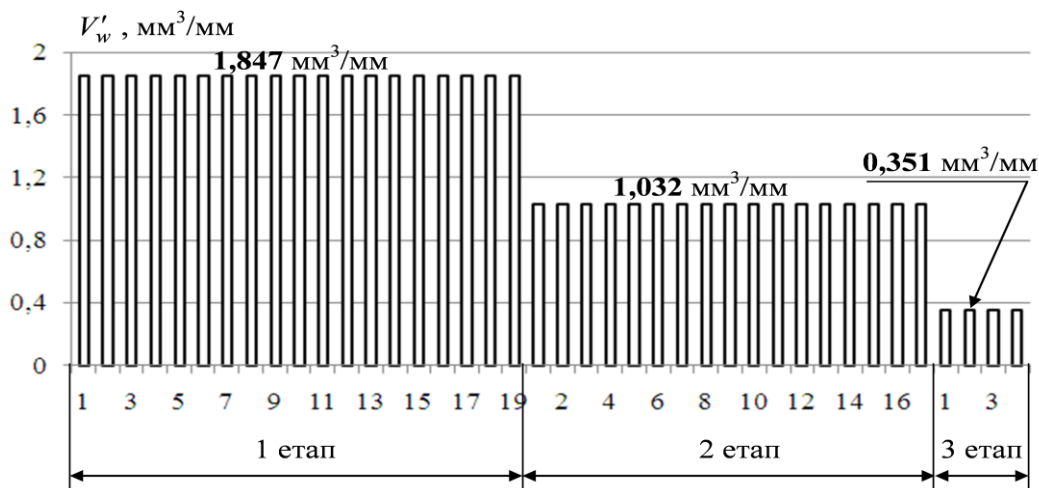


Рис. 5. Зміна параметра  $V'_w$  за етапами і робочими ходами

#### Висновки.

1. Розроблено прикладну методику визначення режимів зубошліфування на верстатах з ЧПК, що працюють за методом копіювання, виходячи з поділу показників  $Q'_w$  і  $V'_w$  за функціональним призначенням: теплонапруженість процесу та ресурс стійкості шліфувального круга, відповідно.

2. Виконано контрольний приклад розрахунку режимних параметрів зубошліфування: подачі на сторону (нормальна глибина шліфування), радіальної подачі (вертикальна глибина шліфування) і осьової подачі (швидкість деталі) (таблиці 1 - 3).

3. Запропоновано використовувати показники  $Q'_w$  і  $V'_w$  не тільки для визначення режимів зубошліфування, але одночасно для технологічної діагностики операції профільного зубошліфування, коли ці показники є параметрами стану технологічної системи.

4. Для визначення режимів шліфування на етапі випробування шліфувальних кругів визначають три технологічних параметри:  $A_{num}$ ,  $Q'_w$ ,  $V'_w$ . Це необхідно враховувати при розробці програми випробувань зубошліфувальних кругів.

**Список використаних джерел**

1. Brecher C. Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Markus Brumm, Florian Hübner // Gear Technology. – September/October 2015. – P.86-90.
2. Türich A. Innovative concepts for grinding wind power energy gears /A. Türich, C. Kobialka, D. Vucetic // Gear technology. – June 2009. – P. 39-44.
3. Gorgels C. Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Gorgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology. – November/December 2006. – P.34-41
4. Лищенко Н.В. / Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 11. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – С. 150-162.
5. Gear grinding processing developed for high-precision gear manufacturing / Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, Technical Review Vol.45 No. 3 (Sep.2008).
6. Лищенко Н.В. Влияние принудительного охлаждения на температуру шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Збірник наукових праць. – Д.: Ліра. – 2015. – С. 48-54.
7. Ларшин В.П. Технология многониточного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов / В.П. Ларшин // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1999. – Вып.2(8) . – С. 87-91.

**Рецензенти:**

1. **Іванова Л.О.**, зав. каф. інженерної графіки і технічного дизайну Одеської національної академії харчових технологій, професор, доктор технічних наук.
2. **Лебедєв В.Г.**, професор каф. технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету, доктор технічних наук.

Стаття надійшла до редакції 23.06.2017.



УДК 623, 629.3+504

**С.П. Мазін, Г.М. Маренко, А.Г. Скиба, В.М. Франков***Національна академія Національної гвардії України***ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ БРОНЕТРАНСПОРТЕРІВ  
НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ**

*Наведено аналіз конструкцій існуючих бронетранспортерів. Надано пропозиції зі створення нових конструкцій вітчизняних бронетранспортерів. Конструкції бронетранспортерів пропонується виконати на базі агрегатів автомобілів вітчизняного виробництва.*

*Ключові слова: бронетранспортер, трансмісія, конструктивна схема, теоретичні дослідження.*

**С.П. Мазин, Г.Н. Маренко, А.Г. Скиба, В.Н. Франков****ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ  
БРОНЕТРАНСПОРТЕРОВ НАЦИОНАЛЬНОЙ ГВАРДИИ УКРАИНЫ**

*Приведен анализ конструкций существующих бронетранспортеров. Даны предложения по созданию новых конструкций отечественных бронетранспортеров. Конструкции бронетранспортеров предлагается создавать на базе агрегатов автомобилей отечественного производства.*

*Ключевые слова: бронетранспортер, трансмиссия, конструктивная схема, теоретические исследования.*

**S.P. Mazin, G.N. Marenko, A.G. Skiba, V.N. Frankov****PROPOSITION CONCERNING THE ARMORED FIGHTING VEHICLE CONSTRUCTION  
IMPROVEMENT OF NATIONAL GUARD OF UKRAINE**

*It has been given the analysis of the existing armored fighting vehicles constructions. It has been given the offers concerning the development of new native armored fighting vehicles. It has been proposed to create the armored fighting vehicles constructions on the basis of native vehicles aggregates.*

*Key words: armored fighting vehicles, transmission, structural scheme, theoretical researches*

**Постановка проблеми.**

На сьогодні багато високорозвинених країн веде виготовлення бронетранспортерів (БТР). Було проаналізовано 111 моделей, з котрих на долю двовісних випадає 57 типів, на долю тривісних – 37 і чотиривісних лише 17 [1]. На озброєнні Національної гвардії України стоять чотиривісні бронетранспортери типу БТР-60 ПБ, БТР-70, БТР-80, БТР-3Е, БТР-4Е, а також двовісні Kozak 2014, БРДМ-2, ДОЗОР-Б, КраЗ Кугуар (KRAZ Cougar). Тривісні бронетранспортери знаходяться в стадії розробки і випробувань (Атаман бхб).

Слід мати на увазі те що, БТР-60 ПБ, БТР-70, БТР-80, а також БРДМ-2 є машинами російського виробництва, їх використання в Національній гвардії України, після виготовлення достатньої кількості бронемашин українського виробництва буде припинено.

Загально відомо, що одними з основних показників броньованої колісної техніки є її собівартість і паливна економічність.

Як відомо [2] на собівартість і паливну економічність суттєво впливає конструкція трансмісії (собівартість залежить від кількості і складності агрегатів трансмісії, а паливна економічність від коефіцієнту корисної дії (ККД) трансмісії).

Аналіз конструкцій трансмісій показав наступне. Самими складними є трансмісії БТР-60ПБ, БТР-70, а більш сучасними БТР-80, БТР-3Е, БТР-4Е.

Слід також відмітити значні витрати пального бронетранспортерами. Так, наприклад, БТР-4Е має нормативну витрату по асфальту 80 л/100 км і по бездоріжжю 150 л/100 км, тоді як автомобілі типу КраЗ витрачають 30-35 л/100 км.

На плавність ходу, як відомо, в основному впливає конструкція підвіски. На всіх перелічених чотиривісних бронетранспортерах використовуються незалежні торсіонні підвіски. Недоліки торсіонних підвісок показані в роботі [3], в котрій також доведено що бойова колісна машина з гідропневматичною системою підресорювання має переваги над серійними зразками з торсіонною системою підресорювання.

Гідропневматична система підресорювання суттєво збільшує середні швидкості руху пересіченою місцевістю та показники плавності ходу.

До загальних принципів переваг БТР-60ПБ, БТР-70, БРДМ-2, слід віднести використання агрегатів від автомобілів таких, що серійно виготовлялися.

Основні проблеми, стосовно українських бронетранспортерів, полягають в тому що вони мають відносно низькі показники паливної економічності і плавності ходу.

Вирішенням проблеми може бути розроблення нових конструкцій бронетранспортерів на базі агрегатів автомобілів, що серійно виготовляються в Україні, а також використання в нових конструкціях сучасних технічних рішень в компоновках трансмісій і підвісок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш повно конструкції броньованих колісних машин представлено в [ 1, 4, 5 ].

Зв'язок паливної економічності автомобіля і ККД трансмісії приведено в формулі, котра визначає шляхову витрату пального [ 2 ]:

$$Q = \frac{10^{-5} \cdot q_{eP} \cdot k_H \cdot k_E \cdot (P_\psi + P_B)}{\rho \cdot V_a \cdot \eta_T}, \text{ л/100км} \quad (1)$$

де:  $q_{eP}$  – питома витрата пального при максимальній потужності двигуна, г/кВт · год;  $k_H$  – коефіцієнт, що залежить від ступеню використання потужності двигуна;  $k_E$  – коефіцієнт, що залежить від ступеню використання частоти обертання колінчастого валу двигуна;  $P_\psi$  – потужність, що витрачається на подолання опору дороги кВт;  $P_B$  – потужність, що витрачається на подолання опору повітря, кВт;  $\rho$  – щільність пального, кг/м<sup>3</sup>;

$V_a$  – швидкість автомобіля км/год;  $\eta_T$  – ККД трансмісії.

З аналізу наведеної формули витікає висновок, що шляхова витрата пального є обернено пропорційною ККД трансмісії, тобто при збільшенні ККД трансмісії, наприклад, на 10%, витрата пального зменшиться, відповідно на 10%.

Аналіз значень ККД трансмісій автомобільної техніки показав про наявність їх досить широкого діапазону. Так в джерелі [2] пропонується, що ККД механічної трансмісії можна вважати рівним 0,8...0,92 (менші значення відносяться до багатопривідних вантажних автомобілів, більші відносяться до легкових).

В джерелі [5] відмічено, що в складній силовій передачі багато привідних вантажних автомобілів ККД трансмісії інколи складає дуже низьку величину порядку 0,5 і навіть 0,45, тобто 50% і більше енергії двигуна йде на внутрішні втрати енергії в автомобілі.

Вважаючи на те, що бронетранспортери БТР-60ПБ, БТР-70, БТР-80, БТР-3Е, БТР-4Е, є багатопривідними машинами, дослідження їх ККД трансмісій представляє певний науковий інтерес.

Відомо що ККД трансмісії [2, 6] характеризує втрати потужності при передачі її механізмами трансмісії і дорівнює добутку її механізмів.

Для проектних розрахунків рекомендуються наступні значення ККД окремих механізмів: коробки передач –  $\eta_{кп} = 0,96...0,98$ ; роздавальної коробки –  $\eta_{рк} = 0,96...0,98$ ; колісного редуктора –  $\eta_{кр} = 0,96...0,98$ ; карданного шарніру –  $\eta_{кш} = 0,96...0,98$ ; головної передачі –  $\eta_{гп} = 0,93...0,97$ . ККД коробки передач під час роботи на прямій передачі [7], тобто ККД від гідравлічних втрат –  $\eta_{гв} = 0,98...0,99$ ; ККД гідромеханічної передачі [5] –  $\eta_{гмп} = 0,8...0,85$ .

Певної уваги, на наш погляд, заслуговують передньопривідні вантажні автомобілі [8], а також гібридні автомобілі [9].

Основні переваги передньопривідних вантажних автомобілів є такі: покращена керованість; більш високий ККД трансмісії за рахунок використання циліндричної головної передачі, замість конічної гіпоїдної, а також незначна висота вантажної платформи що, в свою чергу, підвищує показники стійкості і поліпшує умови завантаження.

Основні переваги гібридних автомобілів є такі: економія пального в умовах міста до 35 %; в умовах міст автомобіль до 40 % часу працює без шкідливих викидів, тобто на електроприводі; суттєве зниження потужності ДВЗ; збільшення максимальної швидкості, здатність до швидкого розгону; здатність накопичувати енергію, що виникає під час гальмування; двигун працює в оптимальному режимі; повна зупинка роботи ДВЗ на перехрестях доріг та в автомобільних пробках, можливість руху тільки на електроприводі.

Використання гібридних автомобілів типу «Тойота Приус» поліцією підтверджує доцільність використання гібридної трансмісії.

Виходячи з того, що існуючі бронетранспортери мають занадто низький ККД трансмісії і відповідно низькі показники паливної економічності, що не відповідає вимогам сучасності, **метою статті** є проведення аналізу конструкцій трансмісій бронетранспортерів, а також передньопривідних вантажних автомобілів з точки зору їх ККД, і запропонування нових

конструкцій бронетранспортерів на базі агрегатів автомобілів, що серійно виготовляються в Україні.

**Виклад основного матеріалу.** До аналізу приймаємо трансмісії БТР-80, БТР-4Е та КраЗ-5233 ВЕ, а також трансмісії гібридних автомобілів.

### 1. Аналіз ККД трансмісій бронетранспортерів і передньопривідних вантажних автомобілів

ККД трансмісії БТР-80, при русі по асфальтованій дорозі, визначаємо з формули

$$\eta_{\text{БТР-80 а}} = \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{РК}} \cdot \eta_{\text{ГП}} \cdot \eta_{\text{КР}} \cdot (\eta_{\text{КШ}})^{14}; \quad (2)$$

$$\eta_{\text{БТР-80 а}} = 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96^{14} = 0,48. \quad (3)$$

ККД трансмісії БТР-80, при русі по бездоріжжю, визначаємо з формули

$$\eta_{\text{БТР-80 б}} = \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{РК}} \cdot \eta_{\text{ГП}} \cdot \eta_{\text{КР}} \cdot (\eta_{\text{КШ}})^{26}; \quad (4)$$

$$\eta_{\text{БТР-80 б}} = 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96^{26} = 0,346. \quad (5)$$

Принципово конструкція трансмісії БТР-4Е відрізняється від трансмісії БТР-80 наявністю гідромеханічної передачі ККД котрої дорівнює 0,8...0,85. Тому ККД трансмісії БТР-4Е, при русі по асфальтованій дорозі, визначаємо з формули

$$\eta_{\text{БТР-4Е а}} = \eta_{\text{БТР-80 а}} \cdot \eta_{\text{ГМП}} = 0,48 \cdot 0,8 = 0,384. \quad (6)$$

ККД трансмісії БТР-4Е, при русі по бездоріжжю, визначаємо з формули

$$\eta_{\text{БТР-4Е б}} = \eta_{\text{БТР-80 б}} \cdot \eta_{\text{ГМП}} = 0,346 \cdot 0,8 = 0,277. \quad (7)$$

ККД трансмісії КраЗ-5233, при русі по асфальтованій дорозі визначаємо з формули

$$\eta_{\text{КраЗ-5233}} = \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{РК}} \cdot \eta_{\text{ГП}} \cdot (\eta_{\text{КШ}})^6; \quad (8)$$

$$\eta_{\text{КраЗ-5233}} = 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,93 \cdot 0,96^6 = 0,67. \quad (9)$$

ККД трансмісії КраЗ-5233, при русі по бездоріжжю, визначаємо з формули

$$\eta_{\text{КраЗ-5233 б}} = \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{РК}} \cdot (\eta_{\text{ГП}})^2 \cdot (\eta_{\text{КШ}})^6; \quad (10)$$

$$\eta_{\text{КраЗ-5233 б}} = 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,93^2 \cdot 0,96^6 = 0,623. \quad (11)$$

ККД трансмісії передньопривідного вантажного автомобіля визначаємо з формули

$$\eta_{\text{ППА}} = \eta_{\text{КП}} \cdot \eta_{\text{ГП}} \cdot (\eta_{\text{КШ}})^4; \quad (12)$$

$$\eta_{\text{ППА}} = 0,96 \cdot 0,96 \cdot 0,96^4 = 0,782. \quad (13)$$

Як виходить з розрахунків ККД передньопривідного вантажного автомобіля суттєво більший ніж ККД трансмісії БТР-4Е і автомобілів сімейства КраЗ.

Виходячи з вище викладеного, вважаємо за доцільне для перспективних бронетранспортерів і військових автомобілів прийняти схему трансмісії, котра базується на використанні постійного механічного приводу на передні керуємі колеса, а також електричного на задні ведучи мости.

В якості базової компоновальної схеми пропонується така, що приведена на рис. 1 [10]. Конструкція такої трансмісії передбачає передній привід, двигун котрого також передає обертовий момент на електричний генератор, а електричний двигун постійного струму окремо передає обертовий момент на задні колеса. Потужність електричного двигуна заднього мосту бронетранспортера визначаємо за умов їзди по мокрому ґрунту в режимі 100% пробуксовки, а також для їзди по дорозі з максимальним кутом нахилу.

**Сила тяги на ведучих колесах заднього мосту по зчепленню з дорогою визначається з формули**

$$P_{\text{ЗМ}} = \Phi_{\text{МГД}} \cdot G_{\text{ЗМ}} \cdot g = 0,4 \cdot 9700 \cdot 9,81 = 38063 \text{ Н}, \quad (14)$$

де  $\varphi_{МГД}$  – коефіцієнт зчеплення шини з мокрою ґрунтовою дорогою;

$P_{ЗМ}$  – сила тяги на ведучих колесах заднього мосту по зчепленню з дорогою у стані мокрого ґрунту, Н;

$G_{ЗМ}$  – сила ваги бронетранспортера, котра діє на задній міст ( величина прийнята з технічної характеристики КрА3-5233 ВЕ), Н

$g$  – прискорення вільного падіння - 9,81 м/с<sup>2</sup>;

Потужність електродвигуна, яка необхідна для руху в режимі повнопривідного бронетранспортера, визначається з формули

$$N_{ЕД} = V_{ПБ} \cdot P_{ЗМ} / \eta_{ТР} = 1,38 \cdot 38063 / 0,782 = 67170 \text{ Вт}, \quad (15)$$

де:  $V_{ПБ}$  – швидкість бронетранспортера прийнята для руху по бездоріжжю ( в нашому випадку  $V_{ПБ} = 5 \text{ км/г} = 1,38 \text{ м/с}$  );

$\eta_{тр}$  – ККД трансмісії.

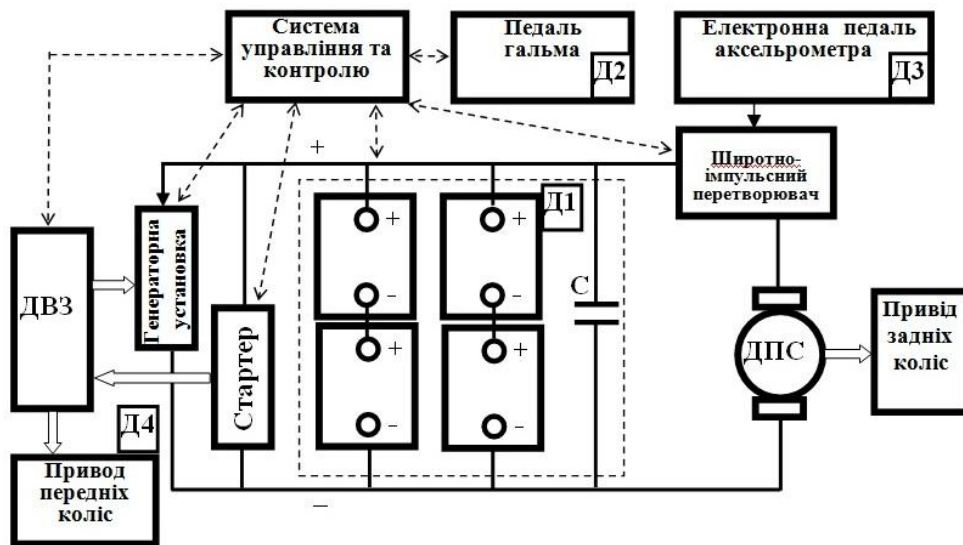


Рис.1. Базова компоновальна схема трансмісії:

Д1-датчик стану АКБ; Д2- датчик педалі гальма;Д3- датчик положення педалі аксельметра; Д4- датчик швидкості автомобіля; ДВЗ- двигун внутрішнього згоряння; ДПС-двигун постійного струму

Таким чином, для руху по мокрому ґрунту в режимі 100% пробуксовки потужність електродвигуна повина дорівнювати 67,17 кВт.

Сила тяги на ведучих колесах заднього мосту при русі по дорозі з максимальним кутом нахилу визначається з формули

$$P_{\alpha} = \varphi_{МГД} \cdot G_{ЗМ} \cdot \cos \alpha = 0,4 \cdot 9700 \cdot 9,81 \cdot 0,866 = 32962 \text{ Н}, \quad (16)$$

де:  $P_{\alpha}$  – сила тяги на ведучих колесах заднього мосту при русі по дорозі з максимальним кутом нахилу, Н;

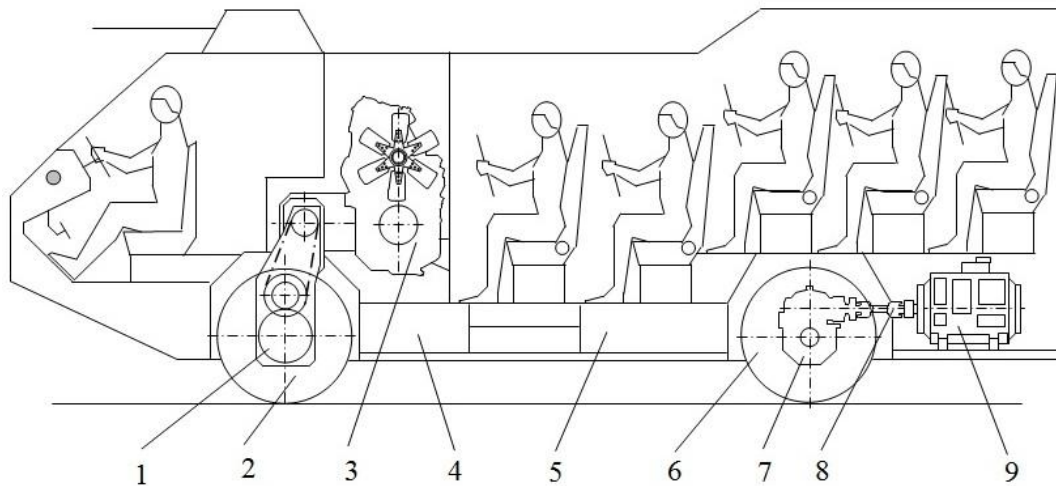
$\alpha$  - максимальний кут нахилу дороги – 30°.

Потужність електродвигуна, яка необхідна для руху по дорозі з максимальним кутом нахилу визначається з формули

$$N_{ЕД\alpha} = V_{ПБ} \cdot P_{\alpha} \cdot \cos \alpha / \eta_{ТР} = 1,38 \cdot 32962 \cdot 0,866 / 0,782 = 50373 \text{ Вт}. \quad (17)$$

Таким чином розрахункова потужність електродвигуна бронетранспортера складає 67,17 кВт.

На рис. 2 приведено конструктивну схему бронетранспортера, особливістю котрої є основний механічний привід на передні колеса, а привід на задні є електричним.



**Рис. 2. Конструктивна схема бронетранспортера: 1- редуктор переднього ведучого моста; 2 - переднє колесо; 3 - силова установка; 4,5 - блоки акумуляторних батарей; 6 - заднє колесо; 7 - редуктор заднього ведучого моста; 8 - карданний вал; 9**

На відміну від звичайних бронемашин, рух з місця і до швидкості приблизно 5-10 км / год, як правило, відбувається завдяки електроприводу, що суттєво зменшує витрати пального і, як слідство, кількість шкідливих викидів до атмосфери.

### Висновки

Бронетранспортер виконаний за конструктивною схемою, що пропонується, може забезпечити економію пального в порівнянні з КрАЗ-5233 ВЕ близько 16 %, а з БТР 4Е відповідно 40 %. Окрім цього бронетранспортер буде мати переваги гібридного автомобіля.

### Список використаних джерел

1. Никольський М.В. Иллюстрированный справочник. Колёсная бронетехника. – М.; ООО «Издательство АСТ», 2001. – 512 с.
2. А.И. Гришкевич Автомобили: теория: Учебник для ВУЗов. – Мн.: Выс. шк., 1986. – 208 с.: ил.
3. В. П. Пісарев, А. П. Горбунов. Визначення впливу конструкції і характеристик пружних елементів підвіски на властивості бойової колісної машини. Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. /редкол.: О. О. Морозов та ін. – Х.: Акад. внутрішніх військ МВС України, 2009. – Вип. 2 (14). – 104 с.: іл. С. 36 – 39.
4. Боевые колёсные машины. Под редакцией Голощапова И.М. – М.; Воениздат, 1974. – 384 с.
5. Антонов А.С. і ін. Армейские автомобили. Конструкция и расчет. Ордена Трудового Красного Знамени военное издательство Министерства обороны СССР. М., 1970. – 542 с.
6. Расчет и проектирование деталей машин, ч. 1. Киркач Н.Ф., Баласаян Р.А.. – 2-е изд., перераб. и доп. – Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 136 с.
7. Б.В. Гольд. Конструирование и расчет автомобиля. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.–1962.
8. С.П. Мазін, А.І. Каргаєв, О.В. Пархомчук. Перспективи створення передньопривідного вантажного автомобіля і методика його комп'ютерного графічного зображення. Збірник наукових праць. – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2006. – № 1-2. – С. 32 – 37.
9. С.П. Мазін, В.М. Франков, О.В. Пархомчук. Дослідження напрямків удосконалення силових установок і трансмісій та пропозиції щодо нової конструкції автомобіля з гібридною силовою установкою для спец підрозділів ВВ МВС України. Зб. наук. праць Академії внутрішніх військ МВС України /редкол.: О.О.Морозов та ін. – Х. : Акад. ВВ МВС України, 2009. – Вип. 2 ( 14 ). – 104 с.
10. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. Гібридні автомобілі. – Харків, ХНАДУ, 2008. – 327 с.

### Рецензенти:

**М.А. Подригало**, завідувач кафедрою технології машинобудування та ремонту машин ХНАДУ доктор технічних наук, професор;

**А.П. Горбунов**, Заступник начальника навчально-методичного центру НАНГУ - начальник навчального відділу, кандидат технічних наук, доцент полковник.

Стаття надійшла до редакції 08.06.2017

УДК 621. 822:681.2:369.64

**В.І. Марчук, І.В. Марчук***Луцький національний технічний університет***ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ**

*В роботі встановлено, що сумарна похибка оброблення на викінчувальних шліфувальних операціях має комплексний характер, основними складовими якої є: - власна похибка приладів активного контролю, які входять в систему автоматичного розмірного управління; - похибки, викликані температурними деформаціями на всіх етапах формування розмірних параметрів; - похибки, викликані динамічними процесами системи автоматичного управління розмірними параметрами. Підвищити точність розмірних параметрів деталей підшипників качення можна на основі оптимальної побудови технологічного процесу шліфування на викінчувальних операціях оброблення.*

**Ключові слова:** поверхня, похибка, шліфування.

**В.И. Марчук, И.В. Марчук****ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ШЛИФОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ**

*В работе установлено, что суммарная погрешность обрабатывания на финишных шлифовочных операциях имеет комплексный характер, основными составляющими которой являются: - собственная погрешность приборов активного контроля, которые входят в систему автоматического размерного управления; - погрешности, вызванные температурными деформациями на всех этапах формирования размерных параметров; - погрешности, вызванные динамическими процессами системы автоматического управления размерными параметрами. Повысить точность размерных параметров деталей подшипников качения можно на основе оптимального построения технологического процесса шлифования на финишных операциях обрабатывания.*

**Ключевые слова:** поверхность, погрешность, шлифование.

**V.I. Marchuk, I.V. Marchuk****PROVIDING THE ACCURACY OF FORMAL FORMATION IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS SANDING OF SURFACE SURFACES**

*In the work it is established that the total error of processing at the final grinding operations has a complex character, the main components of which are: - the intrinsic inaccuracy of the active control devices that enter the automatic size control system; - Errors caused by temperature deformations at all stages of formation of dimensional parameters; - errors caused by dynamic processes in the system of automatic control of dimensional parameters. Increase the accuracy of the dimensional parameters of the components of rolling bearings can be based on the optimal construction of the technological process of grinding at the finishing operations of processing.*

**Key words:** surface, error, grinding.

Визначення параметрів технологічного процесу, які необхідно контролювати з метою ефективного управління цим процесом є складною задачею, що залежить від вимог як до точності, так і від характеру взаємозв'язків між параметрами процесу шліфування [1] та показниками якості оброблених деталей. Тому вибір алгоритму управління і структурної схеми управління точністю оброблення у загальному випадку виконується у наступній послідовності [2].

1. Встановлення причин і діапазону розсіювання розмірних параметрів та умов оброблення.

2. Розроблення математичної моделі процесу шліфування і процесу формування похибки оброблення [3].

3. Аналітичне дослідження процесу шліфування. Визначення параметрів управління. Формування вимог до структури циклу, характеру перебігу процесу, до структурної схеми та точності системи управління процесом.

4. Експериментальне дослідження процесу шліфування з метою комплексного вивчення зв'язків між параметрами технологічної системи та показниками якості оброблення.

5. Розроблення алгоритму управління процесом і системи управляючого контролю для його реалізації.

**Складові похибки оброблення.** Аналізуючи процес формування похибок оброблення, можна виділити наступні основні складові сумарної похибки  $\Delta_{\Sigma}$  оброблення однієї деталі:

похибка  $\Delta_{\Pi}$  системи активного контролю, яка визначається як різниця між дійсним розміром деталі в момент подачі команди і заданим розміром;

похибка  $\Delta_\theta$ , зумовлена температурними деформаціями оброблюваної деталі;  
похибка  $\Delta_c$ , зумовлена часом  $t_c$  запізнення виконавчої команди на відвід шліфувального круга,

$$\Delta_c = \int_0^{t_c} v_s(t) dt, \quad (1)$$

де  $v_s$  – швидкість зняття припуску.

Для оцінки впливу швидкості  $v_D$  зміни контрольованого розміру на похибку оброблення доцільно виділити із похибки  $\Delta_{II}$  складову  $\Delta_{II}$ , зумовлену часом  $t_{II}$  запізнення системи активного контролю, або, іншими словами, час запізнення зміни вимірювального сигналу відносно зміни контрольованого розміру:

$$\Delta_{t_{II}} = \int_0^t [v_D(t) - \frac{1}{i_g} v_{вим}(t)] dt \quad (2)$$

де  $v_{вим}$  – швидкість зміни вимірювального сигналу;

$i_g$  – чутливість вимірювальної системи.

Для аналітичного визначення похибок  $\Delta_{II}$  і  $\Delta_c$  необхідно знати закономірності зміни швидкості  $v_s$  зняття припуску у функції часу оброблення і поточного значення припуску  $\Delta D$ . Не враховуючи вплив швидкості зміни температурних деформацій деталі, можна прийняти, що  $v_s = v_D$ .

Аналітичне дослідження похибки  $\Delta_{II}$  пов'язане з певними труднощами. Крім цього, ця похибка практично не залежить від вибраного алгоритму управління процесом шліфування. Тому в теоретичних дослідженнях точності оброблення похибка  $\Delta_{II}$  приймається однаковою для всіх процесів.

Для зовнішнього шліфування тонкостінних кілець в похибку  $\Delta_\Sigma$  входить ще одна складова  $\Delta_F$ , зумовлена силовими деформаціями деталі.

Числове значення  $\Delta_F$  з незначними відхиленнями визначається рівнянням:

$$\Delta_F(t) = F_y(t) \frac{R_{ск}^3}{4EJ} \left( \frac{4}{\pi} - \phi \sin \phi - \cos \phi \right) \quad (3)$$

де  $F_y(t)$  – моментне значення радіальної сили різання;

$R_{ск}$  – середній радіус кільця;

$\phi$  – кут, утворений лінією вимірювання й лінією дії радіальної сили різання.

Математична модель процесу виникнення похибок оброблення в технологічних системах. Виходячи з теоретичних основ автоматичного управління процес різання шліфуванням можна розглядати як інерційну ланку [4]. Тут припускається, що інерційність пружної системи шліфувального верстату на декілька порядків менша, ніж інерційність процесу шліфування, коефіцієнт різальних властивостей шліфувального круга  $K_p$  в межах кожного етапу циклу оброблення залишається незмінним і ширина шліфування є також постійною величиною [3]. У цьому випадку закон зміни швидкості зняття припуску описується наступним диференціальним рівнянням:

$$T_p \frac{dv_s}{dt} + v_s = K v_\delta, \quad (4)$$

де  $v_\delta$  – швидкість переміщення шліфувальної бабки (для внутрішнього шліфування – її подвоєне значення);

$K$  – коефіцієнт підсилення, що залежить від відношення швидкостей  $v_s / v_\delta$  у стаціонарному режимі шліфування, тобто для  $t > 3T_p$ .

Для процесу врізного шліфування кілець підшипників лінійним зношуванням круга можна знехтувати і, відповідно, прийняти  $K = 1$ .

Розв'язуючи рівняння (4) з початковими умовами  $t = 0$  і  $v_s = v_{sn}$ , отримаємо:

$$v_s = v_\delta \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) + v_{sn} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (5)$$

Інтегруючи рівняння (5) для початкових умов  $t = 0$  і  $S = S_n$ , знаходимо вираз для поточного припуску, що знімається в процесі шліфування:

$$S = S_n - v_{\delta} t + T_p (v_{\delta} - v_{sn}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right). \quad (6)$$

Отримані рівняння дозволяють проаналізувати характер зміни  $S(t)$  і  $v_s(t)$  на кожному з етапів шліфування [5]. На етапах врізання й виходжування рівняння, що описують закономірності зняття припуску та швидкості його зняття, можуть бути отримані із рівнянь (4) і (5) підстановкою у них відповідно  $v_{sn} = 0$  і  $v_{\delta} = 0$ .

Залежність  $v_s = f(S)$  визначається аналітично лише на етапі виходжування:

$$v_s = v_{sn} - \frac{S_n - S}{T_p}. \quad (7)$$

Для решти етапів шліфування, для яких  $v_{\delta} \neq 0$  і залежність  $v_s = f(S)$  визначається трансцендентним рівнянням типу (5), можна знайти наближене аналітичне рішення рівнянь, які зв'язують  $v_s$  і  $S$ .

Для цього в приведених вище рівняннях замінюється експоненціальний член  $e^{-\frac{t}{T}}$  апроксимуючою функцією виду  $\phi(t) = -at + b$ . Наближення виконується методом найменших квадратів. Найбільш вживаним є таке наближення  $\phi(t)$ , для якого найменше значення має вигляд:

$$M = \int_{t_1}^{t_2} [f(t) - \phi(t)]^2 dt. \quad (8)$$

Для знаходження параметрів  $a$  і  $b$  похідні від  $M$  за кожним із параметрів прирівнюються до нуля:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial a} = \int_{t_1}^{t_2} \left[ -at^2 + bt - te^{-\frac{t}{T}} \right] dt = 0; \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial b} = \int_{t_1}^{t_2} \left( -at + b - e^{-\frac{t}{T}} \right) dt = 0. \quad (10)$$

Рівняння апроксимуючої функції у загальному вигляді записується як  $\phi(t) = -a_1 \frac{t}{T} + (1-b)$ . Числові значення параметрів  $a_1$  і  $b$  визначаються заданими границями інтервалу апроксимації  $t_1$  і  $t_2$ , які встановлюються виходячи з найбільшого й найменшого часу оброблення на досліджуваному етапі шліфування. Зрозуміло, що чим вужчий інтервал апроксимації, тим точніше отримане рівняння описує реальну залежність.

У результаті проведеної апроксимації рівняння зміни  $v_s$  у функції припуску, наприклад, на етапі врізання має вигляд:

$$v_s = \frac{1}{1-a_1} \left( a_1 \frac{S_n - S}{T_p} + b v_{\delta} \right). \quad (11)$$

Наведені рівняння справедливі для незначної похибки форми деталі та задовільно описують закони зміни  $v_s(t)$  і  $S(t)$  на чистових етапах шліфування. Але на початкових етапах шліфування характер зміни швидкості значною мірою залежить від величини й характеру вихідних похибок форми оброблюваної поверхні [4].

Дослідження перехідного процесу різання для внутрішнього безцентрового шліфування деталей показало, що на початковому етапі шліфування процес різання суттєво відрізняється від описаного рівнянням (4). Як приклад, на рис. 1,а показано діаграму запису потужності, що витрачається на шліфування під час оброблення отвору внутрішнього кільця підшипника 7208 зі значними похибками форми, а на рис. 1,б – для попередньо прошліфованого кільця.

Відносну величину похибки форми отвору та похибки його розташування відносно поверхні базування легко оцінити за амплітудою коливань потужності та характеру її зміни в часі. Максимальному значенню потужності на певний момент часу відповідає шліфування виступа на поверхні, а мініимальному значенню – шліфування впадини. Чим більше поточне



значення похибки форми, тим більша амплітуда коливань потужності. Ширина шліфування та приведена жорсткість технологічної системи у цьому випадку – величини змінні, що змінюються у функції часу й кута повороту деталі, і аналітичне визначення залежностей  $v_s(t)$  і  $S(t)$  є досить складною задачею.

Разом із тим, під час оброблення деталей, похибка форми яких визначається в основному непостійністю діаметра отвору в поперечному перерізі, криві процесу шліфування виступів та впадин на поверхні деталі досить задовільно співпадають між собою і відповідають інерційній ланці (рис.1,в). У цьому випадку аналітичне визначення  $v_s(t)$  не викликає ускладнень.

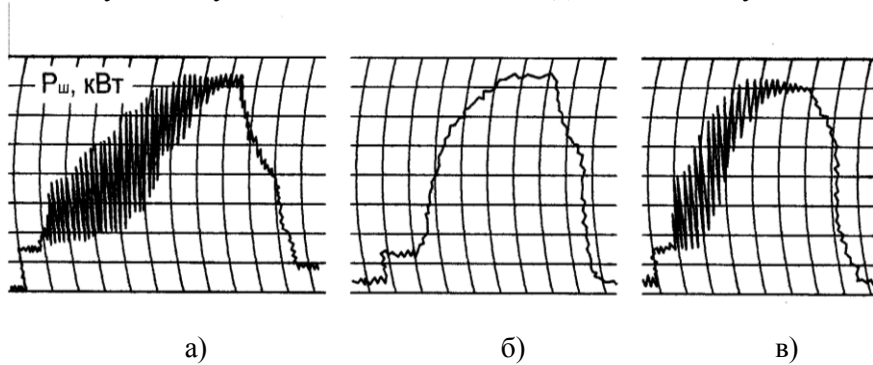


Рис.1. Вплив похибки форми заготовки на характер процесу різання

У початковий період шліфування зняття припуску відбувається лише з виступів оброблюваної поверхні [4]. Час, за який шліфувальний круг буде постійно знаходитись у контакті з деталлю, тобто момент доторкування до дна впадин, визначається як:

$$t_{\text{дом}} = \Delta_{\text{фб}} / v_{\text{б}}, \quad (12)$$

де  $\Delta_{\text{фб}}$  – вихідна похибка форми оброблюваної поверхні, яка визначається, наприклад, для безцентрового шліфування як найбільша різностінність деталі.

Для шліфування з пришвидшеним врізанням за подачі  $v_{\text{нр}}$  час  $t_{\text{дом}}$  визначається з рівняння (11), якщо  $t_{\text{дом}} < t_{\text{нр}}$ ,

де  $t_{\text{нр}} = T_p \ln \frac{v_{\text{нр}}}{v_{\text{нр}} - v_s}$  – час пришвидшеного врізання;

$v_s$  – швидкість зняття припуску за включеної чорнової подачі  $v_{\text{б}}$ .

Для  $t_{\text{дом}} > t_{\text{нр}}$  час  $t_{\text{дом}}$  визначається за формулою:

$$t_{\text{дом}} = \frac{\Delta_{\text{фб}}}{v_{\text{б}}} + \left(1 - \frac{v_{\text{нр}}}{v_{\text{б}}}\right) \left[ t_{\text{нр}} - T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нр}}}{T_p}}\right) \right]. \quad (13)$$

Похибка форми деталі в момент часу  $t_{\text{дом}}$ , чисельно дорівнює пружним деформаціям  $S_{\text{но}}$  технологічної системи на цей момент:

$$\Delta'_{\text{фб}} = v_{\text{б}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{нр}}}{T_p}}\right) + v_{\text{нр}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нр}}}{T_p}}\right) e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{нр}}}{T_p}}, \quad (14)$$

а припуск, знятий з виступів деталі за час  $t_{\text{дом}}$ , дорівнює  $\Delta_{\text{фб}} - \Delta'_{\text{фб}}$ .

Прийнявши за початок відліку час  $t_{\text{дом}}$  поточне значення похибки форми деталі визначається як різниця між поточним значенням пружних деформацій системи під час шліфування виступів та впадин:

$$\Delta_{\text{фб}}(t) = v_{\text{б}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{нр}}}{T_p}} e^{-\frac{t}{T_p}}\right) + v_{\text{нр}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{нр}}}{T_p}}\right) e^{-\frac{t_{\text{дом}} - t_{\text{нр}}}{T_p}} e^{-\frac{t}{T_p}} - v_{\text{б}} T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right). \quad (15)$$

Після перетворень:

$$\Delta_{\text{фб}}(t) = \Delta'_{\text{фб}} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (16)$$

З рівняння (13) випливає, що похибка  $\Delta_{\phi\delta}$ , якщо  $T_p$  залишається незмінним, є функцією лише часу оброблення.

Якщо  $t \geq t_{\text{ом}}$ , то поточне значення середньої швидкості зняття припуску

$$v_s(T_p) = v_{\phi} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \frac{\Delta_{\phi\delta}}{T_p} e^{-\frac{t}{T_p}}. \quad (17)$$

Аналізуючи отримані розрахункові дані та графіки, можна зробити **висновки**:

- якісні співвідношення між окремими складовими похибки оброблення можуть суттєво змінюватись залежно від змінних умов оброблення, побудови циклу, часу шліфування;

- поточне значення випадкових складових динамічної похибки шліфування  $\Delta_v$  і температурної похибки  $\Delta_{\theta}$  на вікінчувальних етапах оброблення визначаються головним чином нестабільністю швидкості зняття припуску, постійної часу різання та температурних деформацій деталей в кінці чорного шліфування;

- стабілізація швидкості зняття припуску проходить значно швидше стабілізації температурних деформацій деталі. Тому, у ряді випадків основним фактором, що обмежує зменшення часу заключних етапів шліфування, є температурна похибка  $\Delta_{\theta}$ .

- введення етапу виходжування після чорного шліфування дозволяє призначити мінімальний припуск на чистове шліфування за рахунок видалення під час виходжування більшої частини шару з припалами та суттєвого зменшення похибок форми оброблюваного отвору. За незначних коливань швидкості зняття припуску в кінці чорного шліфування  $\Delta v_{sn}$  й постійної часу  $\Delta T_p$  введення чорного виходжування збільшує продуктивність оброблення. За порівняно великих значень  $\Delta v_{sn}$ ,  $\Delta T_p$  і припуску на виходжування  $\Delta D_{\text{в чорн}}$  суттєво збільшується нестабільність швидкості зняття припуску й інших деформацій системи ВПД в кінці етапу шліфування. Збільшується також розсіювання часу виходжування, часу підведення круга до деталі після його правки;

- введення етапу виходжування після чистового шліфування за інших рівних умов дозволяє збільшити чистову подачу і, відповідно, зменшити час підводу круга до деталі;

- найпродуктивнішим є цикл з виходжуванням після чорного й чистового шліфування (четвертий варіант);

- за порівняно тривалого часу зняття чистового припуску  $t_{\text{чист}}$ , величина температурних деформацій деталі в кінці оброблення залежить, головним чином, від величини чистової подачі. Тому лімітуючим фактором збільшення чистової подачі, поряд із вказаними вище факторами, може стати допустиме значення температурної похибки оброблення, головним чином, її систематичної складової. За порівняно невеликих значень  $t_{\text{нідв}}$ ,  $t_{\text{чист}}$  та часу правки, температурні деформації деталей в кінці оброблення будуть залежати також від їх температурних деформацій перед виходом круга на правку.

### Інформаційні джерела:

1. Воронцов Л.Н., Корндорф С.Ф. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении: Учебн. пособие для вузов по специальности «Приборы точной механики». – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.: ил.

2. Бежанов Б.Н., Бушинов В.Т. Производственные машины-автоматы. Теория и расчет. – Л.: Машиностроение, 1973. – 359 с.

3. Точность производства в машиностроении и приборостроении. / Под ред. А.Н.Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.

4. Марчук В.І., Михалевич В.Т. Корекція деформаційних похибок при управлінні точністю механічної обробки // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка") – Луцьк: Луцький державний технічний університет, - 2000. Випуск 7. – с.143с – 145.

5. Режимы шлифования колец подшипников из сталей ШХ15 и ШХ15СГ. Руководящий документ. НПО ВНИПП. 1988. – 59 с.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2017

УДК: 621.86

**Н.М. Марчук***Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя***ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПРАВОК ДЛЯ НАРІЗАННЯ РІЗИ МІТЧИКАМИ В ОТВОРАХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Приведені конструкції оправок для нарізання різі митчиками в отворах деталей машин. Відомо, що понад 60% деталей більшості сучасних машин і механізмів мають різбові отвори. Широке використання різбових з'єднань у машинобудуванні обумовлене їхньою простотою, високою навантажувальною здатністю, експлуатаційною надійністю і довговічністю, а також зручністю з'єднання та роз'єднання деталей. Застосування різбових з'єднань деталей сприяє також наявності значної номенклатури, спеціальних різбових деталей пристосованих до різних конструктивних варіантів з'єднань особливо в умовах масового виробництва. Приведені аналітичні залежності для визначення режимів нарізання різі.*

*Ключові слова:* оправки, нарізання різі, митчики, різбові отвори.

**Н.Н. Марчук***Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя***ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПРАВОК ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКОВ В ОТВЕРСТИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Приведены конструкции оправок для нарезания резьбы метчиками в отверстиях деталей машин. Известно, что более 60% деталей большинства современных машин и механизмов имеют резьбовые отверстия. Широкое использование резьбовых соединений в машиностроении обусловлено их простотой, высокой нагрузочной способностью, эксплуатационной надежностью и долговечностью, а также удобством соединения и разъединения деталей. Применение резьбовых соединений деталей способствует также наличию значительной номенклатуры, специальных резьбовых деталей приспособленных к различным конструктивным вариантам соединений особенно в условиях массового производства. Приведены аналитические зависимости для определения режимов резки рези.*

*Ключевые слова:* оправки, нарезанные рези, метчики, резьбовые отверстия.

**N. Marchuk***Ternopil Ivan Puluj National Technical University***RATIONALE OF RATING PARAMETERS FOR REDISTRIBUTION OF MISCELLANEOUS INCIDENTS OF MACHINE PARTS**

*The designs of the burners for cutting off the tines in the openings of the machine parts are presented. It is known that more than 60% of the parts of most modern machines and mechanisms have threaded holes. Wide use of threaded joints in machine-building is due to their simplicity, high loading capacity, operational reliability and durability, as well as the convenience of connection and disconnection of parts. The use of threaded joints of parts also contributes to the availability of a large range of special threaded parts adapted to various structural variants of joints especially in mass production. The analytical dependences for determination of modes of cutting of a ridge are given.*

*Key words:* mandrels, chisel cutting, taps, threaded holes.

**Постановка проблеми.** Інтенсивний розвиток машинобудування тісно пов'язаний з розробленням прогресивних конструкцій технологічного оснащення.

Відомо, що понад 60% деталей більшості сучасних машин і механізмів мають різбові отвори, обробка яких ріжучими інструментами в деталях з кольорових металів, їх сплавів, а також з високопластичних сталей являє собою досить складну технологічну задачу. Це має особливо серйозне значення при виготовленні точних різбових отворів.

Створення нових конструкцій деталей машин з різбовими отворами інструментальних матеріалів, удосконалення конструкції митчиків і оптимізація геометрії ріжучої частини, поліпшення якості робочих поверхонь, застосування оптимальних налагоджень і нових видів охолодження не вирішують повністю питання високопродуктивного та якісного виготовлення внутрішніх різблень в високопластичних матеріалах.

Суть технології виготовлення деталей машин базується на послідовному використанні різних технологічних способів дії інструментів на оброблювальну заготовку з метою надання її заданої форми, розмірів і вказаної точності. Широке використання різбових з'єднань у машинобудуванні обумовлено їхньою простотою, високою несучою здатністю з'єднання та роз'єднання деталей, застосування різноманітних різбових з'єднань сприяють також наявності значної номенклатури спеціальних різбових деталей, пристосування до різних варіантів з'єднань, їхня широка стандартизація та мала вартість в умовах масового виготовлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями розроблення пристроїв для нарізання різі в деталях машин різного службового призначення присвячені праці Г.І.Грановського [1], В.І.Анурьєва [2], Д.М.Решетова [3], В.Т.Павлище [4], С.Г.Нагорняка [5], Б.М.Гевко [6], М.І.Пилипця [7], П.А.Лінчевського [8], та багатьох інших. Однак цілий ряд питань потребують подальших досліджень. Це питання підвищення надійності і довговічності різьбонарізних інструментів, підвищення якості нарізання різі, зменшення шумових характеристик верстатів і технологічного оснащення в процесі експлуатації.

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – обґрунтування параметрів конструкцій оправок для нарізання різі в отворах деталей машин і приведення методики для розрахунку процесів різьбонарізання.

**Викладання основного матеріалу.** Практично швидкості різання мітчиками приймають у межах  $V = 10 \dots 20$  м/хв, хоча швидкорізальними автоматними мітчиками можна нарізати різьблення в гайках зі швидкостями різання  $V < 50$  м/хв.

Швидкість різання мітчиками, круглими плашками і самовідкриваючими різьбовими головками обчислюють за рівнянням [3]

$$v = \frac{C_v K_v D^{1,2}}{T^m t^x}, \quad (1)$$

де  $C_v$  - коефіцієнт, що враховує умови обробки;  $D$  - зовнішній діаметр різьби;  $K_v$  - поправочний коефіцієнт, що враховує марку оброблюваного матеріалу і вид інструменту;  $T$  - стійкість, хв;  $t$  - крок різьби, мм.

Важливим параметром різьбонарізання є стійкість різьбонарізних інструментів – це сумарний час, витрачений на нарізування різьби однотипних заготовок до моменту, коли зношування по задній поверхні різьбонарізних інструментів досягає критерію зносу  $h_{3\max}$ .

Крутний момент в ньютон-метрах для різьбонарізних інструментів визначають із залежності

$$M_{кр} = C_m K_m D^x P \quad (2)$$

де  $D$  - зовнішній діаметр різі, мм;  $P$  - крок різі, мм;  $C_m$  - коефіцієнт, який вибирають за умови [1].

Стійкість  $T$  підраховують згідно рівнянь (2), щодо стійкості інструменту. Для мітчиків, круглих плашок і само відкриваючих різьбонарізних головок [3].

$$T = \left( \frac{C_v D^{1,2}}{vt^x} \right)^{1/m}, \quad (3)$$

де,  $m$ ,  $x$  - показники степенів.

Сумарний вплив моментів сил різання, прикладених до лез і моментів сил тертя, що діють на бокових поверхнях всіх зубів, що здійснюють зрізання припуску і формування різьбового профілю, веде до появи крутного моменту. Чим більше зубів знаходиться в процесі різання, тим більше крутний момент. Коли працюють всі зуби, розташовані на довжині ріжучої частини  $l_p$  гребінчастих різьбонарізних інструментів, обертовий момент досягає найбільшого значення. При нарізуванні різьб в наскрізних отворах (гайках), коли довжина ріжучої частини  $l_p$  більше глибини отвору  $l_o$ , одночасно в роботі може перебувати тільки частина ріжучих зубів, рівна

$$z_0 = l_o K_r / t, \quad (4)$$

де  $K_r$  - число ріжучих різьбових профілів;  $t$  - крок різьби. При цьому максимально крутний момент розвивається в той момент, коли ріжуча частина мітчика пройде уздовж осі деталі відстань, рівну глибині отвору (висоті деталі)  $l_o$ . При подальшому просуванні мітчика уздовж осі деталі ширина зрізаного шару кожним ріжучим зубом зменшується, що викликає зменшення сумарного поперечного перерізу зрізаного шару і зменшення крутного моменту.

Ефективна потужність в кіловатах, витрачається на нарізування різьби, визначається за рівнянням [3].

$$N_e = 60 M_{кр} n \quad (5)$$

де  $M_{кр}$  - крутний момент, кНм;  $n$  - частота обертання об/хв.

Основний час роботи різьбонарізного обладнання, витрачений на обробку однієї заготовки для різних методів різьбонарізання, розраховується за такими рівняннями: для різьбових різців

$$t_i = l_o + l_1 + f)ig / (nP), \quad (6)$$

для гайкових і машинних мітчиків, нарізати різьбу в наскрізних отворах

$$t_0 = (l_a + l_p) / (nt).$$

де  $l_q$  – довжина нарізання різі на заготовках;  $l_p$  – довжина робочої частини інструмента;  $n$  – кількість обертів.

Патрон для нарізання різі (рис.1) виконано у вигляді ступінчастого циліндричного корпусу 1, з лівої сторони у центральному отворі 2 якого жорстко встановлено циліндричну оправку 3 з можливістю осьового переміщення. В оправці по зовнішньому діаметру рівномірно по колу встановлено декілька рядів кульок 4, наприклад, три, які завальцьовані у сферичних виїмках 5 оправки 3 з можливістю кругового повертання. Кульки верхніми сферичними поверхнями є у взаємодії з півкруглими осьовими пазми 6, які виконані у центральному отворі 2 ступінчастої циліндричного корпусу 1 рівномірно по колу.

Крім цього з лівого торця ступінчастий циліндричний корпус закритий кришкою 7 з центральним отвором 8, який є у взаємодії з зовнішнім діаметром оправки 3. В цьому отворі кришки 7 напроти кульок виконані наскрізні осьові півкруглі пази 9, які є фактично продовженням внутрішніх осьових півкруглих пазів 6 внутрішнього отвору 2 ступінчастого циліндричного корпусу для вільного осьового переміщення оправки з кульками.

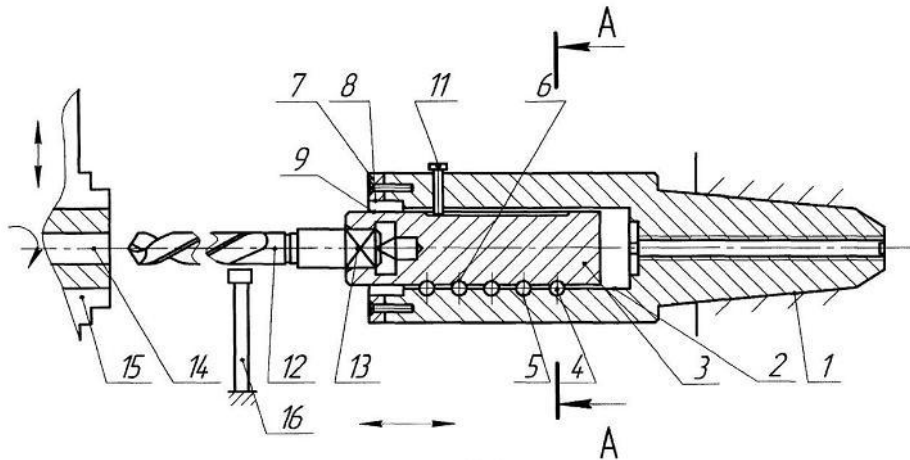


Рис. 1. Експериментальний патрон для нарізання різі

Між двома верхніми рядами кульок 4 зверху на оправці 3 виконано півкруглий осьовий паз 10, паралельний до осьових пазів 6, які виконані у внутрішньому отворі 2 ступінчастого циліндричного корпусу 1. Осьовий паз 10 є у взаємодії з головкою стопорного гвинта 11, який встановлено у верхній частині ступінчастого циліндричного корпусу лівого його кінця. Це забезпечує відповідну фіксацію положення вильоту оправки 3 з мітчиком 12, який встановлений в глухий квадратний отвір 13 оправки 3 з лівого її кінця. Мітчик служить для виконання відповідних операцій в заготовці 14, яка жорстко закріплена в патроні 15 токарного верстату, він здійснює осьове переміщення, заготовка - обертальний рух.

Для обмеження осьового переміщення і включення реверсу в нижній зоні переміщення торця оправки 3 встановлено упор-перемикач 16 на станині верстату (на кресленні не показано).

Робота патрона для нарізання різі здійснюється наступним чином. Заготовка 14 в центральному отворі якої необхідно нарізати різь, жорстко кріпиться в патроні 15, а мітчик 12 жорстко кріпиться в квадратному отворі 13 оправки 3. Включається верстат і патрон задньою бабкою здійснює рух осьової подачі вліво і здійснює процес нарізання різі. При цьому рух ступінчастого циліндричного корпусу 1 призупиняється, а оправка 3 з мітчиком 12 продовжує нарізання різі до того часу коли оправка з своїм лівим торцем не переключить упор-перемикач. Після цього включається реверс і заготовка 14 з патроном 15 обертаються в протилежному напрямку. Після виходу мітчика 12 з отвору заготовки 14 верстат зупиняється і заготовку знімають, а на її місце встановлюють наступну.

До переваг патрона відносять розширення технологічних можливостей і підвищення продуктивності праці.

Патрон для оброблення деталей пальцевими ріжучими інструментами (рис.2) виконано у вигляді ступінчастого корпусу 1 з лівої сторони у центральному еліпсному отворі 2 якого жорстко встановлено еліпсну оправку з можливістю осьового і кругового переміщення, яку виконано із двох половинок нижньої 3 і верхньої 4.

Між ними встановлені пружні елементи – пружини 5 з горизонтальним розміщенням між ними з великим кроком. В другому варіанті фіг.2 пружина 5 встановлені вертикально в отвори 6 з верхніми центрувальними елементами 7 в кількості 2...4штук в залежності від величини крутного моменту і довжини оправки, яку в зборі мають діаметр рівний меншому діаметрі еліпсної оправки з можливістю кругового провертання. Причому з лівого кінця нижньої половинки 4 виконано глухий квадратний отвір 8, який є у взаємодії з кінцями ріжучого інструменту 9 мітчика. Верхня частина 4 еліпсної оправки по довжині є коротшою від нижньої і вони виконані у двох варіантах. Перший між нижньою 3 і верхньою 4 половинками виконано осьовий отвір 10, який є у взаємодії з циліндричною пружною пружиною 5 з великим кроком (фіг.2). Другий варіант фіг.3 пружини 5 встановлені вертикально в отвори 6 нижньої півкруглої половини в кількості 2...4штуки в залежності від довжини оправки і величини крутного моменту. Крім цього половинки розрізаних оправок зцентровані відомими центрувальними елементами 7 і стягнуті пружними елементами 11 відомої конструкції.

Крім цього еліпсний отвір з лівого торця ступінчастого циліндричного корпусу закритий кришкою 12 і еліпсним ущільненням 13, який є у взаємодії з зовнішнім діаметром еліпсної оправки 3 і 4 з можливістю осьового і кругового переміщення. Це забезпечує відповідну фіксацію положення вильоту еліпсної оправки 3 з мітчиком 9, який встановлений в глухий квадратний отвір 8 еліпсної оправки з лівого її кінця. Мітчик 9 служить для виконання відповідних операцій в заготовці 15, яка жорстко закріплена в патроні токарного верстату, він здійснює осьове переміщення, заготовки.

Для обмеження осьового переміщення і включення реверсу в нижній зоні переміщення торця оправки 3 і 4 встановлено упор-перемикач 16 на станині верстату. Крім цього в зону еліпсного отвору 2 залито мастило для зменшення тертя, яке розміщено зверху корпусу 1 в ємкості 17. З правого торця корпусу отвір 18 закритий (заглушений) гвинтом 19. Крім цього на столі верстата встановлені Altivar71 20 і персональний комп'ютер 21 для заміру зусилля і параметрів різання. Використання еліпсного з'єднання оправка еліпсний отвір значно зменшують сили тертя і підвищують точність проведення досліджень.

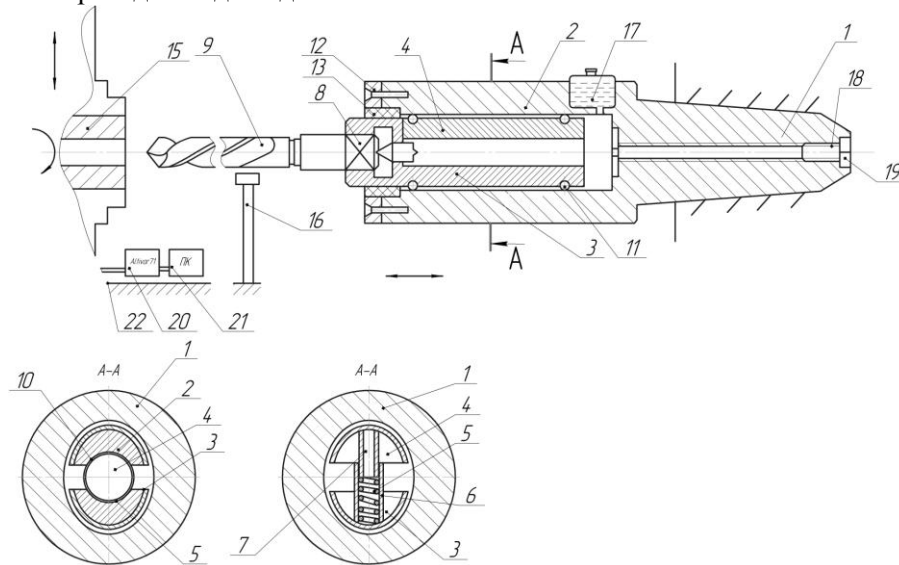


Рис. 2. Патрон для оброблення деталей пальцевим інструментом

Роботу патрона розглянемо на прикладі нарізання різі, яка здійснюється наступним чином. Заготовка 15 в центральному отворі якої необхідно нарізати різь, жорстко кріпиться в патроні 22, а мітчик 9 жорстко кріпиться в квадратному отворі оправки 3. Включається верстат і патрон задньою бабкою здійснює рух осьової подачі вліво і здійснює процес нарізання різі. При цьому рух ступінчастого циліндричного корпусу 1 призупиняється, а оправка 3 з мітчиком 9 продовжує нарізання різі до того часу коли оправка з своїм лівим торцем не переключить упор-перемикач 16. Після цього включається реверс і заготовка 15 з патроном 22 обертаються в протилежному напрямку. Після виходу мітчика 9 з отвору заготовки 15 верстат зупиняється і заготовку знімають, а на її місце встановлюють наступну.

До переваг дослідного патрона відносять розширення технологічних можливостей і підвищення чутливості системи і точності замірів процесів нарізання різі.

Контрольний пристрій для заміру середніх діаметрів мітчиків (рис.3) виконано у вигляді плити-підставки 1, скоби 2, нижньої підставки 3 для заміру середніх діаметрів мітчиків з трьома і більше перами, механізму заміру середнього діаметра 4, індикатора 5, базової установчої конічної оправки 6, нижнього установчого конусного отвору 7 скоби 2, який забезпечує точність конструкції і заміру конструктивних параметрів мітчиків 8.

Пристрій оснащений змінними нижніми підставками 3 для заміру мітчиків 8 виготовленими з двома та більшою кількістю пер (канавок) до 6, які встановлюється в дерев'яну підставку (на кресленні не показано) з конічними отворами 10 різних діаметрів. Підставка пропитана маслом, для запобігання корозії і встановлена на металічну підставку. Механізм заміру середнього діаметру виконано у вигляді вертикального притискового щупа 9 з можливістю осьового переміщення встановлений у верхній корпус 10 скоби 2. Щуп 9 зверху підтиснутий пружиною стиснення 11 через перехідну втулку 14, яка з'єднана з коромислом двох плечового механізму 13, а з другого кінця є у взаємодії з ніжкою 14 індикатора 5. Нижня підставка 3 крім базової установчої конічної оправки 6 оснащена додатковими опорами 15 для двох і шести канавок мітчика 8.

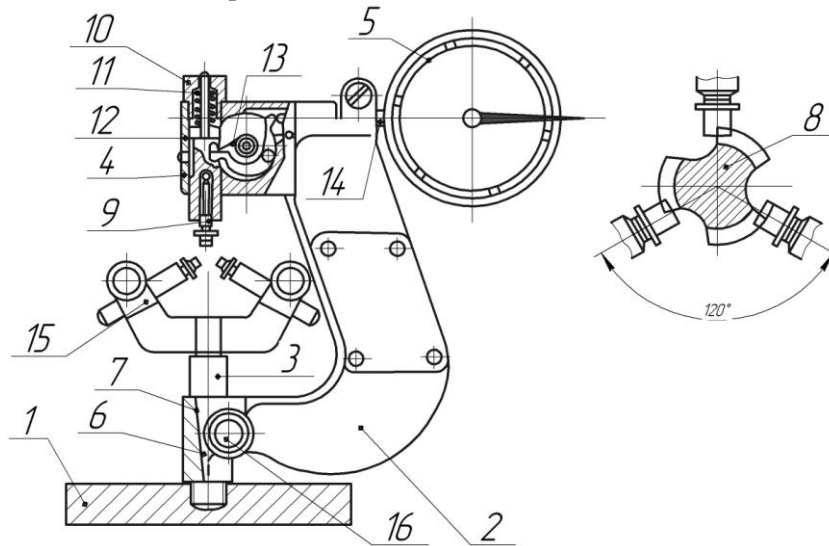


Рис. 3. Контрольний пристрій для заміру середніх діаметрів мітчиків

Контрольний пристрій працює наступним чином. Для двох канавочного мітчика 8 підбирають одну нижню підставку, а для мітчиків з більшою кількістю підбирають іншу з більшою кількістю опор 15 і їх закріплюють фігурним прижимом 16 відомим способом.

До переваг пристрою відноситься розширення технологічних можливостей, підвищення точності і якості продукції.

**Висновки.** Розроблена конструкція пристрою для нарізання різі в гайках на різьбонарізних верстатах. Приведена методика розрахунку технологічних параметрів нарізання різі в гайках.

#### Список використаних джерел:

1. Грановський Г.И. Резание металлов. - М. «Высшая школа», 1985, 304ст.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. - М.: Машиностроение, 1982.-Т1.728. Т2.-559ст., Т3-557с.
3. Жолобов А.А. Технология автоматизированного производства. - Мн. Дизайн ПРО 2000.-624с.
4. Решетов Д.Н. Детали машин. - М.:Машиностроение, 1989.-496с.
5. Павлице В.Т. Основы конструирования та розрахунок деталей машин. - К.: Вища школа 1993, 555стор.
6. Нагорняк С.Г. Сверление сквозных отверстий с регулированием процесса выхода инструмента. - К.:1989. №2. -с.47-49.
7. Гевко Б.М. Технологія сільськогосподарського машинобудування. - К.: Кондор, 2015. с.490.
8. Пилипець М.І. Науково технологічні основи виробництва заготовок деталей машин. Автореф. Докт. Дисерт.-Львів 2002.-35с.
9. Линчевский П.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках.-К.: Техніка,2001.301ст.

Стаття надійшла до редакції 26.12.2017

УДК: 621.86

**Т.Д. Навроцька***Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя***ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ГВИНТОВИХ МЕХАНІЗМІВ**

*Приведені конструкції технологічного оснащення для контролю гвинтових елементів і приводних валів. Визначено сумарну похибку закріплення заготовки в пристрою під час обертання. Приведені конструкції технологічного оснащення для контролю гвинтових приводних робочих органів транспортних засобів. Вони є невід'ємною ланкою технологічної системи верстат-присрій-інструмент-деталь. Вони розширюють закладені у конструкції верстату параметри точності, жорсткості та довговічності і підтримують їх у процесі обробки заготовок. Використання пристроїв забезпечує підвищення продуктивності праці, якість виробу, розширює технологічні можливості верстатів, покращує умови і безпеку праці.*

*Ключові слова:* гвинтові механізми, якість деталей, технологічне оснащення, технологічний процес.

**Т.Д. Навроцкая***Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя***ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ**

*Приведены конструкции технологической оснастки для контроля винтовых элементов и приводных валов. Определены суммарную погрешность закрепления заготовки в устройства при вращении. Приведены конструкции технологической оснастки для контроля винтовых приводных рабочих органов транспортных средств. Они являются неотъемлемой звеном технологической системы станок устройство-инструмент-деталь. Они расширяют заложены в конструкции станка параметры точности, жесткости и долговечности и поддерживают их в процессе обработки заготовок. Использование устройств обеспечивает повышение производительности труда, качество изделия, расширяет технологические возможности станков, улучшает условия и безопасность труда.*

*Ключевые слова:* винтовые механизмы, качество деталей, технологическая оснастка, технологический процесс.

**T.D. Navrotska***Ternopil Ivan Puluj National Technical University***TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR CONTROL OF QUALITY DETAILS OF SCREW MECHANISMS**

*The designs of technological equipment for controlling screw elements and drive shafts are presented. Determine the total error of fastening the workpiece to the device during rotation. The designs of technological equipment for control of propeller drive working bodies of vehicles are presented. They are an integral part of the technological system of the machine-tool-tool-part. They extend the parameters of precision, stiffness and durability inherent in the design of the machine and support them in the processing of workpieces. The use of devices provides increased productivity, product quality, expands technological capabilities of machines, improves conditions and safety of work.*

*Key words:* screw mechanisms, quality of parts, technological equipment, technological process.

**Постановка проблеми.** Одним із основних напрямків вдосконалення технології механоскладального виробництва є впровадження прогресивних технологічних процесів та їх забезпечення технологічною оснасткою. Технологічна оснастка – це додаткові допоміжні пристрої, які значною мірою доповнюють і розширюють функціональні можливості технологічного обладнання. У машинобудуванні до технологічної оснастки відносяться верстатні, складальні і контрольні пристрої та допоміжні і робочі інструменти. Найбільш значну долю (70-80%) [1] загальної номенклатури пристосовань складають верстатні пристрої. Вони є невід'ємною ланкою технологічного процесу і вони повинні продовжити і розширити закладені у конструкціях верстатів параметри точності, жорсткості і довговічності і підтримувати їх у процесі обробки заготовок з використанням максимальної потужності верстатів. При цьому особливо важливо, щоб параметри усіх конструктивних елементів силової системи пристроїв були погоджені між собою, а верстатні пристрої не були б найбільш слабкою ланкою цієї системи і обмеженими б продуктивність верстатів.

Використання пристосовань забезпечує автоматичну орієнтацію заготовок при їх встановленні, підвищує точність обробки і якість виробів, збільшує продуктивність праці, розширює технологічні можливості верстатів, покращує умови роботи і безпеку праці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями проектування технологічного оснащення технологічних процесів виготовлення деталей машин присвячені праці Корсакова В.С.



[1], Ансьорова М.А. [2], Болотина Х.Л. [3], Горошкіна А.К. [4], Боровик А.І. [5], Завісляк Н.І. [6], Косилова А.Г. [7], Дичковський М.Г. [8], та багатьох інших. Однак цілий ряд питань пов'язаних з удосконаленням технологічного оснащення, розширення технологічних можливостей, підвищення продуктивності праці потребують свого подальшого удосконалення.

**Постановка завдань. В роботі поставлено мету** – удосконалення конструкцій пристроїв для контролю гвинтових транспортно-технологічних систем, підвищення їх продуктивності праці і розширення технологічних можливостей.

**Викладення основного матеріалу.** Нами розроблена удосконалена конструкція шнеко міра [9],

Шнекомір виконано у вигляді нерухої 1 і рухої 2 губок товщина яких є більшою кроку шнека і штанги 3, яка жорстко з'єднана з нерухою губкою. На штанзі 3 встановлена рухома рамка 4 з ноніусом 5, яка переміщується по штанзі, з низу якої виконана рейка 6, яка є у взаємодії з шестірнею 7 з можливістю кругового провертання. Шестерня центральним отвором жорстко встановлена на вісь 9 разом з кінчним ноніусом 5 з можливістю кругового провертання в рухій рамці 4. Остання на штанзі жорстко кріпиться стопорним гвинтом 10, а між губками 1 і 2 встановлено вимірювальний шнек 11 у вигляді гвинтового робочого органу.

Робота шнекоміра здійснюється наступним чином. Губки 1 і 2 своїми площинами контактують з зовнішнім розміром шнека 11. При цьому останній базується з прямокутною базуючою призмою 12. За допомогою шестірні 7, яка приводить рухому рамку 4 з ноніусом 5 переміщуються вліво для забезпечення контакту губок з зовнішнім діаметром шнека 11. При збільшенні зусилля провертання більше потрібного спрацьовує відомий механізм тріскачки кінчного ноніуса 5.

Для заміру точності шнеків використовують індикатор 14, Altivar 15 і персональний комп'ютер 16.

До переваг шнекоміра належить розширення технологічних можливостей і здійснення замірів і кроку шнека.

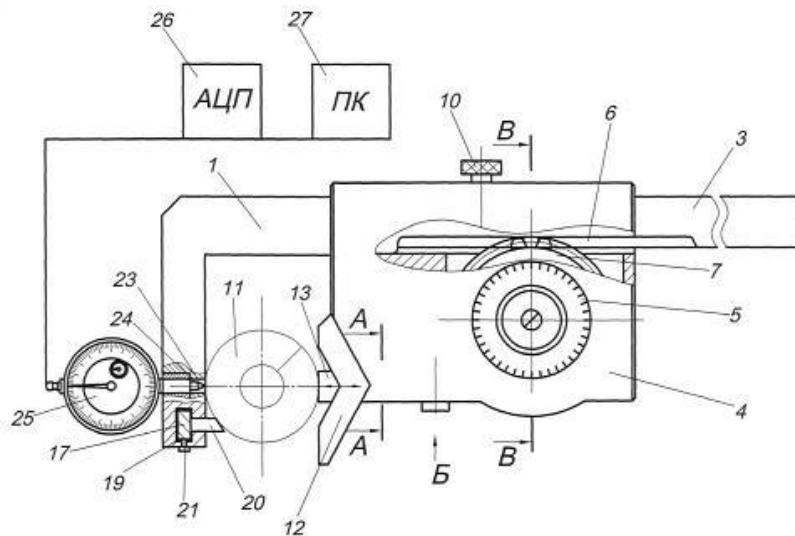


Рис.1. Шнекомір

Сумарна похибка закріплення вала у пристрої знаходиться за формулою [9]:

$$\varepsilon_3 = \cos \beta (\varepsilon_{30} + \varepsilon_{34}), \quad (1)$$

$$\varepsilon_{30} = \sqrt{(\varepsilon_3')^2 + (\varepsilon_3'')^2 + (\varepsilon_3''')^2}$$

де,  $\beta$  - кут між напрямком виконуваного розміру і напрямком найбільшого зміщення;

$\varepsilon_{30}$  - основна випадкова складова похибки закріплення;

$\varepsilon_{34}$  - випадкова похибка закріплення, яка пов'язана зі зміною форми поверхні контакту установчого елемента при його зношенні.

$\varepsilon_3'$ ,  $\varepsilon_3''$ ,  $\varepsilon_3'''$  - відповідно похибки закріплення непостійною силою затиску, неоднорідності шорсткості заготовки і неоднорідністю хвилястої заготовки.

До переваг шнекоміру відноситься розширення технологічних можливостей і здійснення замірів і кроку шнека.

Індикатор універсальний зображено на кресленні рис.2 [10]. Індикатор універсальний виконаний у вигляді штанги 1, на якій нанесені мірні мітки 2, з лівого кінця приладу на штанзі 1 жорстко закріплено корпус лівої каретки 3 відомим способом. В середині корпусу перпендикулярно до штанги виконано наскрізний отвір 4, в який встановлено лівий вимірювальний елемент, який виконано у вигляді двоплечого важеля 5 з центральним отвором 6 перпендикулярним до штанги на нерухомій осі 7 з можливістю коливних переміщень, нижній вимірювальний кінець якого має форму шупа 8. У верхній частині двоплечий важіль 5 лівого торця є у взаємодії з ніжкою 9 індикатора 10, який жорстко закріплений в корпусі лівої каретки 3. На штанзі справа встановлена права каретка 11 з можливістю осьового переміщення. В корпусі якої перпендикулярно до штанги 1 виконано центральний отвір 12, який є у взаємодії з упором 13, нижній кінець якого має форму шупа 8 лівого двоплечого важеля 5. Крім цього до правого торця правої нерухомої каретки під'єднано ноніус 14, хомут 15 зі стопорним гвинтом 16 і механізм точної настройки 17. Робота індикатора універсального здійснюється наступним чином. Для прикладу розглянемо вимірювання довжини паза 18 оброблювальної деталі 19, яку встановлюємо на підставку, вимірювальні каретки зсувають до купи і встановлюють ніжки шупа 8 в середину паза 18, розсовують каретки до стику шупів 8 і за допомогою індикатора 10 фіксують відхилення величини паза 18 відносно норми. В разі потреби в залежності від конструктивних параметрів деталей і вимірювальних елементів шупа 8 можна змінювати.

До переваг індикатора належить розширення технологічних можливостей і підвищення чутливості приладу і точності його роботи.

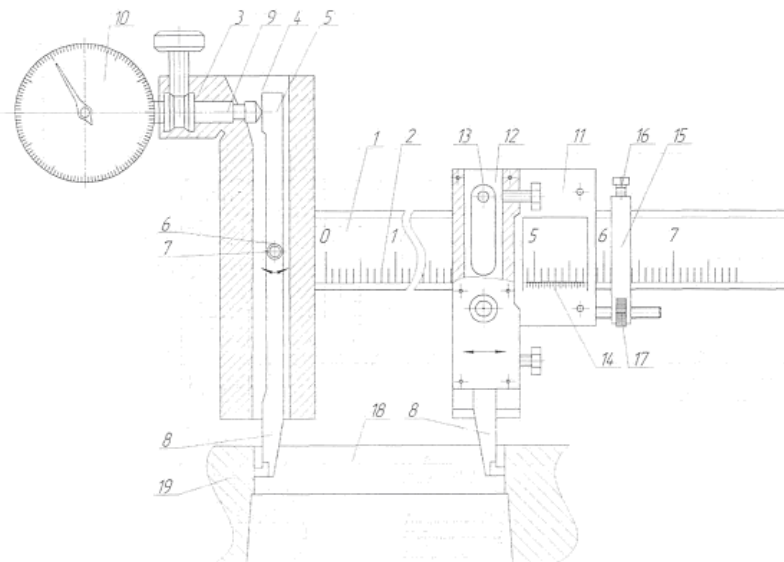


Рис.2. Індикатор універсальний

**Висновки.** Розроблені конструкції технологічного оснащення для контролю гвинтових робочих органів конвеєрів і приводних валів, які захищені патентами на корисні моделі.

Багатомірний пристрій для контролю ступінчастих валів на рис.4.

Багатомірний пристрій для контролю ступінчастих валів виконано у вигляді плити основи 1 на якій встановлені всі необхідні елементи – передня 2 і задня 3 відповідно призми. У впадинах призм 2 і 3 вільно встановлені опорні ролики 4, зовнішні поверхні яких разом з робочими поверхнями 5 призм 2 і 3 є у взаємодії з зовнішніми циліндричними поверхнями 6 кінців гвинтового вала 7. Крім цього торцеві внутрішні конічні кінці 8 гвинтового вала є у взаємодії з задніми конічними опорними підтискними елементами 9, які встановлені на опорні елементи 2 на плиті основи 1.

Лівий кінець 6 гвинтового вала 7 є у взаємодії з опорним роликом 4, який встановлено в призмі 10 і який знизу є у взаємодії з двохплечим коромислом 11 (важільна передача), яке провертається на осі 12 і за допомогою притискної пружини 13 здійснює постійний контакт з опорним роликом 4. А з правого кінця двох плече коромисла 11 є у взаємодії з ніжкою 14 індикатора 15, який жорстко встановлений у стояку 16.

Причому гвинтовий вал 7 системою проводів з'єднаний з приладами Altivar 16, персональним комп'ютером 17 і приладом 18 для заміру шорсткості поверхонь гвинтового вала (профілометр).

Пристрій оснащений механізмом приводу відомої конструкції 20 з метою його провертання і контролю. Обов'язковою умовою роботи пристрою є те, що опорні ролики 4 і опорні поверхні призми 2 і 3 є у постійному контакті зі ступінчастим валом при його провертанні. Тому для постійного контакту поверхонь ступінчастого вала з опорними роликами 4 необхідно визначити їх зовнішні діаметри.

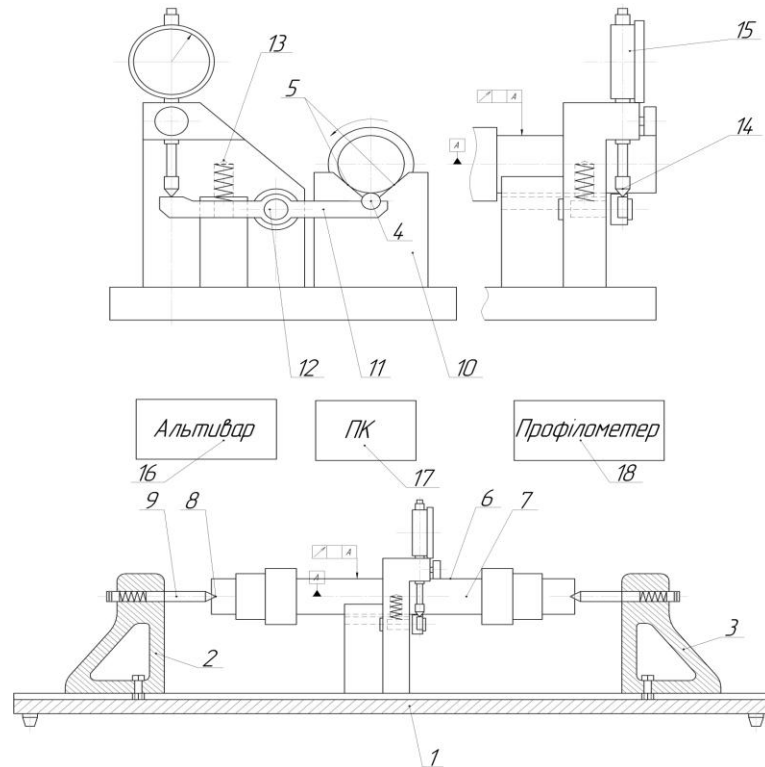


Рис.3. Багатомірний пристрій для контролю ступінчастих валів

Робота пристрою для контролю биття і параметрів гвинтового вала здійснюється наступним чином. Гвинтовий вал 7 встановлюють в призми 4 і 3 і до контакту передньої шийки 6 з опорним роликом 4, а стрічку індикатора 15 встановлюють нуль. За допомогою переднього привідного кінцевого елемента 9 здійснюють провертання вала 7 з шийками 6 за допомогою приводу відомої конструкції з метою його провертання і контролю. При цьому за допомогою приладів Altivar 16, персонального комп'ютера 17 і приладу для заміру шорсткості 18 здійснюють необхідні заміри.

До переваг пристрою відноситься розширення технологічних можливостей і підвищення продуктивності праці.

#### Список використаних джерел:

1. Корсаков В.С. Основи конструювання пристосованих в машиностроєнні. -М.:Машиностроєніе, 1983. - 285с.
2. Ансьоров М.А. Пристосованія для металлорезущих станков. -М.: Машиностроєніе, 1975. - 650 с.
3. Болотин Х.Л., Костромин Ф.П. Станочные пристосованія. - М.:Машиностроєніе, 1973.-315 с.
4. Горошкин А.К. Пристосованія для металлорезущих станков. - М.:Машиностроєніе, 1979.-303с.
5. Боровик І.А. Проектуванія технологічного оснащення. -К.:ІЗМН, 1966.-315ст.
6. Зависляк Н.И. Современные пристосованія к металлорезущим станками. -Л.:Машиностроєніе, 1967.-258с.
7. Справочник технолога-машиностроєтеля в 2<sup>х</sup> томах. Под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова.-М.: Машиностроєніе – 1986. Т1 – 656ст. Т2 – 496ст.
8. Дичковський М.Г. Технологічна оснастка "Проектно - конструкторські розрахунки пристосовань". Тернопіль, 2001, 277ст.
9. Патент №98974 Україна "Шнекомір" Навроцька Т.Д. та інші. Бюл.№9, 2015.
10. Патент №109876 Україна "Індикатор універсальний" Навроцька Т.Д. та інші. Бюл.№11, 2016.

Стаття надійшла до редакції 26.12.2017

УДК 506+510

**Є.А. Недашківський***Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ІННОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ФІНАНСОВИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ З ФРАКТАЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ**

*Запропоновано інноваційний підхід до прогнозування фінансових часових рядів з фрактальною структурою. Окреслено ознаки фрактальності на фінансових ринках. Економічні часові ряди визначено як прояв фрактальних властивостей на коротких горизонтах, але з асимптотичною схожістю з рівновагою. Представлено загальний спосіб аналізу та прогнозування фінансового часового ряду за допомогою лінгвістичного моделювання, реалізація якого викладена у вигляді структурної схеми.*

*Ключові слова:* фінансові часові ряди, фрактали, лінгвістичне моделювання, самоподібна структура, аналіз, прогнозування, стохастичний напрямок, броунівський рух.

*Форм. 17. Рис. 1. Літ. 13.*

**Е.А. Недашковский****ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ФИНАНСОВЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ**

*Предложено инновационный подход к прогнозированию финансовых временных рядов с фрактальной структурой. Определены признаки фрактальности на финансовых рынках. Экономические временные ряды определены как проявление фрактальных свойств на коротких горизонтах, но с асимптотическим сходством с равновесием. Представлен общий способ анализа и прогнозирования финансового временного ряда с помощью лингвистического моделирования, реализация которого изложена в виде структурной схемы.*

*Ключевые слова:* финансовые временные ряды, фракталы, лингвистическое моделирование, самоподобная структура, анализ, прогнозирование, стохастическое направление, броуновское движение.

**Y.A. Nedashkivskyi****INNOVATIVE APPROACH TO FORECASTING OF FINANCIAL TIME SERIES WITH FRACTAL STRUCTURE**

*An innovative approach to predicting financial time series with a fractal structure is proposed. The signs of fractality in the financial markets are determined. Economic time series are defined as the manifestation of fractal properties on short horizons, but with asymptotic similarity with equilibrium. A general way of analyzing and forecasting a financial time series is presented with the help of linguistic modeling, the implementation of which is stated in the form of a structural diagram.*

*The method of analysis and forecasting of the financial time series with fractal structure through linguistic modeling is determined, which involves scaling of the time series and singling out of codimension. The features of the suggested method allow analyzing and forecasting financial time series in the conditions where the existing methods, which use the apparatus of mathematical statistics or information technologies separately, appear to be ineffective.*

*Key words.* financial time series, fractals, linguistic modeling, self-similar structure, analysis, forecasting, stochastic direction, Brownian motion.

**Вступ та постановка проблеми дослідження.** У часових характеристиках процесів і явищ, що протікають в середовищах із самоподібною структурою, виявляють фрактальну поведінку. Фрактальні часові ряди – цілий клас фрактальних кривих, широко використовуваних при описі й моделюванні найрізноманітніших явищ. З їх допомогою описуються такі явища, які, здавалося б, не мають нічого спільного: рух броунівської частинки, поведінка курсу обміну валют на фінансових ринках, зміна рівня води в озерах і річках і т.д. Застосування фракталів в моделюванні часових рядів, зокрема, така характеристика тимчасового ряду, як фрактальна розмірність, дозволяє визначити момент, в який система стає нестабільна і готова перейти у новий стан.

Створення модифікованих моделей, що об'єднують у собі інтелектуальні та статистичні методи аналізу, та прогнозування фінансових часових рядів є актуальним завданням сьогодення в силу наявності виявлених недоліків існуючих методів у сфері сучасної економічної науки.

Інтеграція апарату нечіткої логіки та теорії детермінованого хаосу у межах лінгвістичного моделювання спонукають до розробки інноваційних підходів прогнозування фінансових часових рядів з фрактальною структурою.

Масштабність фінансових часових рядів з фрактальними властивостями вимагає застосування єдиного універсального механізму, який приводить до аналізу фрактальності динамічних процесів, що виникають в економічних системах. Пошук такого механізму є одним з найактуальніших завдань науки сьогодення.

**Мета роботи.** Запропонувати інноваційний підхід до прогнозування фінансових часових рядів з фрактальною структурою. Представити загальний спосіб аналізу та прогнозування фінансового часового ряду за допомогою лінгвістичного моделювання, реалізацію якого навести у вигляді структурної схеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На самому початку свого розвитку, наука про фінансові часові ряди представлялася у вигляді двох незв'язаних напрямків – стохастичний та динамічний, і лише останнім часом намітилася деяка тенденція до їх зближення. Стохастичний напрям, бере свій початок від роботи Луїса Башельє 1900 р. [1], де автор, ще за п'ять років до Ейнштейна, запропонував першу модель броунівського руху (модель випадкового блукання) і застосував її для опису коливання цін акцій на фондовій біржі.

У ряді робіт [2,3] було проведено аналіз деяких фінансових рядів і показано, що багато які з них мають кінцеву ємність.

Великий внесок у майбутню фрактальну геометрію внесли також знамениті роботи французьких математиків Г. Жюліа і П. Фоту [4], які на початку 20 століття займалися теорією раціональних відображень в комплексній площині.

Значною роботою в області топології варто відзначити класичне дослідження П. С. Урисона про теорію розмірності [5]. У цій роботі ставиться і вирішується проблема про визначення для кожної безлічі точок (в евклідовому просторі будь-якого числа вимірів і навіть в будь-якому метричному просторі) числа, яке природно було б назвати розмірністю або числом вимірів цієї безлічі.

Порівняльний аналіз основних постулатів теорій ефективного і фрактального ринків наводить Ю. П. Олександровська [6]. Автор пропонує дослідження фрактальних властивостей динамічного фінансового ряду на основі методу нормованого розмаху.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за темою даної роботи, питання ефективного прогнозування фінансових часових рядів залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Фінансові часові ряди демонструють високу ступінь нелінійної мінливості, особливо на високих частотах, і часто демонструють фрактальні властивості. Коли фрактальна розмірність часового ряду дорівнює нулю, це пов'язано з двома характерними рисами:

–фрактальні процеси виявляють неоднорідність – високу ймовірність екстремальних або віддалених коливань, як правило, з нерегулярними інтервалами;

–фрактальні процеси також демонструють симетрію експонування – пропорційність співвідношень між коливаннями на різних відстанях поділу.

Ознаки фрактальності на фінансових ринках не передбачають хаотичності поведінки, що нагадує випадковість, породжену невеликим числом детермінованих рівнянь. Фрактальність у великомасштабних багатовимірних системах, таких як фінансові ринки, є стохастичною [7]. Цей тип фрактальності зазвичай виникає в результаті мультиплікативних взаємодій між двома або більше стохастичними процесами.

Більша частина сучасної літератури з нелінійної мінливості [8,9,10] на фінансових ринках була заснована на дифузії волатильності з безліччю випадкових факторів. Дифузори волатильності з мультиплікативним зв'язком між стохастичними чинниками, як правило, генерують фрактальність.

На великих відстанях поділу фінансові ряди можуть моделюватися з використанням структурних рівнянь, які, як правило, не є фрактальними. У цьому сенсі доцільно охарактеризувати економічні часові ряди як прояв фрактальних властивостей на коротких горизонтах, але з асимптотичною схожістю з рівновагою. У деяких випадках базові структурні рівняння також породжують фрактальність [11].

Найбільш яким прикладом є обмінний курс, імовірно обумовлений диференціалами в реальні ставки дохідності. Нехай  $X_t$  – це обмінний курс,  $I_t$  – це процентна ставка,  $e$  – індекс очікування,  $\varepsilon_t$  – залишкова складова фінансового часового ряду,  $F$  – іноземна валюта. Структурне рівняння має вигляд:

$$X_t = \omega_0 + \omega_1 X_{t-1} + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \varepsilon_t \quad (1)$$

Як наголошується у [12], прийняття коефіцієнтів стохастичних процесів може призвести до нелінійної мінливості. На основі цього вираз  $[(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \varepsilon_t$  передбачає фрактальну поведінку. Крім того, номінальні та реальні відсоткові ставки також можуть бути фрактальними,

так що різниця в реальних ставках прибутковості сама по собі різниця двох незалежних фрактальних процесів.

У рамках дослідження пропонується використання алгоритму прогнозування на основі двох методів:

– застосування моделі переходу станів для передбачення умовної ймовірності екстремальних подій;

– побудова моделі симетрії на коротких часових масштабах.

Методологія моделювання часового ряду базується на розкладанні тимчасового ряду на складові компоненти і моделюванні значень кожної компоненти окремо. Пропонується застосування до кожного ряду агрегування, тобто розкладання ряду на короткі проміжки значення яких подібні за будь-якою ознакою. З точки зору математичної науки агрегування розглядається як перетворення вихідної моделі в модель з меншим числом змінних і обмежень, що дає наближений (в порівнянні з вихідним) опис досліджуваного процесу або об'єкта.

На основі вищевикладеного задамося, що  $N$  – кількість подій,  $L$  – характерна довжина, а  $D$  – фрактальна розмірність; зафіксуємо значення для фінансового часового ряду  $D = 1$ .

Імовірнісна міра розмірності визначається за формулою:  $[N(|Y_t - Y_{t-1}|) > L / N(|Y_t - Y_{t-1}|)] / L$ . Частка спостережень, що лежать за межами порога  $L$  щодо загальної вибірки, варіюється в залежності від:

$$[N(|Y_t - Y_{t-1}|) > L / N(|Y_t - Y_{t-1}|)] \approx L^d \quad (2)$$

де знаком  $\approx$  позначається асимптотична рівність. У цьому сенсі розмірність – це міра ентропії або хаотичності.

Вимірювання змінюється в залежності від порогу, і тому часто вимірюється як асимптотична межа по мірі наближення порога до нуля. Модифікацією даного методу виступає оцінка середньої неоднорідності процесу, за допомогою корозмірності  $C$ , результатом якої є різниця між розмірністю вкладення  $d$  та фрактальною розмірністю  $D$ :

$$C = D - d \quad (3)$$

Якщо  $C \neq 0$ , то процес називається фрактальним.

При низьких ступенях фрактальності (близьких до нуля) процес більш однорідний: екстремальних коливань мало. І навпаки, для більш високих значень  $C$ , властиві більш екстремальні події або коливання за порогом. Процес стає менш однорідним, більш короткочасним, більш рідкісним і більш нестійким.

Відносини між корозмірністю і симетричним масштабування задаються наступними рівняннями в яких  $\tau$  – це тимчасова шкала від 1 до  $T$ , де  $T$  – найбільший часовий масштаб;  $\mu$  – індекс;  $q$  – ряд показників масштабування. Симетрія масштабування має вигляд:

$$\mu(|Y_t - Y_{t-1}|^q) \approx [\mu(|Y_t - Y_{t-1}|^q)] \left[ (\tau / T)^{\zeta(q)} \right] \quad (4)$$

де  $\zeta$  – функція, яка включає в себе три параметри  $C_1$ ,  $H$ ,  $a$ :

$$\zeta(q) = qH - \{ [C_1 / (a - 1)] (q^a - q) \}, \text{ де } a \neq 1 \quad (5)$$

$$\zeta(q) = qH - (C_1 q \ln a), \text{ де } a = 1$$

$$\zeta(q) = qH - (C_1 q \ln a), \text{ де } a = 1 \dots \dots \dots \quad (6)$$

Параметр  $C_1$  – кодування, пов'язане з масштабуванням засобів вибірки. Коли  $C_1 = 0$ ,  $\zeta(q)$  є лінійним трендом. Коли  $C_1 \neq 0$ , кривизна осі  $\zeta(q)$  залежить від корозмірності і розподілу ймовірностей. Коефіцієнт  $a$  характеризує розподіл ймовірності. Випадок  $a = 2$  відповідає розподілу Гауса, тоді як  $a = 1$  відповідає розподілу Коші. Більшість економічних процесів показують  $1 < a < 2$ . У цьому випадку розподіл має більш важкі хвости, ніж стандартна норма, і дисперсія змінюється в часі. Цікавою властивістю рядів, як  $1 < a < 2$ , так і  $0 < C_1 < 1$ , є те, що інтеграція зазвичай не призводить до згладжування. Замість цього інтеграл буде показувати дискретні стрибки.

Враховуючи двоїсті властивості екстремальних подій і симетрії масштабування, природно розробляти моделі, здатні захоплювати обидві функції, в основу алгоритму аналізу фінансових часових рядів покладено лінгвістичне моделювання. Перехід стану визначається для переходу від стану низької або проміжної мінливості до екстремального стану і позначається набором. Модель переходу стану для валютного курсу може бути вказана як:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 S_{Et} X_t + \omega_4 S_{Et} [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \varepsilon_t \quad (7)$$

Стан є можливість передбачати ітеративно за допомогою форми регресії:

$$S_{Et+1} = \omega_0 + \omega_1 S_{Et} + \omega_2 X_t + \omega_3 (X_t - X_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (8)$$

де швидкість зміни, а також рівень обмінного курсу включений на фактичну ціну на золото на тій підставі, що у практичних застосуваннях це було знайдено для поліпшення результатів.

Ідея використання симетрії масштабування для прогнозування була спочатку запропонована у [13] для фізичних процесів, які демонструють сильні симетрії між великими і малими масштабами. Оскільки відносини пропорційності у фінансових часових рядах, як правило, обмежені короткими інтервалами, моделі тут використовують лише наближену симетрію. Для прогнозованої швидкості змін існує симетрія відносно останнього відставання:

$$(X_{t+1} - X_t) = \lambda_{1t} (X_{t+1} - X_{t-1}) \quad (9)$$

де  $\lambda_{1t}$  – коефіцієнт пропорційності, числовий коефіцієнт позначає відстань поділу на ФНЗ, а  $t$  – коефіцієнт вказує на зміну часу. Аналогічним чином, для темпів змін:

$$(X_t - X_{t-1}) = \lambda_{2t} (X_t - X_{t-2}) \quad (10)$$

рішення для  $\lambda_{2t}$ :

$$\lambda_{2t} = [(X_t - X_{t-1}) / (X_t - X_{t-2})] \quad (11)$$

Одна з практичних проблем в реалізації полягає в тому, що знаменники коефіцієнтів можуть містити нульові значення. Для обчислення відсутніх значень можна використовувати будь-яку кількість процедур інтерполяції. У разі якщо співвідношення невизначене, дані експоненціально згладжуються, і співвідношення на основі згладжених даних замінюються. Модель прогнозування для загального процесу:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 \lambda_{2t} + \varepsilon_t \quad (12)$$

Як зазначалося вище, більшість структурних рівнянь в макроекономіці не передбачають довгострокової фрактальності. Це доводить необхідність використання структурного рівняння і побудови шкали коефіцієнтів для залишкової частини:

$$(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}) = \gamma_{2t} (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-2}) \quad (13)$$

$$\gamma_{2t} = [(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}) / (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-2})] \quad (14)$$

де  $\gamma_{2t}$  – коефіцієнт пропорційності для залишку. Таким чином, модель прогнозування стає:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 \gamma_{2t} + \nu_t \quad (15)$$

де  $\nu_t$  – залишок від цієї регресії.

Основний недолік, пов'язаний з моделями, полягає в тому, що коефіцієнти шкали відомі тільки для поточного періоду. Крім того, в ході практичних випробувань коефіцієнти шкали часто були визнані занадто нестабільними для ефективного прогнозування. Розумним рішенням є коефіцієнт масштабування у дві компоненти, систематичний процес і залишок. Нехай  $\gamma_{2St}$  позначає системну компоненту у  $\gamma_{2t}$ . Як правило, прогнозист не знає форми цієї компоненти, але може оцінити її за допомогою регресії по лагах:

$$\gamma_{2St} = \omega_0 + \omega_1 \gamma_{2St-1} + \omega_2 \gamma_{2St-2} + \nu_t \quad (16)$$

Прогнозоване значення,  $\gamma_{2St+1}$ , потім включається в рівняння прогнозування. Отримуємо:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t + \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 \gamma_{2St+1} + \nu_t \quad (17)$$

Оцінка фрактальних параметрів заснована на масштабуванні логічних засобів абсолютних логічних різниць щодо збільшення відстаней поділу. По суті, це зв'язок між симетрією масштабування і функцією  $\zeta(q)$ . Індекс фрактальності є локальною фрактальною характеристикою фінансового часового ряду. На основі описаних методів аналізу та прогнозування будується загальний спосіб аналізу який проектується на формування програмного додатку.

У рамках даного дослідження запропоновано спосіб аналізу та прогнозування фінансового часового ряду за допомогою лінгвістичного моделювання, який передбачає масштабування часового ряду та виділення корозмірності.

Загальний спосіб аналізу та прогнозування фінансового часового ряду за допомогою лінгвістичного моделювання є можливість описати у кілька кроків, які виконуються у межах шести етапів, узагальнена схема виконання яких наведена на рис. 1.

Перший етап – Використання статистичних методів і візуалізація для попереднього аналізу фінансового часового ряду на предмет виявлення наявності або відсутності важких хвостів, трендів, циклічних або сезонних компонент і ін..

Другий етап – Агрегування фінансового часового ряду, з метою укрупнення економічних показників шляхом їх об'єднання в групу.



*\*власна розробка автора*

**Рис. 1. Структурна схема реалізації загального способу аналізу та прогнозування фінансового часового ряду за допомогою лінгвістичного моделювання**

Третій етап – Фрактальний аналіз фінансового часового ряду з метою встановлення в ньому таких характеристик і тенденцій, як трендостійкість або, навпаки, хаотичність, персистентність або антиперсистентність. Обчислювальна частина фрактального аналізу базується на визначенні корозмірності. Оцінки, одержувані на виході цього етапу, мають числову природу.

Четвертий етап – Формування симетрії масштабування фінансового часового ряду. Виявлення симетрії повороту, зсуву і масштабування у числових послідовностях фінансових рядів, з метою отримання числових показників перетворень, а також оцінки ступеня порушення симетрії.

П'ятий етап – Формування прогнозу для розглянутих фінансових часових рядів шляхом реалізації обчислень на базі побудованого алгоритму.

Шостий етап – Оцінка похибки отриманого прогнозу для розглянутих фінансових часових рядів.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розробок у даному напрямку.**

Визначено спосіб аналізу та прогнозування фінансового часового ряду з фрактальною структурою за допомогою лінгвістичного моделювання, який передбачає масштабування часового ряду та виділення корозмірності. Агрегування фінансового часового ряду, здійснюється з метою укрупнення економічних показників шляхом їх об'єднання в групу. Формування симетрії масштабування фінансового часового ряду виробляється з метою отримання числових показників



перетворень, а також оцінки ступеня порушення симетрії. Особливості запропонованого способу дозволяють аналізувати та прогнозувати фінансові часові ряди в умовах, коли існуючі методи, які використовують окремо апарат математичної статистики або інформаційних технологій, виявляються малоефективними.

Перспективи подальших розробок у даному напрямку базуються на програмній реалізації розробленого алгоритму та аналізі отриманих результатів.

#### Список використаних джерел:

1. Bachelier L. Theory of Speculation (Translation of 1900 French edn) / P.H. Cootner (Ed.) // The Random Character of Stock Market Prices, The MIT Press, Cambridge. 1964. P. 17 – 78.
2. Малинецкий Г.Г., Курдюмов С.П. Нелинейная динамика и проблемы прогноза // Вестник РАН, 2001. – т.71. – №3. – С. 44-46.
3. A.K. Vera and M.L. Higgins. ARCH models: properties, estimation and testing. – J. Econ. Surveys, 1993. – v. 7
4. Saupe [Efficient computation of Julia sets and their fractal dimension](#) // Physica, 1987. – В. 28D. – С. 358-370.
5. Урысон П. С. Труды по топологии и другим областям математики, т.1-2, М.-Л., 1951
6. Александровская Ю.П. Использование фрактальных методов для анализа финансовых рядов // Ю.П. Александровская / Вестник казанского технологического университета, Издательство: Казанский национальный исследовательский технологический университет (Казань), 2014. – Том 17, № 18. – С. 257-261.
7. Светлов Кирилл Владимирович. Стохастические методы анализа рынка заимствований: диссертация ... кандидата экономических наук: 08.00.13 / Светлов Кирилл Владимирович; [Место защиты: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет"]. – Санкт-Петербург, 2016. – 143 с.
8. Люю Ю. Методы и алгоритмы финансовой математики. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 751 с.
9. Бородин А. Н. Случайные процессы. – СПб.: Лань, 2012. – 640 с.
10. Gibson R., Lhabitant F., Talay D. Modeling the term structure of interest rates: A review of the literature // Foundations and Trends in Finance. – 2010. – Vol. 5. – no. 1-2
11. Ярушкіна, Н.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: Учебное пособие / Н.Г. Ярушкіна, Т.В. Афанасьева, И.Г. Перфильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2010 – 324 с
12. Mandelbrot B. 1997. Fractals and Scaling in Finance. Springer: New York.
13. Schertzer D, Lovejoy S, Schmitt F, Chigirinskaya Y, Marsan D. 1997. Multifractal cascade dynamics and turbulent intermittency. Fractals 5: 427–471.

Стаття надійшла до редакції 31.10.2017

УДК 693.542.4

**С.Ф. Неутов, М.М. Сидорчук, М.Г. Сур'янінов**  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗУЧОСТІ СТАЛЕФІБРОБЕТОНУ**

*Наведені результати двоетапних експериментальних досліджень міцностних і деформаційних характеристик фібробетону, армованого сталеву фібрую. На першому етапі обраний оптимальний відсоток фібрового армування і максимальний розмір фракції великого заповнювача. Визначена кубикова та призмоча міцність зразків із сталевіфробетону і звичайного бетону. На другому етапі досліджена повзучість фібробетону і звичайного бетону аналогічного складу при різних рівнях напружень. Побудовані криві повзучості. Показано, що застосування фібрового армування приводить до зниження деформації повзучості на 21 – 30 відсотків залежно від рівня напружень.*

*Ключові слова:* експериментальні дослідження, фібробетон, призмоча міцність, дисперсне армування, повзучість, крива повзучості.

**С.Ф. Неутов, М.М. Сидорчук, Н.Г. Сурьянинов**  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА**

*Приведены результаты двухэтапных экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик фибробетона, армированного стальной фиброй. На первом этапе выбран оптимальный процент фибрового армирования и максимальный размер фракции крупного заполнителя. Определена кубиковая и призмочная прочность образцов из сталевіфробетона и обычного бетона. На втором этапе исследована ползучесть фибробетона и обычного бетона аналігичного состава при разных уровнях напряжений. Построены кривые ползучести. Показано, что применение фибрового армирования приводит к снижению деформации ползучести на 21 – 30 процентов в зависимости от уровня напряжений.*

*Ключевые слова:* экспериментальные исследования, фибробетон, призмочная прочность, дисперсное армирование, ползучесть, кривая ползучести.

**S.F. Neutov, M.M. Sidorchuk, N.G. Suryaninov**  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
**INVESTIGATION OF CREEP OF STEEL FIBER CONCRETE**

*The results of two-stage experimental studies of the strength and deformation characteristics of fiber-reinforced concrete reinforced with steel fiber are presented. At the first stage, the optimal percentage of fiber reinforcement and the maximum size of the coarse aggregate fraction were selected. The cube and prismatic strength of samples made of steel-fiber concrete and ordinary concrete is determined. At the second stage, the creep of fiber-reinforced concrete and ordinary concrete of similar composition at different stress levels was investigated. Creep curves are constructed. It is shown that the use of fiber reinforcement leads to a decrease in creep strain by 21 to 30 percent, depending on the stress level.*

*Key words:* experimental research, fiber-reinforced concrete, prismatic strength, disperse reinforcement, creep, creep curve.

**Постановка проблеми.** В последние годы в строительной практике все большее применение находят фибробетоны, изготовленные на основе разных видов фибры, в зависимости от предполагаемой области применения фибробетона. Каждый вид фибры имеет свои преимущества и недостатки. Введение в бетон стальной фибры обеспечивает значительное повышение его механических и прочностных характеристик — увеличивается прочность при сжатии и прочность на растяжение при изгибе, сопротивление температурному воздействию и истиранию, повышается морозостойкость и трещиностойкость и др.

Исследования показывают, что применение стальной фибры весьма эффективно в несущих конструкциях [1 – 3]. Тем не менее, объем таких исследований явно недостаточен, что сдерживает практическое использование сталевіфробетонных конструкций. В частности, в литературе практически не отражен такой важнейший вопрос, как ползучесть сталевіфробетона.

**Целью** нашего исследования является изучение ползучести сталевіфробетона на стандартных образцах — призмах 100x100x400 мм [4].

**Результаты исследований.** Испытания проводились в два этапа. На первом этапе определялась кубиковая прочность сталевіфробетона на образцах 100x100x100 мм [4]. При этом варьировался процент дисперсного армирования, который составлял 0,5 %, 1,0 % и 1,5 %, а также размер фракции крупного заполнителя (щебень) — с размером фракции  $\leq 10$  мм в одной серии испытаний и  $\leq 20$  мм — во второй. Одновременно определялась кубиковая прочность обычного бетона при тех же размерах крупного заполнителя.

Обработка результатов первого этапа испытаний показала, что оптимальными характеристиками сталефибробетонной смеси является матрица с крупным заполнителем  $\leq 10$  мм при 1,0% фибрового армирования. Этот состав и был принят для проведения второго этапа испытаний — исследования ползучести на образцах-призмах 100x100x400 мм.

Во всех проведенных опытах использовался цемент марки 400 и промытый речной песок. Водоцементное отношение — 0,449.

Для дисперсного армирования использовалась фибра с загнутыми концами, изготовленная из высокопрочной проволоки с временным сопротивлением 1335 МПа. Основные характеристики фибры приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Основные характеристики фибры

Тип	Описание	Длина, мм	Диаметр, мм	$\sigma_{вр}$ , МПа	$E$ , Мпа	$\mu$
HE50	Фибра рубленая из проволоки	50	1,0	1335	200000	0,3

Используемая фибра выпускается производственным объединением "Стальканат-Силур" (Украина) в соответствии с Европейским стандартом EN14889-1: 2006 (рис. 1) [5].



Рис. 1. – Стальная фибра с загнутыми концами

Следует отметить, что перед разрушением кубиковых образцов из сталефибробетона наблюдалось трещинообразование по оси действия сжимающей нагрузки. Разрушение образцов из сталефибробетона с 0,5 % дисперсного армирования и обычного бетона носило хрупкий характер, в то время как при армировании 1,0 % и 1,5 % хрупкое разрушение не отмечено.

Для испытаний призм на ползучесть сначала определялись уровни длительного нагружения, которые составили 0,3; 0,4; 0,5; 0,67 и 0,8 от призмной прочности. Для ее определения образцы-призмы были доведены до разрушения. Разрушающая нагрузка составила 235 кН для обычного бетона и 252 кН для сталефибробетона. Соответственно, была определена призмная прочность:

для обычного бетона

$$R_b = \frac{F_b}{A} = \frac{235}{0,01} = 23500 \text{ кПа} = 23,5 \text{ МПа},$$

для сталефибробетона

$$R_{сфб} = \frac{F_{сфб}}{A} = \frac{252}{0,01} = 25200 \text{ кПа} = 25,2 \text{ МПа}.$$

По достижении того или иного уровня нагружения нагрузка фиксировалась и поддерживалась неизменной на протяжении 360 суток.

Опыты проводились на специальных стендах, предназначенных для испытаний на ползучесть (рис. 2).



Рис. 2. – Стенды для испытаний на ползучесть

На каждом стенде в одном ряду располагались две призмы: одна — из сталефибробетона, вторая — из обычного бетона, что обеспечивало одинаковую нагрузку на образцы на протяжении всего эксперимента.

При подготовке образцов на их боковых поверхностях разместили базу измерения продольных деформаций, установили крепежные приспособления и измерительные приборы — индикаторы часового типа (рис. 3).



Рис. 3. – Подготовка образцов

В табл. 2 приведены фрагменты показаний измерительных приборов для обычного бетона и сталефибробетона при уровне напряжений  $0,5R$ . Подобные таблицы составлены для всех

указанных выше уровней нагрузки, однако привести их здесь в полном объеме не представляется возможным ввиду ограниченного объема статьи.

Таблица 2

## Показания измерительных приборов при уровне напряжений 0,5R

Дата	зразок 1 (звичайний)				зразок 2 (сталевібробетон)			
	прав. індик.	лівий індик.	сер. знач.	ε	прав. індик.	лівий індик.	сер. знач.	ε
13.11.16	5,5	10	7,75	0,0003875	7,8	4,8	6,3	0,000315
.....								
14.12.16	7,8	12,9	10,35	0,0005175	9,8	7,5	8,65	0,000433
15.12.16	8,6	14	11,3	0,000565	10,5	8,4	9,45	0,000473
16.12.16	9,9	14,6	12,25	0,0006125	10,8	8,9	9,85	0,000493
.....								
12.01.17	17,4	22	19,7	0,000985	16,4	17	16,7	0,000835
13.01.17	17,8	22,1	19,95	0,0009975	16,8	17,3	17,05	0,000853
16.01.17	18	22,4	20,2	0,00101	17	17,9	17,45	0,000873
.....								
01.02.17	20,1	24,9	22,5	0,001125	18	19,9	18,95	0,000948
02.02.17	20,5	24,9	22,7	0,001135	17,9	20,5	19,2	0,00096
.....								
06.03.17	24	27,6	25,8	0,00129	20,7	24	22,35	0,001118
07.03.17	24	27,9	25,95	0,0012975	21	24,1	22,55	0,001128
.....								
24.04.17	27,2	30,7	28,95	0,0014475	23,8	28,1	25,95	0,001298
25.04.17	27,3	30,7	29	0,00145	23,8	28,1	25,95	0,001298
.....								
10.05.17	28	31	29,5	0,001475	24	28,9	26,45	0,001323
11.05.17	28,1	31,1	29,6	0,00148	24,2	29,1	26,65	0,001333
.....								
28.08.17	33	35,1	34,05	0,0017025	29	34,2	31,6	0,00158
29.08.17	33	35,1	34,05	0,0017025	29	34,2	31,6	0,00158
.....								
26.09.17	33,1	35,3	34,2	0,00171	29,1	34,5	31,8	0,00159
27.09.17	33,1	35,4	34,25	0,0017125	29,1	34,6	31,85	0,001593
24.10.17	33,1	35,5	34,3	0,001715	29	34,1	31,55	0,001578
.....								
25.10.17	33,1	35,5	34,3	0,001715	29	34,1	31,55	0,001578
.....								
07.11.17	33,1	35,5	34,3	0,001715	29,1	34,5	31,8	0,00159

Кривые ползучести, построенные путем математической обработки результатов испытаний, показаны на рис. 4-6. При этом первое значение  $\varepsilon$ , указанное в таблице, при построении кривых ползучести принято в качестве условного нуля [6 – 8].

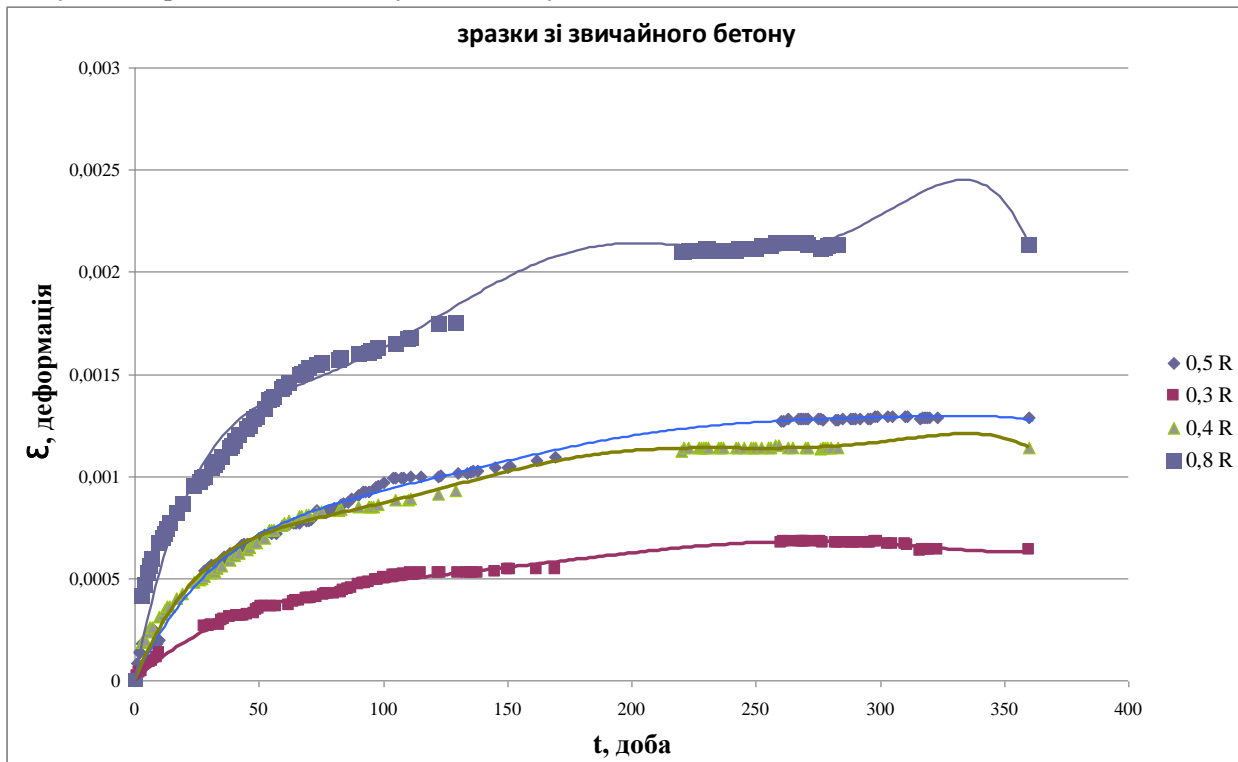


Рис. 4. – Кривые ползучести для обычного бетона

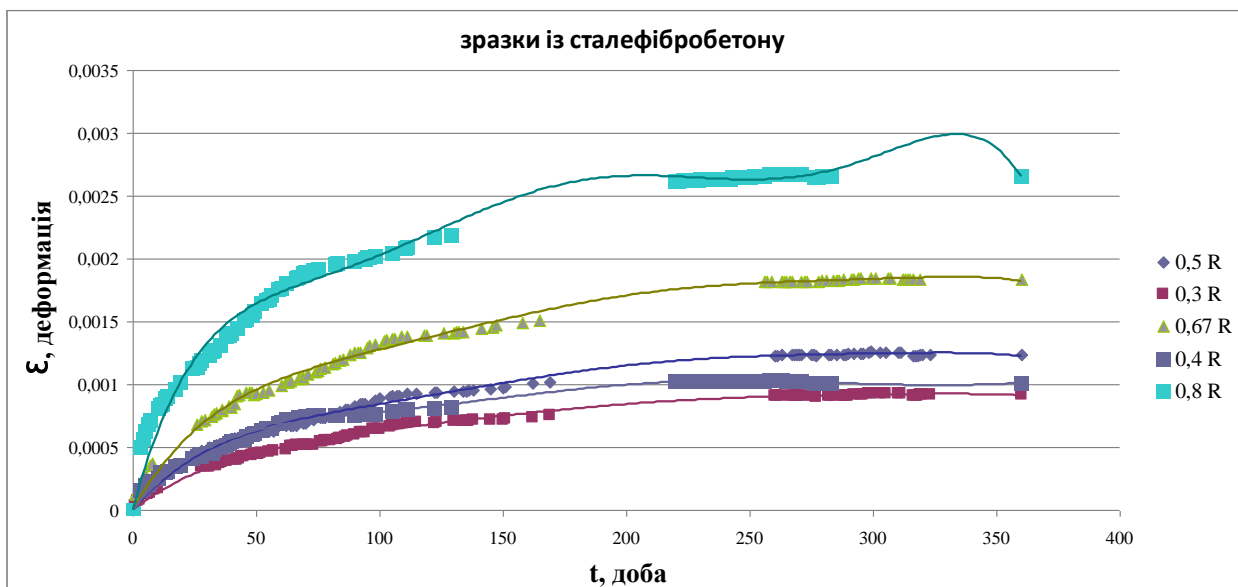


Рис. 5. – Кривые ползучести для сталефибробетона



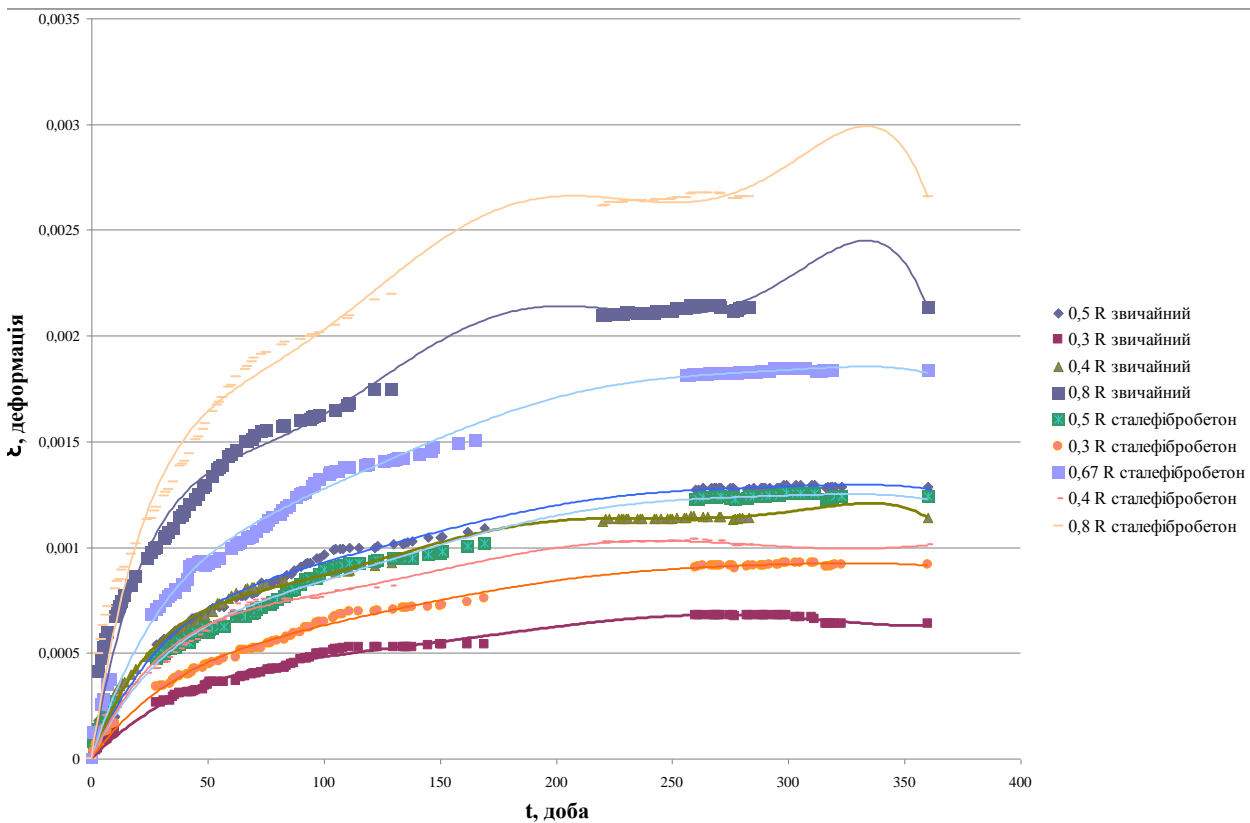


Рис. 6. – Сводные кривые ползучести

**Выводы.** Выполненные экспериментальные исследования прочности образцов сталефибробетона в форме кубиков и призм показали, что разрушение образцов с 0,5% дисперсного армирования носит хрупкий характер, который не наблюдается при 1,0% и 1,5% дисперсного армирования.

Определены оптимальные характеристиками сталефибробетонной смеси — матрица с крупным заполнителем фракции  $\leq 10$  мм при 1,0 % фибрового армирования.

Сравнение результатов испытаний образцов из обычного бетона и армированных стальной фиброй показало, что дисперсное армирование приводит к увеличению прочности бетона на сжатие в 1,35 раза и прочности на растяжение при изгибе — в 3,4 раза. При этом деформации ползучести снижаются на 21 - 30 процентов, в зависимости от уровня напряжений.

1. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / Ф. Н. Рабинович. — М.: Изд-во АСВ, 2004. — 560 с.

2. Талантова К.В. Сталефибробетон с заданными свойствами и строительные конструкции на его основе: дисс. ... д-ра. техн. наук / К.В. Талантова. — Барнаул, 2013. — 287 с.

3. Смирнов Д.А. Упругость и ползучесть сталефибробетона: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. А. Смирнов. — СПб., 2011. — 20 с.

4. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. — К.: Мінрегіонбуд України, 2011. — 73 с.

5. BS EN 14889-1:2006 Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity.

6. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. — М.: Высшая школа, 1968. — 512 с.

7. Пикуль В.В. Прикладная механика деформируемого твердого тела / В.В. Пикуль. — М.: Наука, 1989. — 220 с.

8. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. — М.: Наука, 1988. — 712 с.

Стаття надійшла до редакції 06.11.2017

УДК 631.331.85

**М.І. Пилипець, В.Р. Паньків****Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
КОМБІНОВАНОГО ГВИНТОВОГО ТРАНСПОРТЕРА**

*Удосконалення існуючих конструкцій гвинтових транспортних механізмів і обґрунтування їх раціональних параметрів і режимів роботи дозволяє істотно підвищити продуктивність роботи та надійність виконання технологічних операцій. При цьому шнекові конвеєри за ознакою своїх конструктивних особливостей можуть одночасно виконувати декілька суміжних функцій і операцій – змішування продуктів, подрібнення або дроблення матеріалів, дозування тощо. Послідовне виконання однієї або декількох технологічних операцій, поряд з транспортуванням матеріалів, яке притаманне комбінованим гвинтовим транспортерам, є їх визначальною ознакою. В статті наведено основні положення методології та методики проведення експериментальних досліджень макетного зразка комбінованого гвинтового транспортера. Реалізацію експериментальних досліджень з визначення продуктивності роботи та затрат споживчої потужності технологічного процесу одночасного транспортування та подрібнення коренеплодів шнековим конвеєром проводили на основі математичного планування факторних експериментів. При цьому застосовували стандартні та розроблені часткові методики.*

*Ключові слова:* шнековий конвеєр, планований експеримент, вхідні фактори, параметр оптимізації, продуктивність, затрати потужності.

**М.И. Пилипець, В.Р. Паньків****МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
КОМБИНИРОВАННОГО ВИНТОВОГО ТРАНСПОРТЕРА**

*Совершенствование существующих конструкций винтовых транспортных механизмов и обоснование их рациональных параметров и режимов работы позволяет существенно повысить производительность работы и надежность выполнения технологических операций. При этом шнековые конвейеры по признаку своих конструктивных особенностей могут одновременно выполнять несколько смежных функций и операций - смешивание продуктов, измельчения или дробления материалов, дозирование и тому подобное. Сочетание выполнения одной или нескольких технологических операций, наряду с транспортировкой материалов, которое присуще комбинированным винтовым транспортерам, является их определяющим признаком. В статье приведены основные положения методологии и методики проведения экспериментальных исследований макетного образца комбинированного винтового транспортера. Реализацию экспериментальных исследований по определению производительности работы и затрат потребляемой мощности технологического процесса одновременной транспортировки и измельчения корнеплодов шнековым конвейером проводили на основе математического планирования факторных экспериментов. При этом применяли стандартные и разработанные частичные методики.*

*Ключевые слова:* шнековый конвейер, планируемый эксперимент, входные факторы, параметр оптимизации, производительность, затраты мощности.

**M. Pilipets, V. Pankiv****METHODOLOGY FOR CONDUCTING EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF  
COMBINED SCREW TRANSPORTER**

*Improvement of existing structures of screw transport mechanisms and justification of their rational parameters and operating modes allows to significantly increase the productivity and reliability of the performance of technological operations. At the same time screw conveyors on the basis of their design features can simultaneously perform several related functions and operations - mixing products, grinding or crushing materials, dosing and the like. The combination of the performance of one or several technological operations, along with the transportation of materials, which is inherent in combined screw conveyors, is their defining feature. The article contains the main provisions of the methodology and methodology for carrying out experimental studies of the prototype of a combined screw conveyor. Realization of experimental studies to determine the productivity of work and the costs of consumed power of the technological process of simultaneous transportation and grinding of root crops by a screw conveyor were carried out on the basis of mathematical planning of factor experiments. Standard and developed partial methods were used.*

*Key words:* screw conveyor, planned experiment, input factors, optimization parameter, productivity, power costs.

**Постановка проблеми.** Гвинтові транспортери, у якості транспортних механізмів застосовують в аграрній сфері виробництва, переробній та харчовій галузях промисловості, специфіка яких обумовлена наявністю широкої гами технологічних процесів збирання та переробки продукції рослинництва. Розробка високоефективних технологічних процесів транспортування, як одиночних кускових, так і сипучих матеріалів вимагає інтегрованого наукового підходу до вирішення задач подальшого удосконалення гвинтових механізмів транспортних систем машин з метою підвищення їх показників роботи [1]. Поставлені завдання вирішуються на основі подальшого удосконалення методології та методики оптимізації



технологічних показників процесу транспортування матеріалів і конструктивно-кінематичних параметрів та режимів роботи транспортних систем.

У загальному аспекті об'єктом дослідження макетного зразка комбінованого гвинтового транспортера (комбінованого ГТ) є технологічний процес одночасного переміщення та подрібнення матеріалу транспортування, або коренеплодів. При цьому складовими компонентами технологічного процесу одночасного переміщення та подрібнення коренеплодів є дослідження зміни технологічних параметрів, або зміни продуктивності роботи та споживчих затрат енергії залежно від конструктивно-технологічних параметрів структурних елементів комбінованого ГТ, або основного робочого органу – шнекового конвеєра. Предметом досліджень є конструктивно-кінематичні параметри робочих органів комбінованого ГТ, які забезпечують виконання технологічного процесу одночасного переміщення та подрібнення коренеплодів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз сучасного стану функціонування гвинтових транспортних механізмів [2-8] показав, що існують значні передумови для проведення подальших наукових робіт, які спрямовані на розробку, дослідження та впровадження в виробництво енергозберігаючих, високотехнологічних комбінованих ГТ, які забезпечують ефективне виконання суміжних функціональних операцій, як транспортування, так і одночасного подрібнення сировини з продуктів сільськогосподарського виробництва в процесі її переробки.

Відсутність узагальнених емпіричних моделей процесу функціонування робочих елементів шнекового конвеєра, який одночасно виконує дві операції транспортування та подрібнення коренеплодів і комбінованого ГТ загалом зумовило проведення даних досліджень.

В цьому аспекті емпірична модель транспортної системи повинна більшою мірою адекватно описувати закономірності, принципи та в меншій – форму їх реалізації в конкретному робочому випадку.

**Постановка завдань.** Метою досліджень є удосконалення методології та методів оптимізації параметрів і режимів роботи транспортних систем машин.

На основі проведеного аналізу технологічних процесів роботи транспортних систем було встановлено головні основоположні процеси, які повинна відображати емпірична модель: взаємодію окремих конструктивних елементів у транспортній системі; сутність характеру технологічного процесу одночасного подрібнення та транспортування коренеплодів.

Все це дозволить на науковому рівні розробити методики і методології обґрунтування, розрахунку та оптимізації параметрів і режимів роботи транспортних систем і навести раціональні рекомендації застосування транспортних механізмів.

**Викладення основного матеріалу.** В загальному контексті методика експериментальних досліджень комбінованого ГТ базувалися на основі загальних положень планування, проведення, обробки експериментального масиву та аналізу одержаних результатів планованих факторних експериментів із використанням прикладних програм для комп'ютера.

При проведенні експериментальних досліджень побудовану структурну модель макетного зразка комбінованого ГТ (рис. 1) подано у вигляді багатовимірної складної динамічної системи «вхід-вихід», або кібернетичного поняття “чорного ящика” [9].

Вхідними величинами, або змінними вхідними факторами багатовимірної складної динамічної системи (структурної моделі макетного зразка комбінованого ГТ) є технологічні параметри функціонального процесу транспортування матеріалу та конструктивно-кінематичні параметри основного робочого органу, тобто шнекового конвеєра. Вихідними величинами, або параметрами оптимізації є основні технологічні показники процесу, який моделюється.

Для експериментального дослідження продуктивності роботи  $Q_{ek}^{(\alpha_{iv})}$  (кг/с) та питомих затрат споживчої потужності  $P_{ek}$  (Вт) комбінованого ГТ було використано розроблений макетний зразок лабораторної установки, рис. 2.

Лабораторна установка складається з рами 1 (рис. 2) на якій змонтовано комбінований ГТ 2 і електродвигун 3. Вона також має клинопасову передачу 4, керуючий мультисистемний пристрій 5 ALTIVAR 71, комп'ютер 6, комунікаційне з'єднання 7 пристрою з електродвигуном і комп'ютером.

Комбінований ГТ являє собою горизонтальну направляючу трубу 8 (рис. 2) в середині якої змонтовано шнековий конвеєр 9, який виконано у вигляді барабана 10 на якому по гвинтовій лінії встановлено спіральні витки 11. Між спіральними витками також по гвинтовій лінії закріплено ножі-подрібнювачі 12.

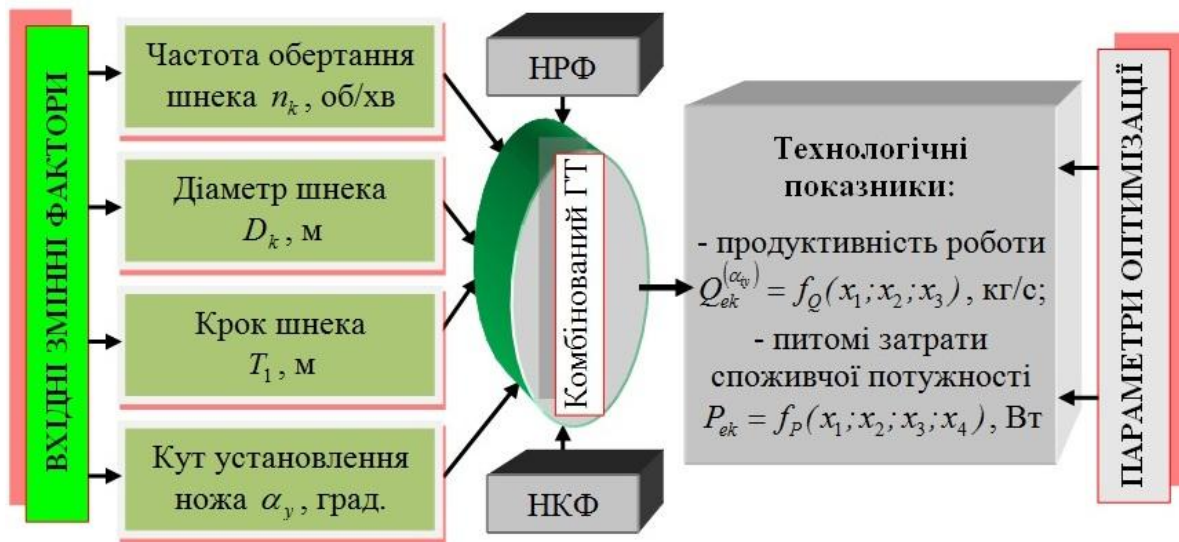


Рис. 1. Структурна модель проведення досліджень комбінованого ГТ

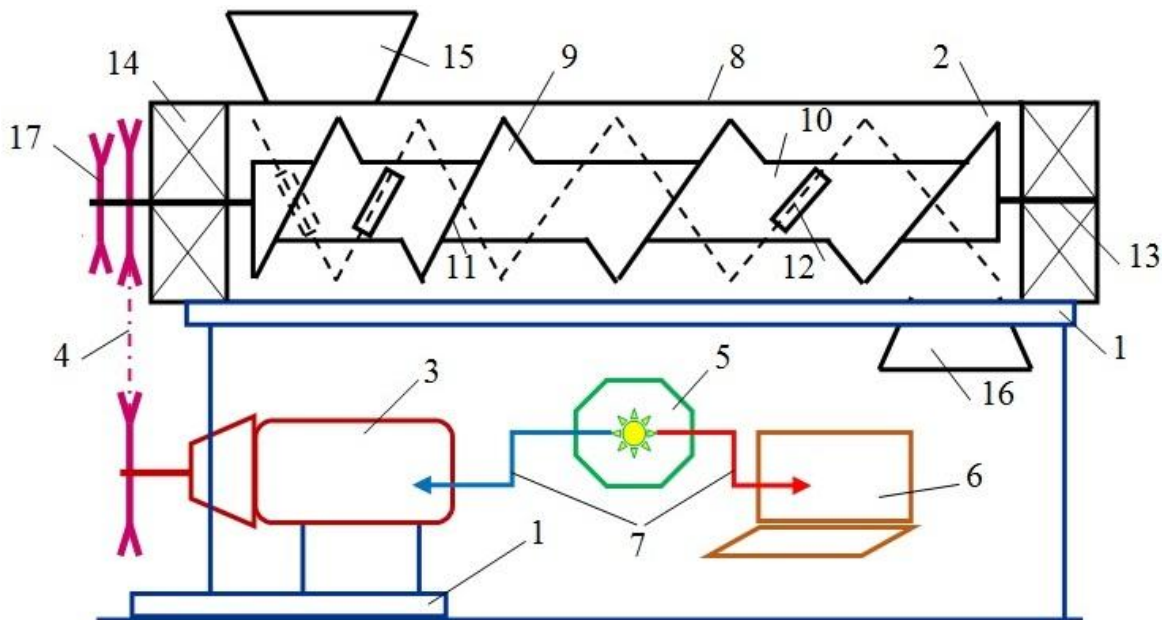


Рис. 2. Конструктивна схема лабораторної установки: 1 – рама; 2 – комбінований ГТ; 3 – електродвигун; 4 – клинопасова передача; 5 – керуючий пристрій Altivar 71; 6 – комп'ютер; 7 – комутаційне з'єднання; 8 – направляюча труба; 9 – шнековий конвеєр; 10 – барабан; 11 – спіральний виток; 12 – ніж; 13 – вал; 14 – підшипникова опора; 15, 16 – завантажувальна та вивантажувальна горловина; 17 – шків

В торцях барабана шнекового конвеєра закріплено вали 13, на які посаджено підшипникові опори 14, які встановлено в торцях направляючої горизонтальної труби. Направляюча горизонтальна труба має завантажувальну 15 та вивантажувальну 16 горловини. З боку завантажувальної горловини на вал посаджено шків 17. Привод робочих органів комбінованого ГТ відбувається шляхом передачі крутного моменту від електродвигуна макетного зразка лабораторної установки до шнекового конвеєра за рахунок клинопасової передачі. Ножі-подрібнювачі встановлено на барабані шнекового конвеєра з можливістю регулювання кута установки відносно горизонтальної осової лінії шнекового конвеєра.

Лабораторна установка працює наступним чином.

Кнопкою пускової установки приводять в рух вал електродвигуна 3 (рис. 2), обертання якого за допомогою клинопасової передачі 4 передається валу 13, який приводить в обертальний

рух барабан 8 шнекового конвеєра 9. Коренеплоди через завантажувальну горловину 15 подаються до шнекового конвеєра, де ножі 12, які встановлено на барабані, за рахунок свого обертання подрібнюють коренеплоди методом їх різання, а спіральні витки 11 одночасно з подрібненням коренеплодів ножами транспортують подрібнені коренеплоди вздовж осі обертання барабана 8 до вивантажувальної горловини 16.

Для плавного керування частоти обертання вала електродвигуна і відповідно шнекового конвеєра комбінованого ГТ 6 та проведення експериментальних досліджень використовувалось стандартне ліцензоване програмне забезпечення Power Suite V2.3.0, яке призначене для регулювання керуючого мультисистемного пристрою 3 Altivar 71 (рис. 2) та узгодження його мультисистемних багатоканальних перетворювачів частоти, пристроїв плавного пуску системи Altistart 48, сервоприводів Lexium і інтелектуальних пускачів, а також для зчитування даних з керуючого мультисистемного пристрою 3 та їх виведення на монітор комп'ютера 4 у вигляді числових значень або їх графічного відтворення.

Алгоритм проведення експериментальних досліджень комбінованого ГТ формалізованого у вигляді структурної моделі (рис. 1) передбачає визначення функціональних закономірностей впливу окремих вхідних факторів і їх взаємодію на вихідну величину, або параметр оптимізації.

Для отримання емпіричного рівняння регресії, яке характеризує зміну продуктивності роботи  $Q_{ke}$  макетного зразка лабораторної установки комбінованого ГТ залежно від параметрів шнекового конвеєра, реалізували планований трифакторний експеримент типу ПФЕ 3<sup>3</sup>, при цьому незалежними змінними факторами приймали: частоту обертання шнекового конвеєра  $n_k$ , яку кодували індексом  $x_1$ , тобто  $n_k \rightarrow x_1$ ; діаметр шнекового конвеєра  $D_k$ , який кодували індексом  $x_2$ , тобто  $D_k \rightarrow x_2$ ; крок першого витка шнекового  $T_1$ , який кодували індексом  $x_3$ , тобто  $T_1 \rightarrow x_3$ . Таким чином для дослідження продуктивності роботи  $Q_{ke}$  комбінованого ГТ було вибрано апроксимуючу математичну модель у вигляді функціональної залежності  $Q_{ke} = f_Q(x_1; x_2; x_3)$ .

Для отримання емпіричного рівняння регресії, яке характеризує питомі затрати споживчої потужності  $P_{ke}$  макетного зразка лабораторної установки комбінованого ГТ залежно від параметрів шнекового конвеєра, реалізували планований чотирифакторний експеримент типу ПФЕ 3<sup>4</sup>, при цьому незалежними змінними факторами приймали: частоту обертання шнекового конвеєра  $n_k$ , яку кодували індексом  $x_1$ , тобто  $n_k \rightarrow x_1$ ; діаметр шнекового конвеєра  $D_k$ , який кодували індексом  $x_2$ , тобто  $D_k \rightarrow x_2$ ; крок першого витка шнекового  $T_1$ , який кодували індексом  $x_3$ , тобто  $T_1 \rightarrow x_3$ ; кут установлення ножа  $\alpha_y$ , який кодували індексом  $x_4$ , тобто  $\alpha_y \rightarrow x_4$ ; Таким чином для дослідження питомих затрат споживчої потужності  $P_{ke}$  комбінованого ГТ було вибрано апроксимуючу математичну модель у вигляді функціональної залежності  $P_{ek} = f_P(x_1; x_2; x_3; x_4)$ .

Порядок побудови та реалізації експериментальних досліджень з визначення продуктивності роботи  $Q_{ke}$  та питомих затрат потужності  $P_{ke}$  комбінованого ГТ, або функціональної залежності, відповідно,  $Q_{ke} = f_Q(x_1; x_2; x_3)$  і  $P_{ek} = f_P(x_1; x_2; x_3; x_4)$  був наступним: кодування змінних вхідних факторів, або  $n_k \rightarrow x_1$ ,  $D_k \rightarrow x_2$ ,  $T_1 \rightarrow x_3$ ,  $\alpha_y \rightarrow x_4$ ; розробка таблиці вхідних факторів, визначення верхнього і нижнього рівня варіювання кожного фактора та інтервалу його варіювання; визначення загального числа експериментів однієї повторності; складання план-матриці порядку проведення експериментів; проведення рандомізації план-матриці; реалізацію експериментів згідно з рандомізованою план-матрицею; обробку експериментального масиву даних з метою одержання емпіричного рівняння регресії з визначенням виду функціональної залежності та її коефіцієнтів; перевірку відтворюваності одержаних експериментальних даних; оцінку значущості коефіцієнтів регресії; перевірку адекватності отриманої математичної моделі реальному експериментальному процесу; проведення графо-аналітичного аналізу результатів експериментальних досліджень і висновків.

При складанні план-матриці експериментів вводили кодовані позначення верхнього (+1), нижнього (-1) та нульового (0) рівнів варіювання факторами, [8], тобто трифакторний і

чотирифакторний експерименти провели на трьох рівнях варіювання входними факторами, або реалізували планований експеримент типу ПФЕ  $3^3$  і ПФЕ  $4^3$ .

Результати кодування змінних входних факторів, верхній і нижній рівень варіювання кожного фактора та інтервал його варіювання під час проведення експериментальних досліджень макетного зразка комбінованого ГТ наведено у табл. 1.

Таблиця 1

## Результати кодування факторів та рівні їх варіювання

Фактори	Позначення		Інтервал варіювання	Рівні варіювання, натуральні/кодовані		
	Натур.	Кодовані				
Частота обертання шнекового конвеєра $n_k$ , об/хв	$X_1$	$x_1$	100	100/-1	200/0	300/+1
Діаметр шнекового конвеєра $D_k$ , м	$X_2$	$x_2$	0,04	0,12/-1	0,16/0	0,2/+1
Крок шнекового конвеєра $T_1$ , м	$X_3$	$x_3$	0,03	0,05/-1	0,08/0	0,11/+1
Кут установлення ножа $\alpha_y$ , град.	$X_4$	$x_4$	5	25/-1	30/0	35/+1

Після кодування змінних входних факторів, тобто  $n_k \rightarrow x_1$ ,  $D_k \rightarrow x_2$ ,  $T_1 \rightarrow x_3$ ,  $\alpha_y \rightarrow x_4$  склали план-матрицю порядку проведення планового трифакторного та чотирифакторного експерименту типу ПФЕ  $3^3$  і ПФЕ  $4^3$  та проводили їх рандомізацію методом випадкового балансу шляхом застосування таблиці випадкових чисел [10].

Грубе регулювання частоти обертання вала шнекового конвеєра  $n_k$  комбінованого ГТ проводили шляхом перестановки шківів 17 відповідного діаметра (рис. 2) клинопасової передачі 4, а необхідну частоту обертання шнекового конвеєра  $n_k$  під час проведення експериментів встановлювали за допомогою команди з панелі керування електродвигуном керуючого мультисистемного пристрою Altivar 71.

Продуктивність роботи  $Q_{ke}$  комбінованого ГТ визначали за формулою

$$Q_{ke} = M_k / t_e, \quad (1)$$

де  $M_k$  – маса вивантаженого матеріалу (подрібнених коренеплодів) з вивантажувальної горловини лабораторної установки, кг.

$t_o$  – час проведення одного експерименту, с.

Час проведення кожного експерименту приймали постійним і рівним  $t_e = const = 10$  с. Масу  $M_k$  вивантаженого матеріалу (подрібнених коренеплодів) з вивантажувальної горловини лабораторної установки зваженого з точністю  $\pm 0,1$  кг.

Питомі затрати потужності  $P_{ke}$  комбінованого ГТ визначали за формулою

$$P_{ke} = N_{ke} / Q_{ke} L_k, \quad (1)$$

де  $N_{ke} = M_{ke} n_k / 9750$  – потужність на приводі шнекового конвеєра, кВт;

$n_k$  – частота обертання шнекового конвеєра, об/хв.

$L_k$  – довжина робочої частини шнекового конвеєра, м.

Отримані експериментальні значення продуктивності роботи  $Q_{ke}$  та питомих затрат потужності  $P_{ke}$  комбінованого ГТ, або функціональної залежності  $Q_{ke} = f_Q(x_1; x_2; x_3)$  і  $P_{ek} = f_P(x_1; x_2; x_3; x_4)$  для граничних значень відповідних точок композиційного плану трифакторного та чотирифакторного експерименту типу ПФЕ  $3^2$  і ПФЕ  $4^3$  заносили у відповідні графі рандомізованої план-матриці експериментів.

Обробку отриманого експериментального масиву даних проводили за загальновідомими методиками та методами статистичної обробки для отримання емпіричної математичної моделі  $Q_{ke} = f_Q(x_1; x_2; x_3)$  і  $P_{ek} = f_P(x_1; x_2; x_3; x_4)$  з використанням методик кореляційного і регресійного аналізу, які характеризують вплив факторів і їх взаємодію на зміну продуктивності роботи  $Q_{ke}$  та питомих затрат потужності  $P_{ke}$  комбінованого ГТ.

**Висновки.** Основою проведення експериментальних досліджень технологічних показників роботи комбінованого ГТ (продуктивності роботи та питомих затрат потужності) є математичне планування та реалізації планованих багатофакторних експериментів шляхом розробки та побудови структурної моделі об'єкта дослідження. Планування та проведення, обробка та аналіз отриманих результатів досліджень виконано на основі загальновідомих і розроблених часткових методик.

#### Список використаних джерел:

1. Гевко Ів.Б. Науково-прикладні основи створення гвинтових транспортно-технологічних механізмів : автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11 / Ів.Б. Гевко. – Львів, 2013. – 40 с.
2. Nevko R.V. Mathematical model of the pneumatic-screw conveyor screw mechanism operation / R.V. Nevko, V.O. Dzyura, R.M. Romanovsky // INMATEH. Agricultural engineering. – 2014. – Vol. 44. – No.3. – P. 103–110.
3. Гевко І. Б. Гвинтові транспортно-технологічні механізми: розрахунок і конструювання / І. Б. Гевко. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 307 с.
4. Рогатинський Р. Модель конструювання і вибору гвинтових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями / Р. Рогатинський, І. Гевко // Вісник ТНТУ. – 2012. – № 3 (67). – С. 197–210.
5. Nevko R.V. The investigation of the process of a screw conveyer safety device actuation / R.V. Nevko, O.M. Klendiy // INMATEH. Agricultural engineering. – 2014. – Vol. 42. – No.1. – P. 55–60.
6. Рогатинський Р. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем / Р. Рогатинський, І. Гевко, Л. Рогатинська // Вісник ТНТУ. – 2013. – № 1 (69). – С. 123–230.
7. Вайсон А.А. Подъемно-транспортные машины / А.А. Вайсон. – М.: Машиностроение, 1975. – 431 с.
8. Гевко І. Синтез змішувачів з гвинтовими робочими органами / І. Гевко, Р. Любачівський, А. Дячун // Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. – 2012. – № 16. – С. 237–246.
9. Крутов В.И. Основы научных исследований / В.И. Крутов, В.В. Попов ; под ред. В.И. Крутова. – М. : Высшая школа, 1989. – 363 с.
10. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М. : Мир, 1972. – 374 с.

#### Рецензенти:

**Барановський Віктор Миколайович**, доктор технічних наук, професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**Голуб Генадій Анатолійович**, Національний університет біоресурсів і природокористування України

Стаття надійшла до редакції 02.11.2017

УДК 621.926.77

Ю.С. Повстяна<sup>1</sup>, В.Й. Шенфельд<sup>2</sup>, О.Б. Янченко<sup>2</sup>, І.В. Савюк<sup>1</sup>, Л.М. Самчук<sup>1</sup><sup>1</sup> Луцький національний технічний університет<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет**СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОРИСТОЇ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ ОКАЛИНИ СТАЛІ ТА САПОНІТУ**

Досліджено структуру нової пористої кераміки. Аналіз електронних мікрофотографій показав світлі включення в структурі. Розподіл ділянок відновленого заліза дозволяє припустити, що відбувається подальше зростання металевих фрагментів а одночасно із зростанням областей відновленого заліза відбувається фазорозподілення – переміщення заліза в напрямку оксиду алюмінію. Основною складовою продуктів реакції є оксид алюмінію з рівноважними параметрами решітки. У структурі кінцевого продукту алюміній присутній у вигляді полів розміром від 10 до 300 мкм, форма яких подібна до форми областей відновлення заліза в продуктах реакції відновлення оксиду заліза (IV). Дослідження структур матеріалу включає стадії розплавлення вихідного фериту окалини, утворення первинних зародків у результаті відновної реакції, їх зростання і злиття в протяжні області в процесі фазорозподілення. У структурі матеріалу представлена також оксидна матриця, основу якої складає оксид алюмінію  $Al_2O_3$  з включенням залишків оксидів заліза  $Fe_2O_3$ . Металевий компонент продукту представлений твердим розчином на основі заліза.

**Ключові слова:** металокераміка, сапоніт, окалина, самопоширюваний високотемпературний синтез.

**Ю.С. Повстяна, В.И. Шенфельд, О.Б. Янченко, И.В. Савюк, Л.М. Самчук  
СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКАЛИНЫ  
СТАЛИ И САПОНИТА**

Исследована структура новой пористой керамики. Анализ электронных микрофотографий показал светлые включения в структуре. Распределение участков восстановленного железа позволяет предположить, что происходит дальнейший рост металлических фрагментов и, одновременно с ростом областей восстановленного железа происходит фазоразделение – перемещение железа в направлении оксида алюминия. Основной составляющей материала является оксид алюминия с равновесными параметрами решетки. В структуре конечного продукта алюминий присутствует в виде полей размером от 10 до 300 мкм, форма которых подобна форме областей восстановления железа в продуктах реакций восстановления оксида железа (IV). Исследования структур материала включает стадии расплавления исходного феррита окалины с образованием первичных зародышей в результате восстановительной реакции, их рост и слияние в протяженные области в процессе фазоразделения. В структуре продукции представлена также оксидная матрица, основу которой составляет оксид алюминия  $Al_2O_3$  с включенным остатков оксидов железа  $Fe_2O_3$ . Металлический компонент продукта представлен твердым раствором на основе железа, которые имеют переменный состав по площади шлифа.

**Ключевые слова:** металлокерамика, сапонит, окалина, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

**Yu. Povstiana, V. Shenfeld, A. Yanchenko, I. Savyuk, L. Samchuk  
STRUCTURAL FEATURES OF PERSISTENT CERAMICS ON THE BASIS OF STEEL  
AND SAPONITE**

The structure of the new porous ceramic is investigated. The analysis of electron micrographs during observation showed the light inclusion in the structure. The distribution of the sites of reduced iron suggests that further growth of metal fragments occurs, simultaneously with the growth of the regions of reduced iron, phase separation takes place-the movement of iron in the direction of aluminum oxide. The main phase of production is also aluminum oxide with equilibrium lattice parameters. In the structure of the final product, aluminum is present in the form of fields ranging in size from 10 to 300  $\mu m$ , whose structure is similar to the structure of the iron reduction regions in the products of reduction reactions of iron (IV) oxide. Can be deduced from the study of material structures including the stages of melting the initial ferrite scale, the formation of primary nuclei as a result of the reduction reaction, their growth and fusion into extended regions during phase separation. In the structure of the products there is also an oxide matrix based on aluminum oxide  $Al_2O_3$  with the inclusion of iron oxide residues  $Fe_2O_3$ . The metallic component of the product is represented by a solid solution based on iron, which have a variable composition over the area of the section.

**Keywords:** metal, saponite, scale, the SHS.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з розвитком сучасної техніки до традиційних керамічних виробів в останні роки висуваються більш жорсткі вимоги, що вимагає необхідність створення нових матеріалів із заданим комплексом фізико-хімічних властивостей. До таких матеріалів відносять пористі керамічні матеріали, що повинні мати великий термін служби, високий тепловий опір, екологічну безпеку, пожежобезпечність, стійкість до побутових впливів, механічну міцність, простоту застосування та характеризуються низькою вартістю. Значні перспективи мають оксидні спечені матеріали завдяки високій жаростійкості, твердості й корозійній тривкості.

Пористі керамічні фільтрувальні матеріали мають ряд переваг перед фільтрувальними елементами з інших матеріалів (міцність, стійкість до дії високих температур і агресивних середовищ) та широко використовуються в сучасному виробництві. Одним з передових методів отримання пористих проникливих керамічних і металокерамічних матеріалів є енергозберігаючий процес високотемпературного синтезу (СВС), відкритий академіком А.Г. Мержановим. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що останнім часом метод СВС широко використовується в області створення пористих керамічних матеріалів. Поняття високотемпературного синтезу (СВС) має на увазі процес реалізації екзотермічної реакції в сумішах хімічних елементів і сполук. Успішне впровадження СВС-процесів для отримання вогнетривких та тугоплавких матеріалів можливо тільки після отримання експериментальних даних про структурно-фазові перетворення в ході СВС в різних системах, вивчення фізико-хімічних способів впливу на процес синтезу і властивості матеріалів, а також розробки технологічних параметрів їх отримання.

На машинобудівних заводах, у результаті різних технологічних операцій, утворюється велика кількість невикористаних відходів у вигляді стружки, відходів ливарного і ковальського виробництва, що містять оксиди заліза і легуючі елементи. Ці відходи на більшості підприємств не використовуються, а іноді є джерелами забруднення навколишнього середовища. Використання таких відходів для синтезу нових керамічних матеріалів із застосуванням СВС-процесу дозволить покращити економічні показники та вирішити проблему утилізації відходів. Цей напрям є актуальним оскільки дозволяє вирішити питання ресурсо- та енергозбереження, екологічної безпеки, має значний економічний ефект та спрямований на встановлення фізико-хімічних основ нової енергозберігаючої технології синтезу пористих керамічних фільтрувальних матеріалів багаторазового використання.

**Метою роботи** є вивчення структуроутворення отриманої пористої кераміки методом високотемпературного синтезу на основі порошків окалини сталі 18Х2Н4МА, природнього мінералу – сапоніту, порошку  $Al_2O_3$  та пороутворювачів різного хімічного складу.

**Аналіз літературних джерел:** В роботі [1] пориста кераміка отримана з використанням пороутворювача має структуру з бімодальному розподілом пор (макро- і мезопори) та середнім розміром пор  $\sim 1000$  нм, відкрита пористість - 45%. З використанням методу структурного вилуговування отримані каналоутворені пори (мезопори) з діаметром 10 - 50 нм, відкрита пористість - 35%.

Авторами [2] проведено дослідження по отриманню кераміки з нанорозмірного порошку гідроксиапатиту шляхом «сухого» одновісного пресування з наступним спіканням. Вихідний порошок і кераміку вивчали методами скануючої електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. Отримано міцні керамічні зразки з рівномірно розподіленою відкритою пористістю з розміром зерен і пор порядку мікрона і менше.

В роботі [3] використано новий розроблений програмний комплекс "СТРУКТУРА" для оцінки порового простору черепка ефективних стінових керамічних матеріалів. Він дозволяє оперативно та з високою точністю зчитувати з зображень шліфів контрольних зразків параметри пористості зразка. Цей комплекс є новим додатковим інструментом для дослідження пористості різних матеріалів лабораторій різних НДІ і вузів, що займаються розробкою нових технологій і нових матеріалів.

**Викладення матеріалу.** В якості вихідних матеріалів були взяті наступні матеріали: окалина сталі 18Х2Н4МА, порошок оксиду алюмінію ТУ (48-5-22-87), природний мінерал – сапоніт Ташківського родовища та 5 видів пороутворювачів. Шихтовий склад компонентів визначався експериментально, але з врахуванням можливих фазових перетворень в оксидах металів які присутні в шихті. Спікання здійснювалось за рахунок проходження металовідновлювальної реакції. Для підготовки шліфів до металографічного дослідження здійснювали розрізання зразків на відрізнаму верстаті із застосуванням алмазних кругів. Використали мокре абразивне різання, оскільки застосування охолоджувальної рідини знижувало температуру в місці зрізу і тим самим зменшувало нагартування матеріалу в зоні різання. Вирізаний шматок вставляли зрізаною площиною в сталеву обойму, заливали епоксидною смолою із затверджувачем та залишали для полімеризації на 24 год. Вирівнювання площини шліфа і початкове шліфування здійснювали на плоскошліфувальному верстаті з охолодженням зони шліфування емульсією. Подальша підготовка шліфів полягала в зрізуванні нерівностей поверхні абразивними частками на шліфувальних паперах. Обробку проводили в декілька стадій, постійно зменшуючи розмір цих часток. При підготовці шліфа абразивним методом шліфувку проводили в сім переходів на шліфувальних паперах № Р100, Р220, Р500, Р800, Р1200, Р2000,



P2500. Шліфування вели до повного видалення рисок, що залишилися після попередніх операцій. Шліфування повторювали, використовуючи послідовно папір із більшим умовним номером, що відповідає зменшенню розміру часточок абразиву, кожного разу змінюючи напрям руху шліфа на  $90^{\circ}$ . Зміна напрямку руху шліфа дозволяла повністю знищити риси, що залишилися після попереднього шліфування.

Враховуючи значну поруватість досліджуваних матеріалів, у пори яких набиваються часточки абразиву при шліфуванні, перед кожним переходом на тонший абразив залишки абразиву з шліфа видаляли із застосуванням ультразвукового очищення, потім шліф промивали водою і просушували фільтрувальним папером. Щоб остаточно вирівняти поверхню, шліф полірували алмазною пастою. Для полірування застосовували алмазні пасти ГОСТ 25593-83. Алмазне полірування виконували в 3–4 етапи пастами в наступній послідовності: АСМ 10/7, 7/5, 2/1, 1/0. Поверхню відполірованого зразка промивали зневодненим етиловим спиртом ( $C_2H_5OH$ ) і просушували. З метою отримання чіткого зображення границь зерен шліфи протравлювали 4%  $H_2SO_4$ . Дослідження мікроструктури проводили на оптичному мікроскопі «NEOPHOT» (Німеччина) при різних збільшеннях ( $\times 250$ ,  $\times 350$  та  $\times 500$ ). На рис. 1 наведені знімки приготування шліфів для металографічного аналізу.



Рис. 1. Підготовка шліфів

На рис. 2. наведено фотознімки структур отриманого матеріалу без додавання пороутворювача.

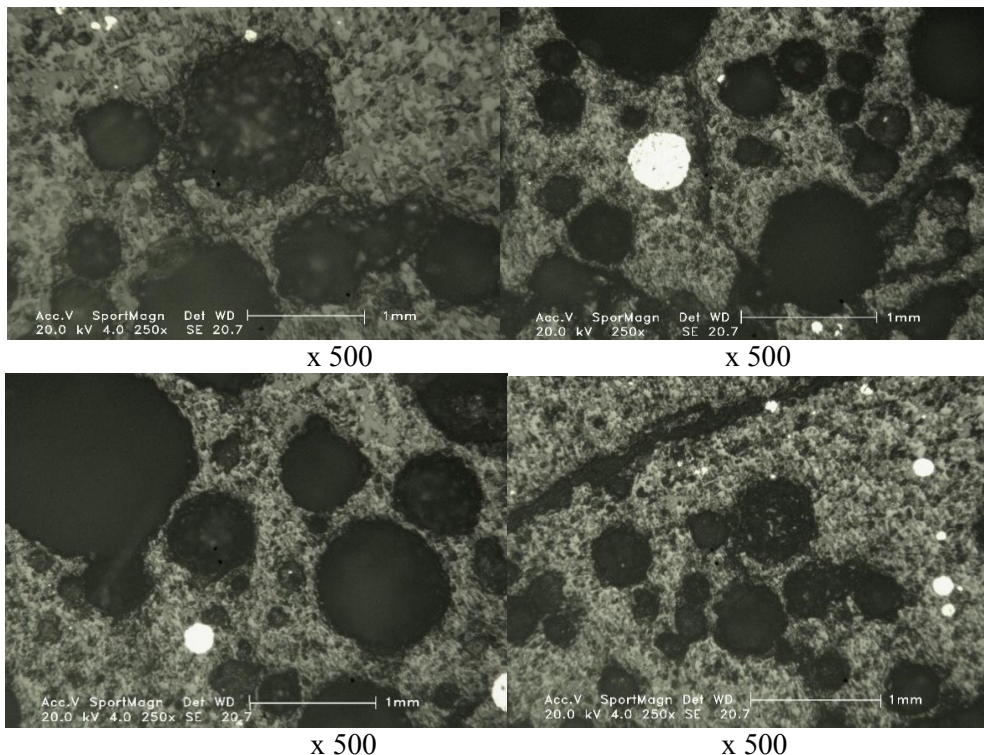
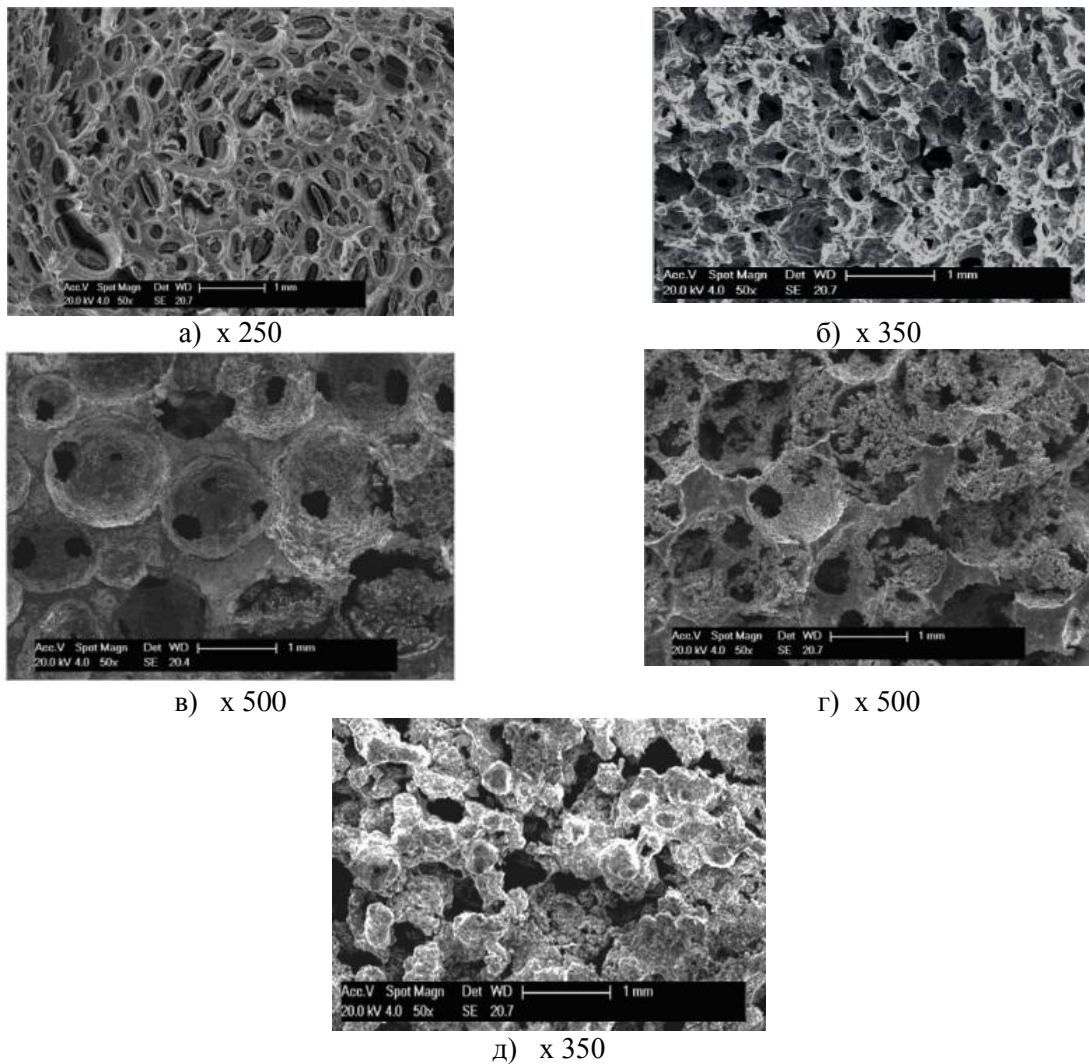


Рис. 2. Мікроструктури зразків без додавання пороутворювача



Аналіз електронних мікрофотографій при спостереженні показав світлі вclusions в структурі. Розподіл ділянок відновленого заліза дозволяє припустити, що відбувається подальше зростання металевих фрагментів, одночасно із зростанням областей відновленого заліза відбувається фазорозподілення – переміщення заліза в напрямку оксиду алюмінію. Основною фазою продукції є також оксид алюмінію з рівноважними параметрами решітки. У структурі кінцевого продукту алюміній присутній у вигляді полів розміром від 10 до 300 мкм, структура яких подібна із структурою областей відновлення заліза в продуктах реакцій відновлення оксиду заліза (IV).

Дослідження структури матеріалу, включає стадії розплавлення вихідного фериту окалини, утворення первинних зародків у результаті відновної реакції, їх зростання і злиття в протяжні області в процесі фазорозподілення. У структурі продукції представлена також оксидна матриця, основу якої складає оксид алюмінію  $Al_2O_3$  з включенням залишків оксидів заліза  $Fe_2O_3$ . Металевий компонент продукту представлений твердим розчином на основі заліза, які мають змінний склад по площі шліфа. Характерною складовою продукту взаємодії в складній системі є матриця на основі оксидів заліза, склад яких змінюється від  $Fe_2O_3$  до  $FeO$ . Відновлення оксидів протікає, найімовірніше, в ході металовідновлюваної реакції в послідовності  $Fe_2O_3, Fe_3O_4 - FeO$ . При цьому зростання пластин  $FeO$  відбувається за рахунок реакційного відновлення дисперсних частинок магнетиту  $Fe_3O_4$ , що є складовою фазою вихідної окалини. Паралельне протікання реакцій між алюмінієм і оксидом хрому (IV), а також між алюмінієм і окалиною, призводить до утворення в структурі продукту складних оксидів складу  $FeO (Al)_2O_3$ . На рис. 3. наведено структури матеріалу при додаванні пороутворювачів різних за хімічною природою [3, 4].



**Рис. 3. Мікроструктура пористих проникливих матеріалів з додаванням різних пороутворювачів: а – хлорид натрію, б – карбамід, в – поліетиленгліколь, г – гідрокарбонат натрію, д – карбонат кальцію)**

З отриманих структур можна зробити висновок, що при додаванні пороутворювачів різних за хімічним складом та властивостями отримали пористий матеріал. При аналізі розміру та форми пор найбільш прийнятною для пористого тіла буде структура з додаванням пороутворювачів – карбонат кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ) або карбамід  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ .

Еволюція кристалічної структури в процесі горіння досліджується за допомогою дифракційних рентгенівських спектрів [5]. Рентгенографічні дослідження проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4, випромінювання  $\text{Cu-K}\alpha$ . Розшифрування проводилось за допомогою міжнародної бази структурних даних. Зразки досліджувались в інтервальному режимі зі швидкістю лічильника 1–2 градуси в хвилину та із швидкістю стрічки 720 мм в годину в інтервалі кутів  $2\theta$  від 20 до 70 градусів. Зйомка проводилась з обертанням при наявності  $\beta$ -фільтра. На дифрактограмі зображені наявність інтерметалідів  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ ,  $\text{Al}_{0,7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0,3}$ . Одержаний результат дає можливість стверджувати, що отриманий матеріал на основі відходів металообробки буде характеризуватись високою міцністю та твердістю.

На рис. 4 (а, б) показані дифрактограми цих матеріалів. З дифрактограм видно піки, що відповідають сполукам, утвореним у результаті взаємодії компонентів.

$\text{Al}_{1,9}\text{Si}_{0,05}\text{O}_{2,95}$  силікат амонію 1868–1873К

$\text{CaAl}_4\text{O}_7$  Grossite 1448–1473К

$\text{Al}_{1,9}\text{Si}_{0,05}\text{O}_{2,95}$  фосферит (твердий розчин) 1868–1873К

$\text{Al}_{0,7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0,3}$  кермети (металокераміка) від 1773 К

$\text{Si}_5\text{C}_3$  карбід кремнію 1873–1973К

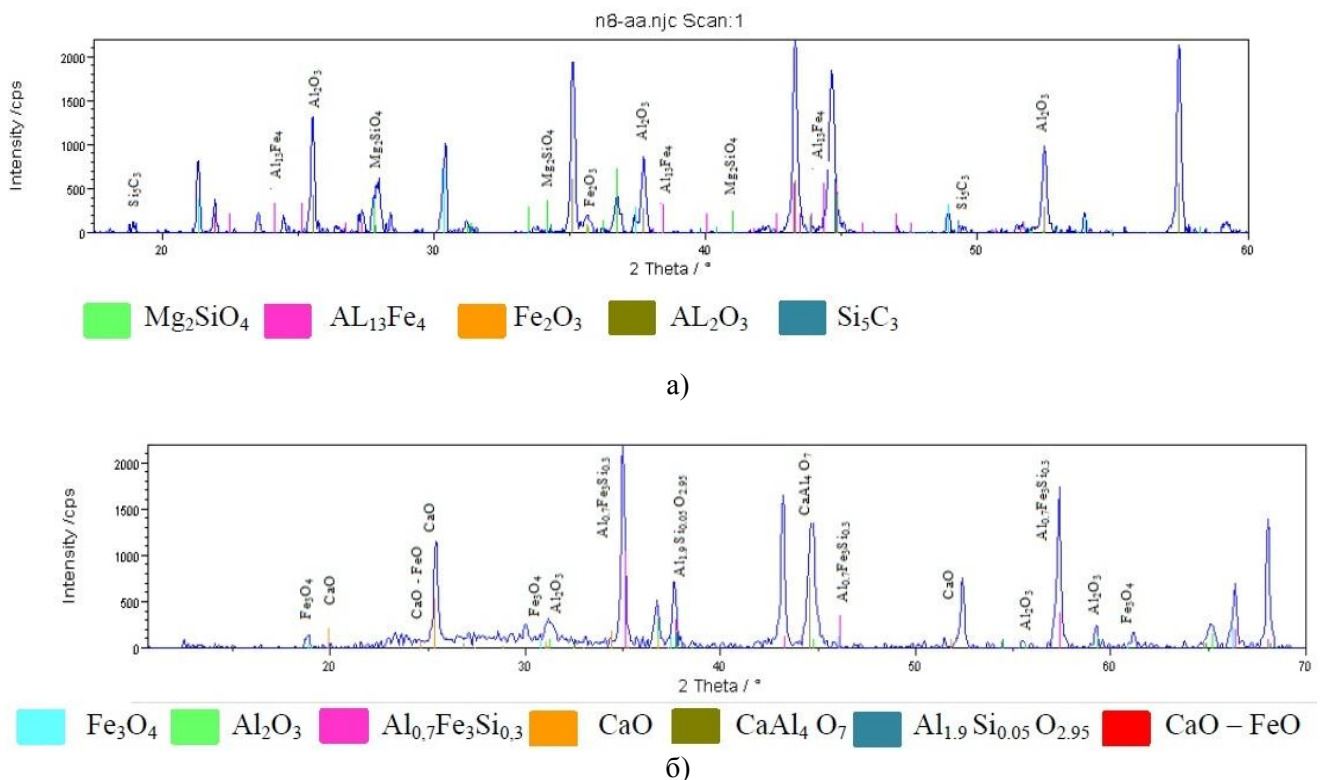


Рис. 4. Дифрактограми композиційних матеріалів з:  
а) пороутворювачем – карбамід; б) пороутворювачем – карбонат кальцію

**Висновок.** Аналіз електронних мікрофотографій при спостереженні показав світлі включення в структурі. Розподіл ділянок відновленого заліза дозволяє припустити, що відбувається подальше зростання металевих фрагментів, одночасно із зростанням областей відновленого заліза відбувається фазорозподілення – переміщення заліза в напрямку оксиду алюмінію. Дослідження структур матеріалу включає стадії розплавлення вихідного фериту окалини, утворення первинних зародків у результаті відновної реакції, їх зростання і злиття в протяжні області в процесі фазорозподілення. У структурі продукції представлена також оксидна матриця, основу якої складає оксид алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з включенням залишків оксидів заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Металевий компонент продукту представлений твердим розчином на основі заліза, які мають змінний склад по площі шліфа. Процес отримання пористих проникних матеріалів складається із

трьох послідовних операцій: приготування шихтової суміші, формування виробів з необхідними геометричними параметрами та спікання або синтез. Проаналізовано, що для отримання пористої кераміки використовуються наступні пороутворювачі: карбамід ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ), поліетиленгліколь ( $\text{C}_{2n}\text{H}_{4n+2}\text{O}_{n+1}$ ), карбонат кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ), гідрокарбонат натрію ( $\text{NaHCO}_3$ ) та хлорид натрію ( $\text{NaCl}$ ). Всі пороутворювачі різні за хімічним складом та властивостями. Досліджено, як кожен з даних пороутворювачів буде взаємодіяти з даною системою. З отриманих структур можна зробити висновок, що при додаванні пороутворювачів різних за хімічним складом та властивостями отримали пористий матеріал. При аналізі розміру та форми пор найбільш прийнятною для пористого тіла буде структура з додаванням пороутворювачів – карбонат кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ) або карбамід  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ .

#### Список використаних джерел:

1. Буякова С.П. Свойства, структура, фазовый состав и закономерности формирования пористых наносистем на основе  $\text{ZrO}_2$ : дис. доктора. тех. наук: 01.04.07 / Буякова Светлана Петровна. – Томск, 2008. – 315 с.
2. Бардаханов С. П. Экспериментальное исследование по созданию экологически чистой технологи получения керамики изнано- дисперсных порошков. Конструкции из композиционных материалов / С. П. Бардаханов, А. В. Ким, В. А. Лиенко, Ш. Л. Рустамов, Ю.Ю. Танашев, А. Н. Шмаков // ВИМИ. –2005. –№ 4.– С. 71–79.
3. Габидуллин М.Г. Новые виды пористой керамики и моделирование их структуры // Статья в научно- теоретическом журнале Вестник БелГТАСМ, №5, 2003. Материалы межд. конгресса “Современные технологии в промышленности строительных материалов и строй индустрии”, посвященного 150- летию В.Г. Шухова. –Ч.2. – С.67-73.
4. Nath S. Sintering, phasestability, and properties of calciump hosphate-mullite composites / S. Nath, K. Biswas, K. Wang, R. K. Bordia, B. Basu // J. Am. Ceram. Soc.– 2010.– 93.– P. 1639–1649.
5. Стрелов К. К. Структура и свойства огнеупоров / К.К.Стрелов.– М.: Металлургия,1982.

#### Рецензент:

**Рудь Віктор Дмитрович**, д.т.н., професор кафедри прикладної механіки Луцького національного технічного університету.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2017

УДК: 001.18

**А.В. Ратушный, А.А. Дрофа**

Сумской Государственный Университет

**ПУТЬ К НОВОЙ ПАРАДИГМЕ РАЗВИТИЯ: ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА К VI ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ УКЛАДУ И ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОМУ ОБЩЕСТВУ**

*В статье рассматриваются перспективы перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу в глобальном плане. Раскрываются соответствующие предпосылки перехода, характерные для сегодняшнего дня как основы новой парадигмы развития. В качестве примера и практического приложения анализируются потенциальные возможности развития технических систем, передающих энергию жидкости.*

*Ключевые слова:* VI технологический уклад, особенности перехода, перспективы насосостроения

**О.В. Ратушний, А.О. Дрофа****ШЛЯХ ДО НОВОЇ ПАРАДИГМИ РОЗВИТКУ: ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕХОДУ ДО VI ТЕХНОЛОГІЧНОГО УКЛАДУ ТА ПОСТІНДУСТРІАЛЬНОГО СУСПІЛЬСТВА**

*У статті розглядаються перспективи переходу до VI технологічного укладу і постіндустріального суспільства в глобальному плані. Розкриваються відповідні передумови переходу, характерні для сьогоднішнього дня як основи нової парадигми розвитку. В якості прикладу і практичного застосування аналізуються потенційні можливості розвитку технічних систем, що передають енергію рідини.*

*Ключові слова:* VI технологічний уклад, особливості переходу, перспективи насособудування

**A. Ratushnyi, A. Drofa****THE WAY TO THE NEW DEVELOPMENT PARADIGM: PECULIARITIES OF TRANSITION TO THE VI WAVE OF INNOVATION AND THE POST-INDUSTRIAL SOCIETY**

*The article examines the peculiarities for transition to the VI wave of innovation and the post-industrial society in the global plan. Authors disclosed the prerequisites for the transition, which are characteristic for today and constitute the basis for a new development paradigm., Potential possibilities for the development of pump systems were analyzed as an example and practical application.*

*Keywords:* VI wave of innovation, peculiarities of transition, prospects of the pump building

**Вступление.** Начало XXI века характеризуется глобальными трансформациями, сутью которых является формирование постиндустриальной формы организации общества, где в реальном секторе экономики преобладает интеллектуальный труд. При этом лидирующее положение в этом формирующемся новом мироустройстве займут страны и общества, перешедшие к VI технологическому укладу [1,2].

XXI век имеет все тенденции стать веком человека. Именно с ним связаны новые возможности и перспективы, но и самые большие риски. Принципиальным отличием постиндустриального общества является то, что главная цель развития общества определяется как повышение качества жизни людей на основе технологического прогресса и фундаментальной науки [3]. Главенствующими станут отношения «субъект-природная среда». Чтобы в полном объеме осуществить переход к постиндустриальной форме организации общества, необходимо изменить многие его свойства (социальные, информационные, научные, образовательные, технологические и др.), создать новые общественные институты, выявив при этом и отказавшись от отработанных неэффективных моделей, то есть в целом переориентировать развитие общества и глобально всего человечества [4]. При этом, к именно такой характеристике данного перехода имеются весьма существенные предпосылки.

**Постановка проблемы.** Наш мир в целом и наше общество в частности оказались в точке бифуркации, то есть в такой точке, в любой окрестности которой все возможные совокупности качественных свойств объекта будут существенно отличаться друг от друга [5]. Данная категория понимается как определённый момент выбора, когда предыдущая траектория развития той или иной системы становится неустойчивой и появляются новые варианты развития, а с ними и возможность выбора пути в будущее [6]. Это относится и к развитию многих технических систем, в том числе и передающих энергию жидкости.

Отметим также, что в точках бифуркации флуктуации – хаотические процессы на микроуровне приобретают макроскопическую величину, то есть становятся ощутимыми и приобретают значимость на макроуровне, на уровне системы. При этом флуктуации, внося существенный элемент неопределенности, детерминируют выбор одного определенного направления эволюции из множества возможных. Поэтому для успешного решения стоящей в

целом перед нашим обществом важнейшей проблемы выбора будущего вектора развития всех его сфер, в том числе связанных с производством различных технических систем, необходимо уделить особое внимание исследованию соответствующих процессов на микроуровне с привлечением в комплексе методов естественных наук в рамках междисциплинарного, синергетического подхода, связанного с системной самоорганизацией и ростом упорядоченности структуры систем [7].

Таким образом, на сегодняшний день выходят на первый план актуальная проблема целеполагания и выбора будущего вектора развития (парадигмы) различных систем, так как в окрестности точки бифуркации нет возможности отложить её решение. Отметим, что невнимание к вопросам, связанным с особенностями перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу, и соответствующее неизбежное отсутствие понимания принципов развития различных систем (общественных, технических и т. д.) в будущем с учетом бифуркационного характера данного перехода может привести к претворению в жизнь совершенно неожиданных сценариев их развития (или регресса), вплоть до абсолютно деструктивных. Но при этом отметим, что в окрестности точки бифуркации появляется преобладающее количество возможностей именно для дальнейшего прогресса.

**Цели и задачи исследования.** Цель исследования можно сформулировать следующим образом: наметить характерные черты новой технологической парадигмы развития общества в середине XXI века.

Задачи исследования:

- раскрыть особенности перехода человеческого общества к новому технологическому укладу и постиндустриальному обществу;
- с учетом данных особенностей проанализировать возможности развития технических систем, передающих энергию жидкости.

**Методология исследования.** В качестве методологии данного исследования использовались общенаучные методы – генетический, гипотетико-дедуктивный, индукции, аналогии, научная интерпретация [8].

**Изложение основного материала. Особенности перехода общества к постиндустриальной эпохе.** С 70–80-х годов XX века и до сегодняшнего дня экономику, промышленность, технологии определяет V технологический уклад (ТУ), основой которого является микроэлектроника. Среди передовых отраслей данного ТУ – электронная промышленность, телекоммуникации, вычислительная техника. При этом приблизительно с 2010 года в мире идет интенсивное становление VI технологического уклада – эпохи повсеместного развития и использования нанотехнологий, гелио- и ядерной (термоядерной) энергетики (рис. 1) [9]. Переход от V к VI ТУ, как и все предыдущие переходы, связаны, как видим, со сменой главного энергоносителя эпохи. Следует иметь в виду, что грядущий технологический уклад ориентирован не столько на технологический рост, сколько на повышение качества жизни общества в целом. Его основу будут составлять фундаментальная наука, междисциплинарные научные подходы, в частности теория самоорганизации – синергетика [10].

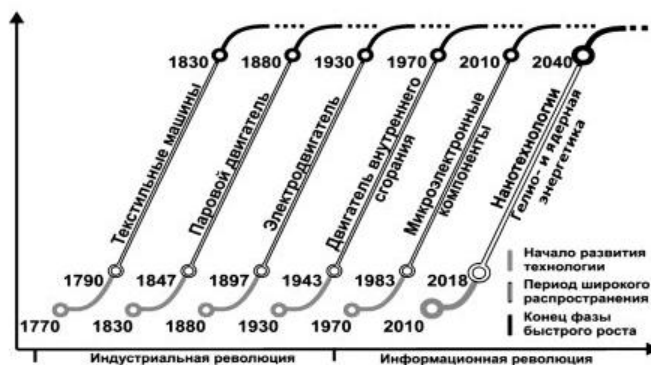


Рис. 1. Периодизация технологических укладов

Отметим, что обоснование неизбежности перехода к новому состоянию общества и соответствующему технологическому укладу было сформулировано еще в самом начале XXI века. Так А. Д. Панов, исследуя планетарную систему [11], включающую в себя биосферу и человеческую цивилизацию, в процессе её исторического развития, представляющую собой последовательность относительно стабильных эпох (биологических и социальных эволюций) и разделяющих их революций (точек бифуркации), подчеркивает её векторный характер.

Отмечается важная особенность, заключающаяся в том, что эволюция происходит в направлении усложнения структуры и удаления глобальной планетарной системы от состояния термодинамического равновесия [12].

Так называемые революции – это переворот в развитии планетарной системы в результате разрешения кризиса эволюционного процесса, выделенные в результате экспертной оценки специалистов различного профиля. Данные революции (от возникновения аэробной эукариотической фауны, «кембрийского взрыва» и начала антропогена до промышленных и информационных революций нового времени и современности) образуют сходящуюся последовательность точек, обладающих свойством автомодельности.

Механизм планетарных революций обладает особенностью использования так называемого потенциала избыточного внутреннего разнообразия. Под этой категорией подразумевается, что некоторые структуры, возникающие на предыдущей фазе развития планетарной системы, но не играющие в ней существенной роли, после революции становятся существенными системообразующими факторами. В результате подобного «естественного отбора» развиваются именно те формы, которые определяют следующий этап развития. То есть революция в таком контексте понимается как существенная перестройка планетарной системы, а не появление новой формы. Исходя из этого, можно говорить об определённом внутреннем единстве революций планетарного цикла и рассмотренных выше смен технологических укладов. Последние в данном случае представляются как некие «подэпохи» последних этапов планетарного цикла, где превалирующую роль играет социальная революция. Таким образом, еще раз убеждаемся в том, что именно сегодня особенно актуален поиск новых возможностей и принципов развития тех или иных глобальных и локальных систем, поиска «незамеченного» среди уже имеющихся подходов, идей, технологий и конструкций.

Следует отметить, что длительность рассматриваемых исторических эпох постоянно сокращается – проявляется эффект ускорения исторического времени. То есть, чем выше уровень организации планетарной системы, тем быстрее она эволюционирует и, соответственно, всё меньше времени требуется до наступления следующего кризиса и следующей революции. Более того, длительность исторических эпох сокращается закономерным образом – в одинаковой пропорции. В этом и выражается свойство автомодельности.

При этом идеальная автомодельная последовательность в данном случае выражается уравнением

$$t_n = t^* - \frac{T}{a^n},$$

где  $a > 1$  – коэффициент ускорение исторического времени, показывающий, во сколько раз каждая последующая глобальная планетарная эпоха короче предыдущей;

$T$  – длительность описываемого промежутка времени;

$n$  – номер революции;

$t^*$  – некоторый момент времени (точка), названный сингулярностью [13].

Суть точки сингулярности заключается в том, что сходящаяся автомодельная последовательность  $t_n$  при  $n \rightarrow \infty$  неограниченно приближается к точке  $t^*$ , никогда её не переходя. Относительно планетарной системы это значит, что её привычная эволюция даже в некоторой окрестности точки сингулярности не сможет продолжаться, так как революции в итоге должны были бы сменять друг друга через исчезающе короткие отрезки времени.

Особенно важно отметить, что рассчитанный путём соответствующего моделирования, ожидаемый предел рассматриваемой последовательности – сингулярность – приходится на 2015 год с погрешностью приблизительно в 15 лет. Данный результат в целом находит подтверждение и среди других исследователей [14].

При этом констатируем, что характер эволюции и развития всей планетарной системы при переходе через точку сингулярности неизбежно должен коренным образом измениться. Очевидна необходимость выбора новой парадигмы бытия человечества – траектории развития в постсингулярную эпоху. Данный тезис, как видим, определяет саму сингулярность, как упомянутую выше точку бифуркации со всеми присущими ей особенностями. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что постсингулярная эпоха фактически будет соответствовать принципиально новой постиндустриальной форме организации общества и VI технологическому укладу со всеми вышеизложенными их особенностями, становление которых при формулировке целостной парадигмы развития, к тому же, по некоторым вышеуказанным особенностям можно частично сопоставить с ноосферогенезом, описанным В. И. Вернадским [15].



Таким образом, можно говорить о том, что наше общество подошло к действительно переломному моменту своей истории, находясь в окрестности точки сингулярности-бифуркации в которой совпали смены основополагающих закономерностей развития всех его сфер.

Особый интерес представляет совпадение изложенных выше тезисов с результатами исследования историков, выполненного путём математического моделирования [16]. Так, оказывается, что наше общество живет по циклическим законам, которые представляют собой 144-летние большие циклы, которые делятся на четыре 36-летние подциклы, которые, в свою очередь, состоят из трех 12-летних периодов.

Последний, ныне действующий 144-летний цикл, начался в 1881 году, когда наше общество в полном объёме начало переходить в эпоху индустриальной революции. Данная дата удивительно точно согласуется с периодизацией технологических укладов (рис. 1), где на 1880 г. приходится зарождение третьего «электрического» уклада. Завершается цикл в 2025 г., что также хорошо коррелирует с приведенными выше данными о времени наступления сингулярности привычной эволюции планетарной системы (2015 г. + 15 лет). Вновь обращаясь к периодизации технологических укладов, видим, что нынешний большой исторический цикл (1881-2025 г.) вобрал в себя последние три уклада, а начало широкого внедрения технологий грядущего VI уклада приходится уже на 2018 г., то есть, фактически, в точку сингулярности-бифуркации. Исходя из всего вышесказанного, невозможно не констатировать уникальность текущего исторического момента и соответствующей великой ответственности современного человечества за будущее и прогресс.

При этом очень важно отметить, что каждый новый большой исторический цикл знаменуется появлением некой новой всеобъемлющей идеи, новых глобальных принципов развития всех систем: от общества, его информационного и промышленного комплексов до отдельного индивида и конкретного класса технических систем.

**Особенности развития систем, передающих энергию жидкости в постиндустриальную эпоху.** Рассмотрим далее системы, передающие энергию жидкости или насосы. Как известно, насос – это техническая система, осуществляющая преобразование энергии рабочего органа в механическую по своей природе энергию потока жидкости. При этом вид энергии, преобразуемый в механическую энергию рабочего органа насоса (например, рабочего колеса) может быть различным в зависимости от вида привода, приемлемого для рационального использования в тех или иных условиях.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что принципиальные конструкции и базис теории (основное уравнение лопастных машин, сформулированное Л. Эйлером) самого распространенного типа насосов – динамических – формировались еще при самых первых технологических укладах [17].

Таким образом, сегодня просматривается актуальная проблема, имеющая направленность в будущее. Она заключается в поиске комплексного ответа на принципиальный вопрос о том, будет ли потребность в насосах традиционной конструкции при VI и последующих технологических укладах, стоит ли уже сейчас искать принципиально новые подходы сообщения энергии жидкости? По нашему мнению, залог успешного развития и заключается в поиске новых технических решений, учитывающих объективные тенденции и особенности перехода к VI технологическому укладу.

В данном контексте просматривается своеобразная диалектика перспектив развития насосов как технических систем. С одной стороны, в обозримом будущем, мощное энергетическое насосное оборудование, работающее на принципах, сформулированных еще Эйлером, незаменимо. С другой – идеология перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу требует поисков принципиально новых способов передачи энергии жидкости (причем, на микроуровне). Это связано, прежде всего, с ограниченностью запасов традиционных невозобновляемых источников энергии (НИЭ), которых, по оптимистическим прогнозам, хватит в среднем лишь до конца XXI века. Именно НИЭ выступают сейчас главным энергоресурсом для приводов насосов. При этом человечество просто вынуждено будет в скором будущем все больше переходить к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и, соответственно, гармонизировать свои энергозатраты с доступным к потреблению количеством данных энергетических ресурсов [18]. Начало этого перехода и направленность на всё большее освоение ВИЭ (прежде всего энергии Солнца), по сути, и является одной из основ перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу. В связи с этим уже сегодня можно предположить грядущую в отдаленном пока будущем кардинальную и

неизбежную 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 ВИЭ. На наш взгляд, осознание данного 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 и в первую очередь воду как важнейшего жизненного ресурса человека. Отметим, что в подобных системах человек нуждается и будет нуждаться всегда и всюду.

При этом, конечно, невозможно, хотя бы кратко, не обратить внимание на основную проблему, сдерживающую на сегодняшний день развитие и внедрение систем, так или иначе использующих ВИЭ. В отличие от невозобновляемых, данные источники имеют существенно (иногда на порядки) меньшую плотность потока потенциально высвобождаемой из них полезной энергии [19]. То есть, энергию ВИЭ необходимо перед использованием концентрировать (и, соответственно, аккумулировать), что, естественно связано с дополнительными (порой значительными) техническими трудностями. Однако, еще раз подчеркнём, что объективная реальность бытия человечества на планете Земля не оставляет нам иного пути, как в целом поиск принципиально новых подходов к организации жизненного цикла тех или иных видов технических систем.

Исходя из очерченной выше диалектики перспектив насосного оборудования, далее будут намечены идеи для возможной реализации, прежде всего, на «ближнюю» перспективу – применения принципов в целом связанных со снижением удельной быстроходности, то есть способов, способных интенсифицировать передачу энергии от соответствующей технической системы к жидкости.

Реализация «дальней» перспективы связана, по нашему мнению, прежде всего с исследованием возможностей реализации передачи энергии жидкости на микроуровне. При этом полноценное понимание потенциала «дальней» перспективы требует глубоко и всестороннего изучения микроструктуры самой перекачиваемой жидкости, прежде всего, воды, а также перспектив непосредственного взаимопреобразования различных видов энергии [20], что является задачей для дальнейшего исследования в рамках данной тематики.

В рамках исследования «ближней» перспективы отметим одну из основных сегодняшних проблем промышленности – большую энергоёмкость эксплуатации насосного оборудования. Так в различных отраслях насосы потребляют 25-60% от всей затрачиваемой энергии [21,22]. При этом почти  $\frac{3}{4}$  энергозатрат приходится на динамические насосы. В связи с этим Европарламент еще в 2005 году принял «Директиву по определению требований, предъявляемых к проектированию изделий, потребляющих энергию», предусматривающую сокращения общего потребления энергии в Европе к 2020 году на 20%, а на энергопотребления насосного оборудования – на 40 % [23,24]. В контексте перехода к VI технологическому укладу выполнение данной «Директивы...» видится как закономерный и, самое главное, неизбежный этап гармонизации энергопотребления, предполагающий, исходя из намеченных цифр, существенное изменение подходов в современной промышленности и насосостроении в частности.

Следует отметить, что до сих пор рассматривая данную энергетическую проблему на трех иерархических уровнях: «насос», «насосный агрегат» и «насосный агрегат в составе системы (сети)», совершенно не уделяется внимание возможности применения различных приводов насоса, отличного от электродвигателя [25]. Уже данный факт является явным противоречием относительно концепции перехода к постиндустриальному обществу. Таким образом, расширяя определённым образом рамки «Директивы...», необходимо говорить не только и даже, возможно, не столько о вопросе снижения и оптимизации потребления энергии насосным оборудованием, а о повышении эффективности всей системы (цепочки) преобразования и передачи энергии от первичного источника энергии к жидкости. При этом особое внимание, естественно, следует обращать на возможности прямого преобразования различных видов энергии друг в друга.

В общем виде уменьшение энергопотребления отдельно взятого насоса при обеспечении им заданных параметров напора и расхода достигается за счёт повышения его КПД. Многолетний опыт исследований, разработок и производства насосов ведущими компаниями мира обеспечивает сегодня достаточно высокие значения этого показателя в оптимальном режиме в зависимости от удельной быстроходности. Поэтому ожидать каких-то существенных прорывов и, следовательно, снижения энергопотребления, не приходится. Ориентировочно, резервы повышения КПД



центробежных насосов можно оценивать в 2-3% для насосов с удельной быстроходностью  $n_s = 300-100$ , 3-5% – для  $n_s = 100-70$  и на 5-10% для  $n_s = 60-30$  [26, 27]. Причём, как показывает анализ балансов энергии, резервы повышения общего КПД кроются не столько в уменьшении гидравлических потерь (хотя они, конечно, имеются, особенно для высоких  $n_s$ ), сколько в объёмных и механических потерях (что особенно характерно для  $n_s = 60-30$ ). Таким образом, можно говорить о том, что дальнейшее системное исследование путей повышения энергоэффективности центробежных насосов низкой и сверхнизкой удельной быстроходности также является актуальной задачей на «ближнюю» перспективу развития насосостроения в следующую технологическую эпоху.

В целом, рассматривая данный вопрос, отметим, что в настоящее время во многих отраслях промышленности возникла проблема повышения экономичности центробежных насосов, обеспечивающих рост напорности при относительно небольших подачах [28]. Решение подобных задач во многом следует искать в увеличении интенсивности энергопередачи в системе «рабочий орган насоса – перекачиваемая жидкость». Реализация данной идеи приведёт к возможности применения одноступенчатого центробежного насоса вместо многоступенчатого или существенного сокращения количества ступеней последнего. Таким образом, в рамках «ближней» перспективы актуальным также является вопрос поиска таких способов модернизации геометрических параметров лопастной решетки центробежной насосной ступени, которые привели бы к росту её интегральных характеристик – прежде всего напора и КПД. Отметим также, что кроме этого попутно будет решаться не менее актуальная задача снижения массо-габаритных параметров насосов.

Относительно перспектив центробежных насосов низких  $n_s$  можно отметить, что применение для решения вышеуказанных задач насосов поршневого, винтового, вихревого и т.п. или какого-нибудь другого типов либо нежелательно из соображений экономичности, либо вообще невозможно из-за определённых особенностей. Кроме того общеизвестно, что лопастные насосы обладают рядом преимуществ (массо-габаритными, эксплуатационными, надёжностными) по сравнению с граничащими с ними по области применения насосами других типов.

В практике насосо-, авиа-, кораблестроения известны осевые агрегаты с так называемой контрроторной лопастной решеткой. Под контрроторностью понимают принцип компоновки динамической лопастной машины, согласно которому два ротора с лопастными решетками и общей осью обращения приближены один к одному и вращаются в противоположных направлениях. При этом каждый ротор опирается на свои опоры и имеет отдельную систему подведения (или отвода) механической энергии.

Следует отметить, что применение подобных конструкций способно существенно интенсифицировать процесс энергопередачи от лопастной системы к жидкости или значительно увеличить осевую силу взаимодействия роторной части и движущейся через неё жидкости, что в свою очередь ведёт при снижении удельной быстроходности к перспективе роста напорности контрроторной ступени по сравнению с обычной на десятки процентов. При этом использование принципа контрроторности в целом и, особенно применительно к центробежным насосам в частности, на данный момент широкого распространения не получило, что связано с недостаточным проведением теоретического и экспериментального исследования особенностей рабочего процесса в таких лопастных системах, их преимуществ и недостатков, а также сложностями при конструировании и изготовлении. На данный момент это же можно сказать в целом и относительно других упомянутых способов.

Исходя из вышесказанного, основные направления решения очерченных проблем связаны с дальнейшим продолжением научных поисков для создания насосного оборудования с новыми принципами действия, в том числе и усложнения рабочего процесса гидромашины [29].

**Выводы.** На период ближайшего десятилетия выпадает момент смены сразу нескольких циклов общественного развития. Данные изменения связаны с поиском новой концепции, идеи развития, а также с переходом на принципиально иные технологические рельсы дальнейшей организации промышленного комплекса, которые связаны с пониманием и организацией различных процессов на микроуровне, и неизбежностью согласования энергетических проблем человечества с доступными, прежде всего возобновляемыми, источниками энергии.

В контексте особенностей перехода к VI технологическому укладу и постиндустриальному обществу рассматривая технические системы, осуществляющие передачу энергии жидкости (насосы), как одни из наиболее энергоёмких машин современности, выделили два диалектически связанных перспективных пути их развития (на «ближнюю» и «дальнюю» перспективы), нацеленных на интенсификацию передачи энергии жидкости в целом известными, но пока еще не нашедшими широкого применения способами, а также связанных с необходимостью исследования возможностей передачи энергии жидкости на микроуровне на основе анализа возможностей прямого преобразования различных видов энергии соответственно.

**Список использованных источников:**

1. Иванов В.В. Стратегия прорыва: технологии, образование, наука / В.В. Иванов, Г.Г. Малинецкий. – Москва : URSS-ЛЕНАНД, 2016. – 300 с.
2. Белл Д. Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования / Д. Белл – Москва : Академия, 1999
3. Иванов В.В. Инновационная парадигма XXI / В.В. Иванов – Москва : Наука, 2015
4. Иванов В.В. Стратегия прорыва: технологии, образование, наука / В.В. Иванов, Г.Г. Малинецкий. – Москва : URSS: ЛЕНАНД, 2016. – 300 с.
5. Математический энциклопедический словарь / гл. ред. Ю.В. Прохоров. – Москва : Сов. Энциклопедия, 1988. – 847 с.
6. Николис, Д. Динамика иерархических систем. Эволюционное представление / Дж. Николис. – Москва : Мир, 1989. – 488 с.
7. Малинецкий, Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего наука / Г.Г. Малинецкий, С.П. Курдюмов, Капица, Москва : УРСС, 2003. – 288 с.
8. Лебедев, С.А. Методология научного познания: монография / С.А. Лебедев. – М.: Проспект. – 2017. – 256 с.
9. Иванов В.В. Перспективный ТУ: возможности, риски, угрозы // Экономические стратегии. 2013 №4, с.2-5.
10. Курдюмов, С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. / С.П. Курдюмов, Е.Н. Князева – М.: Наука, 1994. – 236 с.
11. Панов, А. Д. Кризис планетарного цикла Универсальной истории // Вселенная, пространство, время. – 2004. – №2 (3) – с. 28-34.
12. Назаретян, А. П. Цивилизационные кризисы в контексте универсальной истории / А. П. Назаретян – Москва: ПЕР СЭ, 2001.
13. Дьяконов, И. М. Пути истории. От древнего человека до наших дней / И. М. Дьяконов – Москва : Восточная литература, 1995.
14. Капица, С. П. Феноменологическая теория роста населения Земли // Успехи физических наук, Т. 166, с. 63-80, 1996.
15. Вернадский, В. И. Научная мысль как планетное явление / В. И. Вернадский - Москва: Наука, 1991. - 271 с.
16. Спицнадель, В. Н. Основы системного анализа / В. Н. Спицнадель – Санкт-Петербург : Изд. Дом «Бизнес-пресса», 2000. – 321 с.
17. Михайлов, А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 288 с.
18. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
19. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
20. Алексеев, Г. Н. Прогнозное ориентирование развития энергоустановок / Г. Н. Алексеев. – Москва : Наука, 1978. – 200 с.
21. СИНТ'09: материалы V международной конференции. – Воронеж: Научная книга, 2009. – 356 с.
22. Ecorump.ru'2009: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – М: Из-во РАПН, 2009 – 458 с.
23. Europump Variable Speed Pumping: guide to successful applications. – Brussels: Hydraulic Institute and Europump, 2004. – 172 p.
24. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary. // Hydraulic Institute and Europump. Published by Elsevier Ltd., 2005.
25. Ратушный, А. В. Пути уменьшения энергопотребления насосным оборудованием / И. А. Ковалев, А. В. Ратушный // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2010. – № 3, Т. 1. – с. 86-97.
26. Ржебаева, Н. К. Расчет и конструирование центробежных насосов: учеб. пос. / Н. К. Ржебаева, Э. Е. Ржебаев. – Сумы : СумГУ, 2009. – 220 с.
27. Ковалёв, И. А. Исследование путей повышения экономичности ступени центробежного насоса низкой быстроходности ( $n_s = 40$ ): автореферат... канд. техн. наук, спец.: 05.193- гидравлические машины / Ковалёв И. А. – Харьков : ХПИ им. В. И. Ленина, 1970. – 22 с.
28. Ратушный, О. В. Підвищення напірності ступеня відцентрового насоса шляхом удосконалення лопатевої гратки робочого колеса : автореферат... канд. техн. наук, спец.: 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмо агрегати / Ратушний О. В. – Суми : СумДУ, 2015. – 20 с.
29. Евтушенко, А. А. Развитие теории рабочего процесса, практики конструирования и применения динамических насосов : монография / А. А. Евтушенко. – Сумы : СумГУ, 2013. – 515 с.

**Сведения о рецензентах**

**Ковалёв Игорь Александрович**, заведующий кафедрой Прикладной гидроаэромеханики Сумского государственного университета, к.т.н., профессор

**Бережной Александр Сергеевич**, ведущий инженер, АО «Технология», г. Сумы, к.т.н.

Стаття надійшла до редакції 08.12.2017

УДК: 621.998.77

І.В. Савюк

Луцький національний технічний університет

**ПОБУДОВА МАТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ШИХТОВОГО СКЛАДУ ЕКЗОТЕРМІЧНОЇ ШИХТИ**

*Розроблена математична модель для прогнозування технологічних параметрів горіння екзотермічної шихти в залежності від її кількісного та якісного складу. Математичне моделювання досліджуваного процесу здійснювали на основі моделі множинної лінійної регресії. Для оцінки узгодження побудованої регресійної моделі процесу горіння екзотермічної шихти із системою значень, отриманих під час експерименту було визначено вибірковий коефіцієнт детермінації та виконано перевірку адекватності моделі згідно критерію Фішера. Точність моделі не виходить за межі інженерної похибки та складає 96%. Матрична модель дозволяє прогнозувати технологічні параметри горіння екзотермічної шихти, а саме: температуру горіння, коефіцієнт розбризкування металу, кількість виходу гідного та швидкість проходження реакції.*

*Ключові слова:* математична модель, екзотермічна реакція, екзотермічна шихта, окалина, термит, екзотермічна реакція.

І.В. Савюк

**ПОСТРОЕНИЕ МАТРИЧНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ШИХТОВОГО СОСТАВА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШИХТЫ**

*Разработана математическая модель для прогнозирования технологических параметров горения экзотермической шихты в зависимости от ее количественного и качественного состава. Математическое моделирование изучаемого процесса осуществляли на основе модели множественной линейной регрессии. Для оценки согласования построенной регрессионной модели процесса горения экзотермической шихты с системой значений полученных в ходе эксперимента было определено выборочный коэффициент детерминации и выполнена проверка адекватности модели по критерию Фишера. Точность модели не выходит за пределы инженерной ошибки и составляет 96%. Матричная модель позволяет прогнозировать технологические параметры горения экзотермической шихты, а именно: температуру горения, коэффициент разбрызгивания металла, количество выхода гідного и скорость прохождения реакции.*

*Ключевые слова:* математическая модель, экзотермическая реакция, экзотермическая шихта, окалина, термит, экзотермическая реакция.

I. Saviuk

**CONSTRUCTION MATRIX MODEL FOR OPTIMIZING CHARGE COMPOSITION EXOTHERMIC CHARGE**

*The mathematical model for prediction of technological parameters of combustion of exothermic charge is developed, depending on its quantitative and qualitative composition. Mathematical modeling of the investigated process was carried out on the basis of the model of multiple linear regression. In order to evaluate the reconciliation of the regression model of the exothermic combustion process with the system of values obtained during the experiment, a deterministic determination coefficient was determined and a check of the adequacy of the model according to Fisher's criterion was performed. The accuracy of the model does not go beyond the engineering error and is 96%. The matrix model allows to predict the technological parameters of combustion of an exothermic charge, namely: combustion temperature, the coefficient of spraying the metal, the amount of output that is decent and the rate of reaction.*

*Key words:* mathematical model, exothermic reaction, exothermic charge, scale, termite, exothermic reaction.

**Вступ.** Розвиток промисловості тісно пов'язаний з науковими розробками. Як відомо, усі наукові дослідження базуються на натурних експериментах, проведення яких досить часто є дорогим та затратним. Для зменшення кількості експериментів винахідники досить часто користаються математичними моделями, що дозволяють наближено визначати поведінку чи властивості вивчених об'єктів та матеріалів в залежності від зміни вихідних параметрів. Математичні моделі прогнозування дозволяють отримати адекватність моделі з точністю до 99% що дозволяє значно економити час та ресурси.

**Постановка проблеми.** Основний і найбільш важливий етап при розробці екзотермічної шихти – підбір та співвідношення компонентів, яке, як правило, визначається в залежності від функціонального призначення шихти та необхідних властивостей отриманого матеріалу. Теоретичний розрахунок компонентів екзотермічної шихти не завжди можливий, оскільки більшість її компонентів, такі компоненти як: окалина, стружка чи шлам алюмінію, є вторинними продуктами виробництва та мають нестабільний хімічний склад. Тому, доцільним є розробка математичної моделі яка дозволить прогнозувати технологічні параметри горіння екзотермічної шихти в залежності від її кількісного та якісного складу. Прийнято вважати, що модель є адекватною якщо вона забезпечує результат з точністю не менше 80%, тому метою роботи є

розробка моделі для прогнозування технологічних параметрів горіння екзотермічної шихти в залежності від її кількісного та якісного складу яка б відповідала цим вимогам.

**Аналіз літературних джерел.** Термодинамічні розрахунки екзотермічної реакції, приведені у роботі [1], справедливі якщо в результаті реакції утворюється один продукт. Також авторами роботи встановлено, що при збільшенні в окалині вмісту  $Fe_2O_3$  калорійність терміту збільшується і як наслідок, зростає температура горіння шихти. Проведені термодинамічні дослідження виявили причину утворення газової фази термітної реакції – випаровування заліза в результаті його кипіння. На основі цих висновків розроблені заходи щодо запобігання даного явища які використані при побудові моделі оптимізації шихтового складу екзотермічної шихти.

Математична модель оптимізації шихтового складу екзотермічних шихт, що приведена у роботі [2], дозволяє прогнозувати механічні властивості отриманого матеріалу в залежності від стехіометричного співвідношення компонентів шихти. Модель прогнозування механічних властивостей матеріалу корелювали з експериментальними даними із застосуванням кореляційно-регресивного методу, що дозволило знизити похибку до менш ніж 8 %. На основі термохімічних розрахунків авторами запропоновано склад екзотермічної шихти для нагріву ливникових форм. Недоліком даної моделі є те, що вона не може бути використана для матеріалів з нестабільним хімічним складом, такі як окалина та відходи алюмінію.

**Метою роботи** побудова матричної моделі для оптимізації шихтового складу екзотермічної шихти з використанням числових значень що отримані експериментально.

**Викладення матеріалу.** Побудова моделі здійснювалась для екзотермічної шихти такого складу [3] (табл.1)

Таблиця 1

Склад екзотермічної шихти для зварювання сталей

окалина сталі 18X2H4MA	68-72
алюмінієвий порошок ПА-3 ГОСТ 6058-73	16-20
мідний порошок ПМС-1 ГОСТ 4960-75	3-5
селітра калієва ГОСТ 19790-74	7-9
феромарганець ФМн75А	0,5-0,8
феросиліцій ФС45	1,5-2,2

Важливим аспектом при побудові математичної моделі є визначення її адекватності, яке як правило, визначають порівнявши її дані з даними, що отримані експериментально. Експериментальне дослідження показників горіння запропонованої екзотермічної суміші проводи за допомогою установки описаної в роботі [4]. В якості змінних факторів для оптимізації шихтового складу екзотермічної шихти було обрано: вміст масової частки порошку алюмінію ( $X_1$ ), вміст порошку окалини ( $X_2$ ), вміст порошку міді ( $X_3$ ), вміст порошку селітри калієвої ( $X_4$ ). Вміст порошоків феромарганцю та феросиліцію на хід екзотермічної реакції не досліджувався, оскільки дані порошки не є піроформними а використовуються лише у якості присадок. Під час реалізації кожного з етапів експерименту матриці фіксували наступні результати: максимальну температуру горіння  $T_r$ , коефіцієнт виходу гідного металу  $K_r$ , швидкість проходження реакції  $S_p$  та коефіцієнт розбризкування металу  $\psi_{p,m}$ .

Математичне моделювання досліджуваного процесу здійснювалося на основі моделі множинної лінійної регресії [5]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \Delta, \quad (1)$$

де  $a_0$  — вільний член регресії;  $a_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  — коефіцієнти регресії при детермінованому факторі  $x_i$ , який показує, наскільки зміниться детермінована складова при зміні  $x_i$ ;  $y$  — функція, що описує властивості досліджуваної моделі,  $\Delta$  — похибка, випадкова складова, що визначає сумарну дію різних випадкових факторів.

Відповідно до [5] для побудови математичної моделі процесу горіння екзотермічної шихти запишемо формули (1) у матричному вигляді:

$$Y = X \cdot A + \Delta,$$

де  $Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$  — вектор-стовпець вибірових значень факторів зміни компонентів шихти;

$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}$ ,  $k = 4$ ,  $n = 27$  — регресійна матриця значень змінних

факторів співвідношення компонентів шихти, що доповнена одиничним стовпцем, який відповідає вільному члену регресії  $a_0$ ;

$A = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_k \end{pmatrix}$  — вектор-стовпець параметрів регресії;

$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \dots \\ \Delta_k \end{pmatrix}$  — вектор-стовпець вибірових реалізацій випадкової складової моделі.

Враховуючи, що система нормальних рівнянь має вигляд:

$$(X' \cdot X) \cdot A = X' \cdot Y,$$

де  $X'$  — транспонована матриця до матриці  $X$ , коефіцієнти моделі можна визначити:

$$A = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot Y. \quad (2)$$

Для проведення мінімальної кількості експериментів розроблено матрицю повного факторного експерименту (ПФЕ), з неповним типом плану  $3^k$  побудовану методом неповно блочного плану (ВJB-схеми) з планом типу  $2^k$  - ( $k < 2^k$ ), методика якого описана в роботі [5].

План-матриця експерименту та її реалізація наведені у таблиці 1, при побудові якої враховувалося, що для оцінки усіх коефіцієнтів регресійної лінійної моделі необхідно, щоб кожна змінна варіювалася хоча б на трьох різних рівнях. Це забезпечить невиродженість матриці.

Таблиця 2

Побудова матриці повного факторного експерименту з неповним типом

Параметр	Фактори								Відгуки			
	Кодоване позначення				Натуральні величини				T <sub>г</sub>	K <sub>г</sub>	S <sub>р</sub>	Ψ <sub>р.м</sub>
	Al	FeO	Cu	KNO <sub>3</sub>	Al	FeO	Cu	KNO <sub>3</sub>				
Розмірність	г	Г	Г	г	г	г	г	г	°C	%	с	%
Нижній рівень	-1				16	68	3	7	Експериментальні дані			
Середній рівень	0				18	70	4	8				
Верхній рівень	+1				20	72	5	9				
Крок варіювання	2	2	1	1	2	2	1	1				
№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
1	-1	-1	0	0	16	68	4	8	2450	56,8	8,6	10,5
2	+1	-1	0	0	20	68	4	8	2550	56,5	7,5	11,6
3	-1	+1	0	0	16	72	4	8	2450	63,2	7,6	9,8

4	+1	+1	0	0	20	72	4	8	2600	62,2	5,2	12,3
5	0	0	-1	-1	18	70	3	7	2400	58	6,8	8,6
6	0	0	+1	-1	18	70	5	7	2400	58,3	8	9
7	0	0	-1	+1	18	70	3	9	2400	55,2	7,6	10,2
8	0	0	+1	+1	18	70	5	9	2450	55,8	6,6	10,5
9	+1	0	0	0	20	70	4	8	2500	52,6	5,8	9,8
10	-1	0	0	-1	16	70	4	7	2400	56,6	6,3	9,5
11	+1	0	0	-1	20	70	4	7	2600	52,8	5,2	11,3
12	-1	0	0	+1	16	70	4	9	2400	55,4	6,1	9,8
13	+1	0	0	+1	20	70	4	9	2600	49,8	4,9	16,2
14	0	-1	-1	0	18	68	3	8	2600	52,4	5,5	16,3
15	0	+1	-1	0	18	72	3	8	2500	59,3	5,4	15,7
16	0	-1	+1	0	18	68	5	8	2550	55,3	5,2	14,6
17	0	+1	+1	0	18	72	5	8	2550	57,6	4,7	12,2
18	-1	+1	-1	+1	16	72	3	9	2450	55,1	7,3	10,5
19	-1	0	-1	0	16	70	3	8	2400	53,2	6,8	8,9
20	+1	0	-1	0	20	70	3	8	2600	50,2	4,9	14,3
21	-1	0	+1	0	16	70	5	8	2450	56,3	4,6	14,5
22	+1	0	+1	0	20	70	5	8	2650	50,6	4,6	15,5
23	0	-1	0	-1	18	68	4	7	2650	56	5,2	11,3
24	0	+1	0	-1	18	72	4	7	2600	57,3	5,4	10,5
25	0	-1	0	+1	18	68	4	9	2500	57,9	5,4	9,3
26	0	+1	0	+1	18	72	4	9	2550	59	5,7	8,9
27	+1	0	+1	+1	20	70	5	9	2550	54,5	5,5	10,5

Для досліджуваного процесу горіння шихти з використанням формул (2) було визначено відповідні коефіцієнти та побудовано функції відгуку мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= 1942,378 + 37,51528X_1 - 0,58546X_2 + 7,054855X_3 - 11,95365X_4 \\
 Y_2 &= 11,13778 - 0,764703X_1 + 0,876233X_2 + 0,700805X_3 - 0,702595X_4 \\
 Y_3 &= 20,967 - 0,313302X_1 - 0,118775X_2 - 0,291739X_3 + 0,024828X_4 \\
 Y_4 &= 11,90287 + 0,539194X_1 - 0,167916X_2 - 0,013758X_3 + 0,214579X_4
 \end{aligned} \quad (3)$$

Виконаємо перевірку статистичних гіпотез про значущість вибірових коефіцієнтів функцій відгуку, що побудовані на основі множинної лінійної регресії.

Для кожного з коефіцієнтів була висунута нульова гіпотеза про те, коефіцієнт статистично незначно відрізняються від нуля:  $H_0: a_k = 0$ , яка була встановлена за допомогою статистичного критерію:

$$t_j = \frac{a_j}{\sigma \sqrt{c_{jj}}},$$

де  $\sigma^2$  — незміщена оцінка дисперсії:  $\sigma^2 = \frac{1}{n-k-1} \sum_{j=1}^n (y_j^{експ} - y_j^{мод})^2$ ,  $c_{ij}$  — елементи

матриці, оберненої до матриці коефіцієнтів нормальних рівнянь  $A = Z' \cdot Z$ ,

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1k} \\ 1 & z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nk} \end{pmatrix} \text{ — матриця центрованих значень факторів, } Z' \text{ — транспонована}$$

матриця до  $Z$ ,  $z_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_i$ ,  $\bar{x}_i$  — середні значення.

Для перевірки гіпотези використовували критерій Ст'юдента ( $t$ -критерій). Емпіричне значення  $t$ -критерію було співставлень з с табличним з  $n-k-1$  ступенями вільності і  $\alpha = 0,05$

рівнем значущості. Якщо  $t_{j,mod.} > t(\alpha, n-k-1)$ , то нульова гіпотеза повинна бути відхилена. Тому, коефіцієнт значно відрізняється від нуля і його слід зберегти у розрахований регресійній математичній моделі. Якщо ж  $t_{j,mod.} < t(\alpha, n-k-1)$ , то нульова гіпотеза приймається і відповідний коефіцієнт вважається незначним і виключається з рівняння регресії.

Результати статистичного аналізу наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

## Результати статистичного аналізу моделі

	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
$\sigma^2$	4421,0318	8,7075926	1,1714665	6,3048714
$a_0$	1942,378	11,13778	20,967	11,90287
$a_1$	37,51528	-0,764703	-0,313302	0,539194
$a_2$	-0,58546	0,876233	-0,118775	-0,167916
$a_3$	7,054855	0,700805	-0,291739	-0,013758
$a_4$	-11,95365	-0,702595	0,024828	0,214579
$t_{a_0}$	8,321	7,432	9,235	8,138
$t_{a_1}$	6,238	4,602	3,321	7,328
$t_{a_2}$	5,782	6,023	6,347	6,212
$t_{a_3}$	4,923	3,943	5,002	4,384
$t_{a_4}$	8,639	6,343	7,548	7,264
$t(\alpha, n-k-1)$	1,717			

З таблиці 3 видно, що усі коефіцієнти побудованих моделей є значимими, тому функції відгуку (3) залишимо без змін.

Для оцінки узгодження побудованої регресійної моделі процесу горіння екзотермічно шихти із системою значень, отриманих під час експерименту (таблиця 1), було визначено вибіркового коефіцієнт детермінації:

$$d = 1 - \frac{S_R^2}{S^2},$$

де  $S_R^2 = \sum_{j=1}^n (y_j^{експ} - y_j^{мод})^2$ ,  $S^2 = \sum_{j=1}^n (y_j^{експ} - \bar{y})^2$  та виконано перевірку адекватності

моделі згідно критерію Фішера:

$$F_{k,n}^{розр} < F_{\alpha,k,n}^{табл}.$$

Результати розрахунків щодо адекватності моделі відповідно до критерію Фішера наведено у таблиці 4.

Таблиця 4.

## Результати перевірки адекватності моделі

	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
$S_R^2$	3602,3222	7,0950755	0,9545283	5,1373026
$S^2$	6913,58025	10,2395336	1,2538546	5,87871056
$F_{k,n}^{розр}$	0,47894983	0,30709	0,238725	0,126117
$F_{\alpha,k,n}^{табл}$	2,76			

З таблиці 4 видно, що усі отримані рівняння, що описують процес горіння екзотермічної шихти є адекватними з рівнем значущості  $\alpha = 0,05$ .

**Висновки.** Побудована матрична модель для оптимізації шихтового складу екзотермічної шихти дозволяє прогнозувати технологічні параметри горіння шихти, а саме: температуру горіння, коефіцієнт розбрикування металу, кількість виходу гідного та швидкість проходження реакції. Застосування даної моделі дозволить значно скоротити кількість натурних експериментів для визначення показників горіння екзотермічних шихт.

#### **Література:**

1. Яценко В.В. Термодинамические исследования горения железо-плюмнииевого термита / В.В. Яценко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, выпуск 2(23), 2011. – С. 123-128.
2. Кукуй Д. М. Построение математической модели для оптимизации составов эффективных экзотермических смесей / Д. М. Кукуй, Ю. Н. Фасевич // Литье и металлургия, 3(57), 2017. – С. 108-110.
3. Патент України на корисну модель № UA 115297 Екзотермічна суміш для наплавлення та зварювання сталей; опубл. від 25.09.2017, Бюл.№ 5.
4. І.В. Савюк, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна, Н.Т. Зубовецька // Параметри процесу горіння залізо-алюмінієвого терміту на основі окалини // Чеський науковий журнал "Modern Science – Moderní věda" № 3-2016, С. 28-33.
5. Власов А.Ф. Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук / Развитие научных и технологических основ повышения эффективности применения экзотермических смесей при электродуговой сварке электрошлаковых процессах. Мариуполь – 2016

Стаття надійшла до редакції 25.12.2017



УДК 620.191

**Г.О. Татарченко, М.В. Білошицький, Н.І. Білошицька, П.Є. Уваров**  
**КОРОЗИЯ СТАЛЕЙ В ОРГАНІЧНІЙ КИСЛОТІ У ПРИСУТНОСТІ ОЗОНУ**

*Вивчено вплив озону на корозійно-електрохімічну поведінку нержавіючих і вуглецевих сталей в оцтовій кислоті та фосфатному буферному розчині. Визначено, що сталі аустенітного класу корозійностійкі у всіх досліджуваних озонуваних середовищах, швидкість корозії їх знижується під дією озону; для сталей феритного класу швидкість корозії зростає в 3-4 рази, вони є нестійкими і застосовувати їх в даних середовищах не рекомендується. Озон знижує корозійну стійкість вуглецевої сталі, легованої марганцем значніше, ніж без нього, за рахунок доокиснення іонів марганцю.*

*Ключові слова:* озон, окислення, сталь, корозія, електрохімія, кислотостійкість.

**Г.О. Татарченко, Н.В. Белошицкий, Н.И. Белошицкая, П.Е. Уваров**  
**КОРРОЗИЯ СТАЛЕЙ В ОРГАНИЧЕСКОЙ КИСЛОТЕ В ПРИСУТСТВИИ ОЗОНА**

*Изучено влияние озона на коррозионно-электрохимическое поведение нержавеющей и углеродистых сталей в уксусной кислоте и фосфатном буферном растворе. Определено, что стали аустенитного класса коррозионно-устойчивы во всех исследуемых озонируемых средах, скорость коррозии их снижается под действием озона; для сталей ферритного класса скорость коррозии возрастает в 3-4 раза, они являются нестойкими и применять их в данных средах не рекомендуется. Озон снижает коррозионную стойкость углеродистой стали, легированной марганцем, значительно, без него, за счет доокисления ионов марганца.*

*Ключевые слова:* озон, окисление, сталь, коррозия, электрохимия, кислотостойкость.

**G.O. Tatarchenko, M.V. Biloshytskyi, N.I. Biloshytska, P.E. Uvarov**  
**CORROSION OF STEEL IN ORGANIC ACID IN THE PRESENCE OF OZONE**

*The influence of ozone on the corrosion-electrochemical behavior of stainless and carbon steels in acetic acid and phosphate buffer solution was studied. It is determined that the austenitic steels are corrosion-resistant in all investigated ozonized media, their corrosion rate is reduced by the action of ozone; for steels of a ferritic grade the corrosion rate increases by 3-4 times, they are unstable and it is not recommended to use them in these media. Ozone reduces the corrosion resistance of carbon steel doped with manganese, much more, without it, due to additional oxidation of manganese ions.*

*Key words:* ozone, oxidation, steel, corrosion, electrochemistry, acid resistance.

**Постановка проблеми.** В даний час встановлено [1], що в 2% ÷ 5%-вої оцтової кислоти або в фосфатному (рН 7) буферному розчині методом прямого озонування гомологів піридину в м'яких умовах при температурах 0°÷20°C (краще при знижених температурах) можна здійснювати синтези відповідних N-оксидів. Проте, проблеми апаратурного оформлення процесів синтезу не вирішені і для введення їх у виробництво необхідно провести корозійно-електрохімічні дослідження сталей, які використовуються в промисловості.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Оцтову кислоту можна розглядати як типовий приклад сильної органічної кислоти, вона набагато слабкіше сірчаної або соляної кислот, і її низька корозійна активність дозволяє вибирати менш леговані і дорогі металеві матеріали і на підприємствах, що виробляють або споживають оцтову кислоту в якості корозійностійких металевих матеріалів, найбільш часто вживають алюміній, вуглецеві і нержавіючі сталі леговані хромом, нікелем, молібденом, титаном та іншими металами з різним їх вмістом [2].

Термін служби кислотостійких нікельвмісних сталей в оцтовій кислоті залежить від її температури, концентрації, ступеня аерації, характеру перемішування та інших чинників. Для сталей типу X18N10T температура є більш важливим фактором, ніж концентрація кислоти. Хромонікелеві сталі цілком придатні, якщо концентрація кислоти не перевищує 50 мас.%, А температура 80°C. При більш високій температурі і концентрації віддають перевагу застосуванню хромонікельмолібденових сталей, що володіють високою стійкістю в гарячій оцтовій кислоті та її парах [3]. Вміст в хромонікелевих сталях 2÷4% Мо підвищує їх загальну корозійну стійкість і усуває точкову корозію. Вуглецева сталь Ст.3 або залізо-армко в 5%-вій оцтовій кислоті розчиняється зі швидкістю не вище 0,15 г/(м<sup>2</sup>·год) [4]. Нікель в киплячій 5-100%-вій кислоті кородує зі швидкістю від 0,275 г/(м<sup>2</sup>·год) до 0,350 г/(м<sup>2</sup>·год), при сильному аеруванні швидкість зростає до 1,5 г/(м<sup>2</sup>·год) при 20°C. Молібден стійкий до корозійної дії оцтової кислоти. У оцтовій кислоті при всіх концентраціях (крім крижаної) титан є корозійностійким, швидкість його не перевищує 0,01 г/(м<sup>2</sup>·год) [5].

Озон в залежності від того, яку сполуку він атакує, приймає відповідну електронну структуру. Він пристосовується до системи, до якої наближається. Якщо ця система ненасичена, то, як правило, озон реагує як бірадикал. Якщо ця система радикальна, то він може вихоплювати

один електрон з утворенням озонидів. Озон може реагувати як нуклеофіл– негативно зарядженим кінцем йде приєднання до металу за місцем електронної вакансії. Озон може реагувати як електрофіл– позитивно зарядженою стороною своєї молекули (або в момент атаки формується позитивний заряд на кінці молекули) [6]. З огляду на особливості будови, хімічної поведінки і властивостей озону, можна припускати, що він повинен робити істотний вплив на корозійні процеси, особливо в кислих середовищах[7-8].

**Мета роботи**– вивчити вплив озону на корозійно-електрохімічну поведінку нержавіючих і вуглецевих сталей в оцтовій кислоті і фосфатному буферному розчині.

**Викладання основного матеріалу.** Дослідження проводилися на зразках сталей А 516-55 (09Г2С), А 284Gr.D (Ст.3), AISI 316Ті (10Х17Н13М2Т) і AISI 439 (08Х17Т) при температурі 20°C. Поляризаційні криві знімали на потенціостаті П-5848 при швидкості розгортки 1,44 В/год. Зразки обробляли за стандартною методикою і перед зняттям поляризаційних кривих катодно поляризували 3 хвилини струмом щільністю  $i = 10 \text{ А/м}^2$ . Робочі розчини – 5% оцтова кислота з добавкою 5% піридину або 5% 2,6-диметилпіридину. Електрод порівняння – хлоросрібний (потенціали перераховані за шкалою н.в.е.). Швидкість корозії сталей визначали за втратою маси зразків, занурених у робочі розчини на 100 годин. Озонували середовища шляхом пропускання озono-повітряної суміші через робочий об'єм комірки зі швидкістю 1 л/хв. Концентрація озону в газовій фазі становила  $0,1 \text{ моль/м}^3$ .

Сталь AISI 316Ті аустенітного класу корозійностійка звичайна застосовується в зварних конструкціях, які працюють в умовах впливу фосфорної, оцтової кислот та інших середовищах підвищеної агресивності, призначені для довгострокової служби.

Потенціал корозії  $E_{\text{кор}}$  сталі AISI 316Ті в 5%-ому розчині оцтової кислоти встановлюється на значенні 0,27В, а сталь в цих умовах знаходиться в пасивному стані (рис.1). Введення озону підвищує  $E_{\text{кор}}$ , трохи збільшує щільності катодного і анодного струмів, проте швидкість корозії практично не змінюється і залишається низькою (табл.1) Корозійно-електрохімічні дослідження зварних з'єднань сталі AISI 316Ті виявили їх корозійну стійкість в озонованих оцтовокислих середовищах. Зміна температури істотних різниць в корозійно-електрохімічній поведінці не виявила, що дозволяє використовувати її в якості конструкційної в озонованих кислих середовищах.

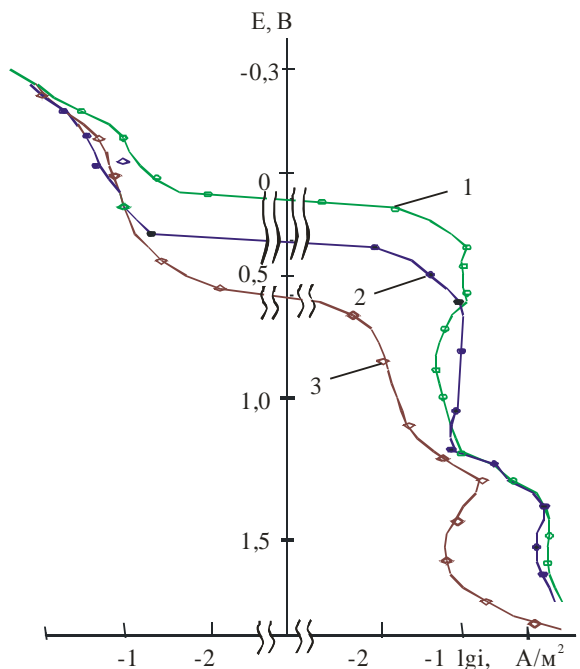


Рис.1. Поляризаційні криві сталей AISI 316Ті (1,2) і AISI 439 (3) при  $t = 20^\circ\text{C}$  в 5% АсОН: 1 – аерований розчин, 2,3 – озонований розчин

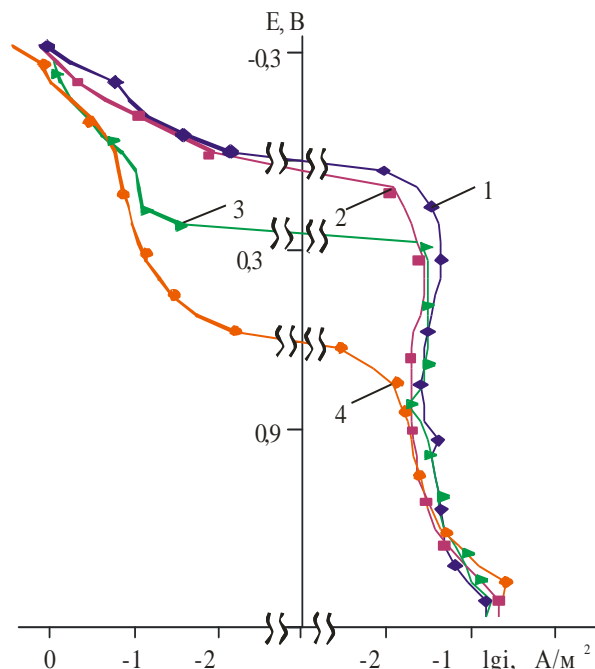


Рис.2. Поляризаційні криві сталі AISI 439 при  $t = 20^\circ\text{C}$  в 5% АсОН: 1,3 - зварні з'єднання; 2,4 – основний метал; 1,2 – аерований розчин; 3,4 – озонований розчин

Феритна нержавіюча сталь AISI 439 без вмісту нікелю і стабілізована титаном, застосовується для виробництва хімічної апаратури, виробів, що працюють в окисних середовищах. Сталь AISI 439 забезпечує і стійкість до міжкристалітної корозії на найвищому рівні, але не в умовах, де вона піддається дії ударних навантажень.

Озон в більшій мірі впливає на електрохімічну поведінку сталі AISI 439, ніж AISI 316Ti -  $E_{кор}$  позитивніше на 0,2 В, а катодний струм майже на порядок вище. Однак швидкість розчинення сталі AISI 439 в аерованому 5%-ому розчині АсОН низька і в присутності озону не збільшується (табл.1). Є тенденція до більшої пасивації сталей під дією озону в порівнянні з аерованими середовищами. При поляризації сталі AISI 439 в 5% АсОН на відміну від сталі AISI 316Ti встановлюється менш благородний  $E_{кор}$  і велика густина анодного струму (рис.2). У фосфатному буфері сталь AISI 439 знаходиться в пасивному стані з щільністю анодних струмів при потенціалах від -0,1В до 1,4 В, що не перевищують  $0,08 \text{ A/m}^2$  (рис.3), що відповідає низьким швидкостям корозії і використання даної конструкційної сталі в якості конструкційної.

Таблиця 1.

Швидкість корозії сталей  $K_m$  в 5% АсОН при  $t=20^0\text{C}$ .

Матеріал	$K_m, \text{ g/(m}^2\text{год)}$	
	аерований розчин	озонований розчин
AISI 316Ti	0,001	0,001
AISI 439	0,006 (0,008)*	0,003 (0,012)
A 284Gr.D	1,050	3,600
A 516-55	0,76	3,36

\* в дужках дані швидкості корозії зварних з'єднань

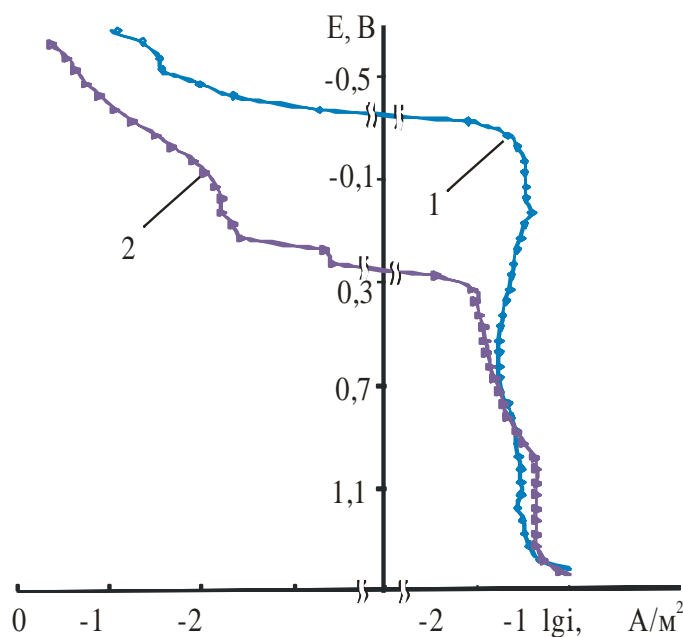


Рис.3. Поляризаційні криві сталі AISI 439 при  $t = 20^0\text{C}$  в буферному розчині: 1 – аерований розчин; 2 – озонований розчин

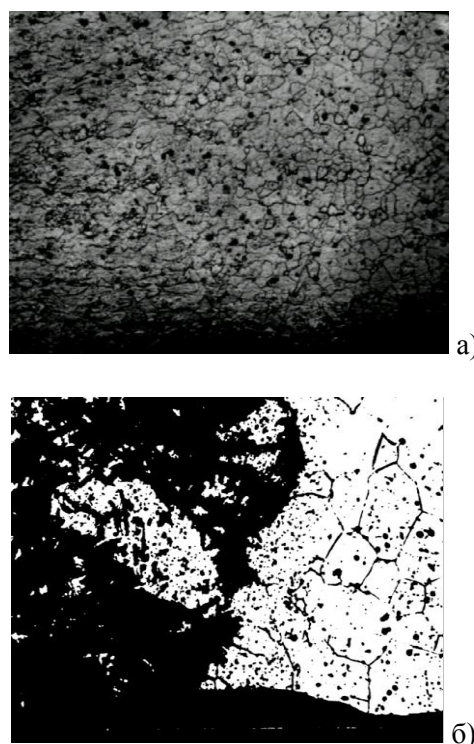


Рис. 4. Мікроструктура сталі AISI 439 після 100 годин перебування в озонованому розчині 5% АсОН: а) основний метал ( $\times 200$ ); б) зварний шов ( $\times 500$ )

Одним з головних недоліків феритних нержавіючих сталей є їх схильність до окрихчування і МКК після охолодження з температур 1000–1300°C, що обмежує можливості їх застосування в машинобудуванні для виготовлення зварної апаратури [7]. Так само як і для аустенітної сталі нагрів в процесі зварювання створює умови для дифузії вуглецю і утворення карбідів. Корозія металів після зварювання відбувається на ділянках, що примикають до шву. Однак інтерес до феритної сталі високий, так як вони на 40% ÷ 50% дешевше аустенітних.

Поляризаційні криві зразків зварних з'єднань сталі AISI 439 в 5% АсОН представлені на рис.3. У всіх випадках анодні струми на зварних зразках вище, ніж на основному металі,  $E_{кор}$  в неозонованому середовищі не змінюється, а в озонованому – розблагороджується. Швидкість корозії зварних зразків в неозонованій оцтової кислоті також висока, але метал залишається досить стійким (табл.1). Для зразків зварних з'єднань озонування розчинів сприяє меншій депольризації, в порівнянні з основним металом, але підвищує швидкість корозії до 0,020 г / (м<sup>2</sup>·год).

Металографічні дослідження зварних з'єднань сталі AISI 439 показали, що мікроструктура металу феритно-карбідна з зерном 7-8 балів, витягнутим уздовж прокату, структура зварного шва – феритно-карбідна з феритними полями зони термічного впливу (рис.4). На зразку видно характерні ділянки крупного і рекристалізованого зерна. Корозії в основному металі і зварному з'єднанні не виявлено.

Поведінка зварних зразків незначно відрізняється від основного металу, що дозволяє використовувати сталь AISI 439 в якості конструкційної для озонованих середовищ слабких оцтовокислих розчинів.

Вуглецеві сталі – найпоширеніший конструкційний матеріал. За обсягом застосування сталі цього класу переважають всі інші. Характеристики міцності вуглецевих сталей підвищуються зі збільшенням вмісту вуглецю, при цьому їх зварюваність погіршується, так як зростає небезпека утворення гарячих тріщин у шві. При вмісті понад 0,5% С сталі практично не зварюються методом електрошлакового зварювання без спеціальних прийомів [9].

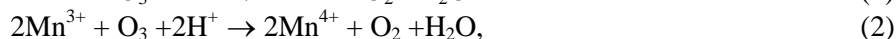
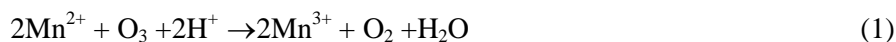
Сталь А 284Gr.D не має обмежень зварюваності, не схильна до відпускнуї крихкості і не має флокеночутливості. Цю сталь можна зварювати як без підігріву і попередньої термічної обробки, так і штампувати в холодному і гарячому стані, а також піддавати витяжці. Завдяки цим якостям конструкційна сталь А 284Gr.D завжди користується попитом серед будівельників і обробників металу. Вона незамінна для незварних і зварних конструкцій, для деталей, що працюють при позитивних температурах. Рами, каркаси, кожухи і щитки в основному варять зі сталі цієї марки. Нерідко з неї роблять кожухи, кришки і корита верстатів, інші малонавантажени деталі, що працюють без тертя.

Поляризаційні криві сталі А 284Gr.D в фосфатному буферному розчині при 20°C мають складний характер. Спостерігаються дві області активного розчинення з густиною критичного струму при потенціалах –0,27В і 0,17В близько 12 А/м<sup>2</sup>. При зміщенні потенціалу в позитивну сторону до 1,32В сталь повільно пасивується, а потім спостерігається різке збільшення щільності анодних струмів, обумовлене, швидше за все, окисленням води до молекулярного кисню. Введення озону знижує анодні щільності струмів в широкому інтервалі потенціалів –0,3÷1,0 В, потенціал корозії зміщується на 0,05В позитивніше, але А 284Gr.D знаходиться в пасивному стані з густиною анодного струму 0,5÷0,6 А/м<sup>2</sup>. Однак сталь А284Gr.D не знаходить застосування в створенні несучих елементів зварних конструкцій.

Найбільш доцільний шлях підвищення міцності металу шва полягає в збільшенні вмісту марганцю, оскільки це не супроводжується зниженням технологічної міцності металу шва, що характерне сталі А516-55. Марганець підвищує схильність металу до загартування і зміцнює ферит. Так, при легуванні металу шва 1,5% Mn (0,12÷0,14% С) досягаються ті ж характеристики міцності, що і при 0,22÷0,24% С (0,5-0,7% Mn). Метал шва в першому випадку має більшу стійкість проти кристалізаційних тріщин і проти переходу в крихкий стан. Позитивний вплив на міцність впливають також і невеликі добавки в метал шва нікелю, хрому та інших легуючих елементів. Серед характеристик, якими володіє сталь А 516-55 подібної марки, слід виділити підвищену механічну міцність, стійкість до температурних впливів, а також можливість проведення гарту і відпустки. Також легка зварюваність дозволяє виготовляти з листового прокату цієї марки складні конструкції для хімічної, нафтової, будівельної, суднобудівельної та інших галузей. Застосовуючи загартування і відпуск виготовляють якісну трубопровідну арматуру. Висока механічна стійкість до низьких температур також дозволяє з успіхом застосовувати труби з А 516-55 при низьких температурах.

При введенні озону в оцтовокислий розчин електрохімічна поведінка сталей А 516-55 і А 284Gr.D не змінюється (рис.5). Анодні струми характеризуються високою щільністю до  $0,34 \text{ A/m}^2$ , відсутня пасивна область. Згідно гравіметричним вимірам обидві сталі є корозійно-малостійкі. Але цікаво відзначити, що озон знижує корозійну стійкість сталі А 516-55, легованої марганцем значніше, ніж А 284Gr.D (табл.1). Марганець, будучи металом змінної валентності, здатний бути як окиснювачем, так і відновлювачем.

Ймовірно, що інтенсивне розчинення А 516-55 насичує приелектродний шар іонами марганцю і наявність озону призводить до таких реакцій:



що сприяють більшому розчиненню сталі А 516-55, ніж А 284Gr.D. Зі збільшенням кислотності середовища реакції окислення гальмуються внаслідок зниження концентрації гідратованих іонів  $\text{Mn}(\text{OH})^+$ , які реагують з озоном з більшою швидкістю, ніж іони  $\text{Mn}^{2+}$  [9].

Таким чином, присутність марганцю в складі сталі А 516-55 погіршує її електрохімічну і корозійну поведінку в озонованому кислому середовищі в порівнянні з А 284Gr.D. Отже, корозійна стійкість вуглецевих сталей максимальна в однофазних і однорідних матеріалах, в цьому випадку корозія в кислих розчинах протікає переважно рівномірно.

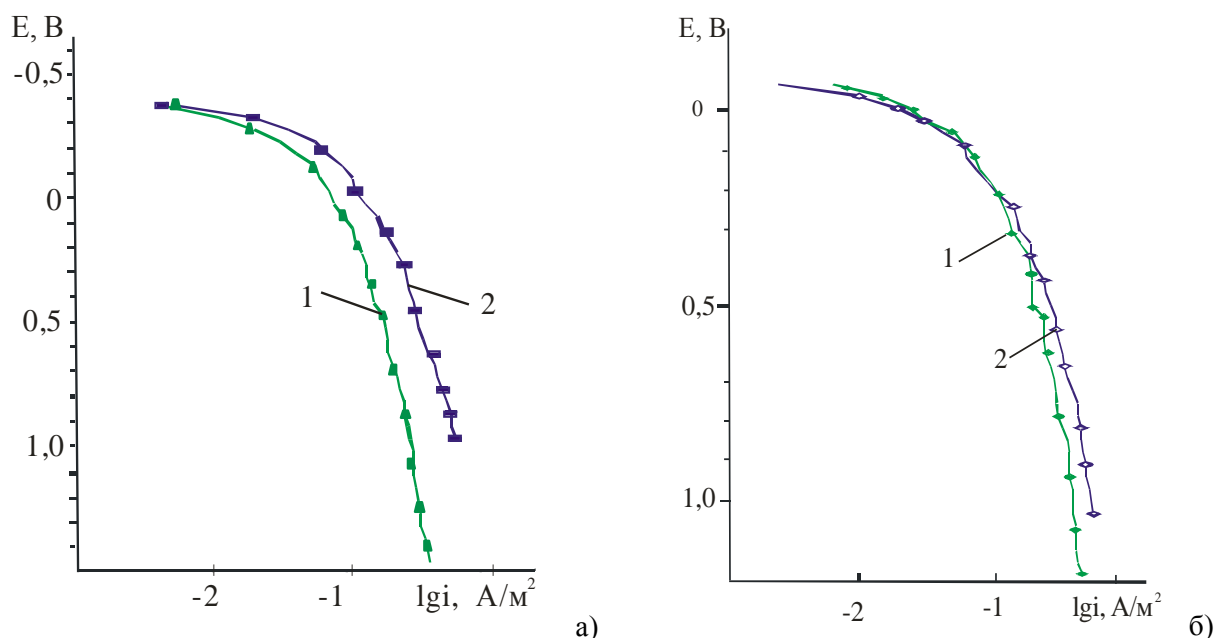


Рис.5. Анодні криві вуглецевих сталей в 5% АсОН при 20°C:  
а) А 284Gr.D; б) А 516-55; 1 –керований розчин; 2 – озонований розчин

**Висновки.** На підставі отриманих результатів встановлено, що:

сталі AISI 316Ti і AISI 439 корозійностійкі у всіх досліджуваних озонованих середовищах – слабких оцтових і фосфатному буферному;

зварні з'єднання сталі AISI 439 в озонованих розчинах менш корозійностійкі ніж основний метал; нержавіючі сталі AISI 316Ti та AISI 439 можна використовувати для апаратурного оформлення в процесах окислення з використанням озону;

озон знижує корозійну стійкість сталі А 516-55, легованої марганцем, значніше, ніж А 284Gr.D, за рахунок доокиснення іонів марганцю;

в присутності озону в слабо концентрованих розчинах оцтової кислоти швидкість корозії А 284Gr.D і А 516-55 зростає в 3-4 рази і вони є нестійкими і застосовувати в даних середовищах не рекомендується.

**Список використаних джерел**

1. Бернашевский Н.В. Окисление гомологов пиридина озонем: дис. канд. хим. наук: 02.00.03/ Бернашевский Н. В. Донецк, 1985. -133 с.
2. [http://splav-kharkov.com/analog/zm\\_tabl\\_rus.php](http://splav-kharkov.com/analog/zm_tabl_rus.php)
3. Петров Л.П. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов/ Петров Л.П., Сопрунок Н.Г. - К.: Наук, думка, 1991. – 214 с.
4. Справочник. Коррозия /Под ред. Шрайера Л.Л., сокр. пер. с англ. под ред. Синявского В.С. – М.: Металлургия. – 1981. – 632 с.
5. Воробьев Г.Я. Коррозионная стойкость металлов в агрессивных средах химический производств / Воробьев Г.Я. - М.: Химия. – 1975. – 815 с.
6. Тюпало Н.Ф. Растворимость озона и влияние растворителей на озонолитические реакции гетаренов. Эффекты сольватации / Н.Ф. Тюпало, А.Ф. Дмитрук // Докл. АН УССР. – сер. Б. – 1986. - №11. – С. 51-54.
7. Татарченко Г.О. О механизме пассивации металлов в кислых озонируемых средах Фізико-хімічна механіка матеріалів, Спец. випуск №2. -2001. - С.73-77.
8. Татарченко Г.О. Параметры окислительно-восстановительных процессов в озонируемых кислых средах Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 2004. - №5. – С. 43-47.
9. Сокол И.Я. Структура и коррозия металлов и сплавов. / Сокол И.Я., Ульянов Е.А., Фельдгандлер Э.Г. [и др]. -М.: Металлургия, 1989. – 316 с.
10. Тюпало Н.Ф. О механизме реакций озона с соединениями металлов переменной валентности / Н.Ф.Тюпало, О.И. Колбасина // Вісник Східноукраїнського Державного університету, Луганськ. – 1999. - №4(20). - С.31-35.

Рецензент: **Кузьменко Сергій Валентинович**, директор інституту транспорту і логістики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Северодонецьк), кандидат технічних наук, доцент.

Стаття надійшла до редакції 21.11.2017

УДК 629.783

**О.Д. Фесенко***Військовий інститут телекомунікації та інформатизації***ВДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ НАВІГАЦІЇ БПЛА**

*Розкрито вдосконалену методику побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА. Визначено блочну структуру інтелектуальної системи автоматичного управління. Описано функціональні та структурні особливості складових системи автоматичного управління системою навігації БПЛА. Запропоновано алгоритм реалізації інтелектуальної системи автоматичного управління із моделюванням на реальних об'єктах результату дієвості, з формуванням траєкторії польоту в умовах перешкод та за умови навігації групи БПЛА.*

*Ключові слова: безпілотний літальний апарат, навігація, траєкторія польоту, інтелектуальна система, автоматичне управління, перешкоди, група БПЛА.*

*Форм.2 . Рис. 6 Літ.8 .*

**А.Д.Фесенко***Военный институт телекоммуникации и информатизации***УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ НАВИГАЦИИ БПЛА**

*Раскрыто усовершенствованную методику построения интеллектуальной системы автоматического управления системой навигации БПЛА. Определена блочная структура интеллектуальной системы автоматического управления. Описаны функциональные и структурные особенности составляющих системы автоматического управления системой навигации БПЛА. Предложен алгоритм реализации интеллектуальной системы автоматического управления с моделированием на реальных объектах результата реализации, с формированием траектории полета в условиях помех и при навигации группы БПЛА.*

*Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, навигация, траектория полета, интеллектуальная система, автоматическое управление, препятствия, группа БПЛА.*

**A.D. Fesenko***Military Institute of Telecommunications and Information***IMPROVED METHODOLOGY OF BUILDING INTELLIGENT AUTOMATIC  
CONTROL SYSTEM FOR THE UNMANNED AERIAL VEHICLE NAVIGATION SYSTEM**

*An improved method of constructing an intelligent system for automatic control of the UAV navigation system is disclosed. The block structure of the intelligent automatic control system is defined. Functional and structural features of the components of the automatic control system of the UAV navigation system are described. An algorithm for implementing an intelligent automatic control system with simulation of the result of realization on real objects, with the formation of the flight trajectory in the conditions of interference and during navigation of the UAV group is proposed.*

*Keywords: unmanned aerial vehicle, navigation, flight trajectory, intelligent system, automatic control, obstacles, UAV group.*

**Вступ та постановка проблеми дослідження.** Проблеми автоматизованого управління комплексами БПЛА є актуальними в умовах сьогодення, спираючись на ситуацію, що склалася на Сході України. Використання БПЛА в умовах розвідки є пріоритетним напрямком формування стратегічних дій українських військових формувань. Побудова інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА здійснюється в якості системи збільшення стійкості для наземного пілота, що передбачає підвищення безпеки польотів та покращення характеристик траєкторії формування шляху БПЛА.

Використання інтелектуальних комплексів в управлінні, реалізує субоптимальний контроль за траєкторією польоту як одного БПЛА так і групи слідкуючих об'єктів.

Методика побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА базується на модельно-орієнтованому проектуванні. Для забезпечення польоту БПЛА в умовах перешкод є можливість здійснювати формування характеристик стабільності та керованості на всіх рівнях маневрування.

Головними джерелами вихідної інформації є математична модель динаміки БПЛА, виконуючи пристрої, сенсори, датчики, функції систем орієнтації та кінцеву точку шляху. На основі згаданих параметрів та обмежуючих факторів інтелектуальна система автоматичного управління системою навігації БПЛА повинна сформувати траєкторію шляху.



**Мета.** Запропонувати вдосконалену методику побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА. Визначити блочну структуру інтелектуальної системи автоматичного управління. Описати функціональні та структурні особливості складових системи автоматичного управління системою навігації БПЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Масштабність сучасних наукових досягнень за темою дослідження є суттєвою. Питання формування інтелектуальних систем управління БПЛА, на сторінках своїх праць, розглядало чимало як зарубіжних так і вітчизняних вчених.

А.Д. Летунов [1], дослідив головні аспекти оптимізації системи управління легкого безпілотного літального апарату за частотним критерієм, математично обґрунтував вибір напрямку руху та обхід перешкод.

Систему інформаційно-вимірювальну та управляючу малорозмірного безпілотного літального апарату підвищеної точності, обґрунтував схемами та розрахунком М. Н. Машнін [2].

Стосовно автоматичного управління системою навігації БПЛА, варто відмітити роботи: М. Н. Красильщикова та Г. Г. Себрякова [3], К. С. Амеліна [4], Ю. Б. Колесова [5], та ін.. Автори детально описують можливість застосування автоматичного управління системою навігації БПЛА в умовах перешкод та механізми формування траєкторії польоту.

Низка авторів сучасників М.Н. Ясечко, А.І. Дохов, М.Г. Іванець, О.В. Тесленко [6] описують, з фізико-математичної точки зору, вплив радіоелектронної апаратури при управлінні БПЛА з відокремленням параметрів сигналів випромінювачів.

Із зарубіжних вчених варто відмітити роботи Williams P., та Crump M [7] та Tang D., Li F., Shen N., і Guo S. [8].

Однак, незважаючи на результати наукових розробок відповідно до теми дослідження, питання формування вдосконаленої методики побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА залишається відкритим та потребує детального вивчення.

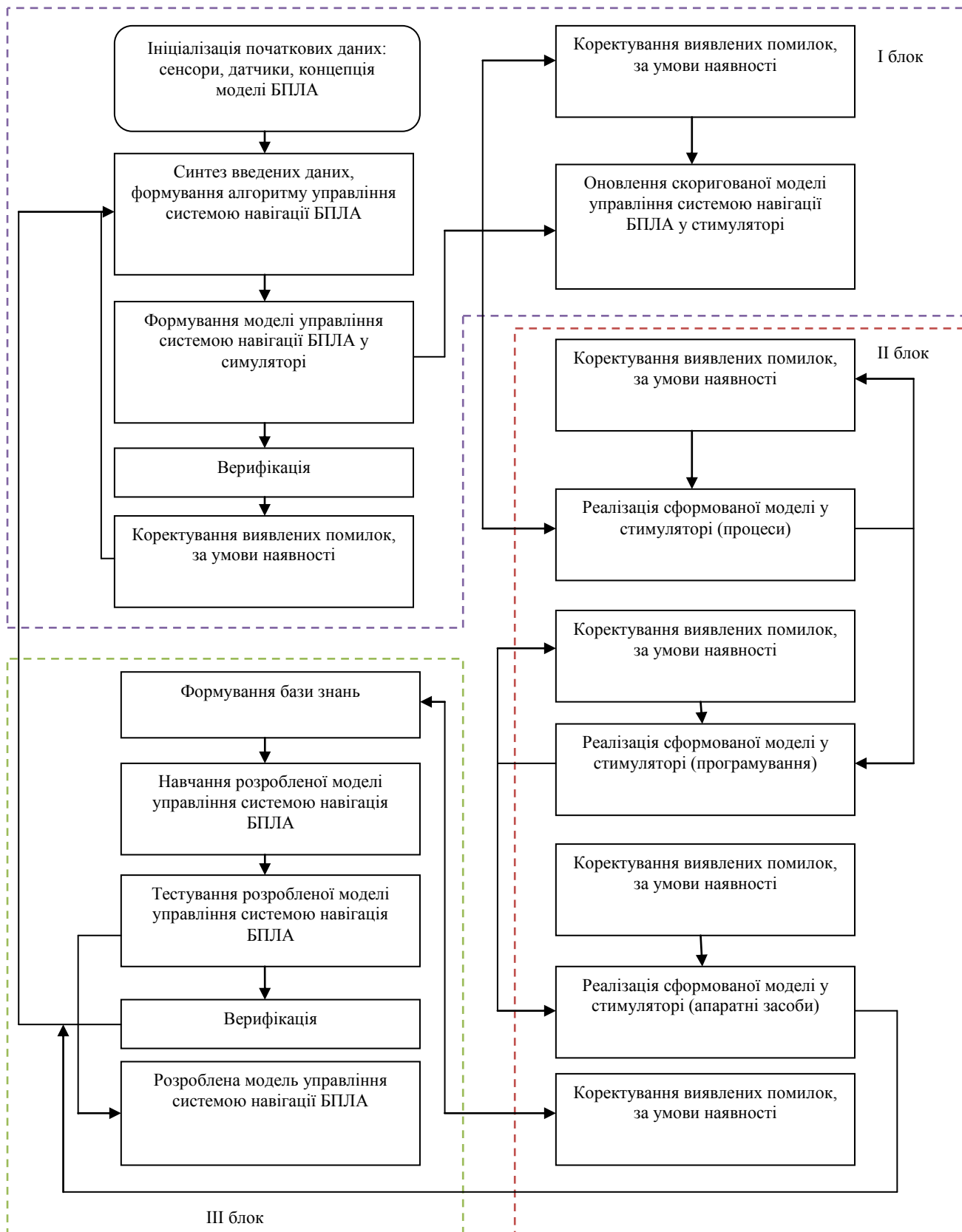
**Виклад основного матеріалу.** Методика побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА базується на трьох основних складових: формування концепції моделі та аналіз початкових даних, реалізація моделі у програмному середовищі та результат моделювання.

Методика побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА графічно представлена у вигляді блок-схеми на рис. 1. Перший блок є блоком формування концепції моделі та аналізу початкових даних. Даний блок передбачає збір інформації та її аналіз. До початкової інформації на цьому етапі відносяться математичні моделі БПЛА, зовнішні та внутрішні збудження, що впливають на БПЛА у період експлуатації, моделі та дані з сенсорів і датчиків.

За наявності всіх початкових даних формується концепція моделі управління, головні напрямки руху, перешкоди на шляху, проекція переміщення таке ін..

Другим блоком передбачається реалізація моделі у програмному середовищі. Означений блок є головним у рамках алгоритму. Відбувається синтез загальної концепції, виносяться, формуються та узагальнюються закони управління та алгоритми навігації системи. Враховуються режими роботи та умови виконання алгоритму, що розробляється. Здійснюється формування загальної моделі з використанням математичних моделей динаміки та збудження. Отримані моделі є фундаментальними у загальному алгоритмі розробки, на них базується подальший аналіз та формування остаточної моделі. На кожному окремому етапі відбувається обов'язкова перевірка та оцінка результатів моделювання, а також корекція, за необхідністю, параметрів законів управління та навігаційних алгоритмів.





Власна розробка автора

**Рис. 1. Блок-схема методики побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА**

Останній третій блок, передбачає формування бази знань, навчання системи та проведення тестування розробленої моделі з аналізом отриманих результатів та виводом остаточного

результату, щодо дієвості інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА.

З фізичної точки зору, інтелектуальна система автоматичного управління системою навігації БПЛА складається з навігаційної частини, інформаційної частини та частини, що відповідає за контроль остаточного результату.

Навігаційна система, за своєю сутністю є орієнтиром управління польотом БПЛА.

Інформаційна системи формується на базі глобальної системи позиціонування (GPS). У її склад входять: барометричний висотомір та магнітомір, які визначають поточне положення БПЛА та кут повороту.

Контрольна частина будується на мікропроцесорній техніці для реалізації алгоритмів управління. Дана частина передбачає наявність таких обов'язкових складових як: імітатор польотів, наземний контрольно-пропускний пульт, пульт дистанційного керування.

Інтелект метода ґрунтується на використанні повністю автоматизованих систем. Управління базується на принципі «наведення-стабілізація». Навігаційний метод відповідає за формування напрямку польоту та поточну координацію, яка ґрунтується на сигналах датчиків, систем орієнтації та навігації. Результат транслюється «Автопілоту», який вирішує завдання стабілізації. Обов'язковим є постійна перевірка наявності зв'язку по радіоканалу.

Система навігації інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА є безплатформною інерціальною навігаційною системою у комплексі зі спеціальними пристроями, які розпізнають втручання в управління апаратом і переводять його повністю в автономний режим, за умови виникнення перешкод. Навігація здійснюється за рахунок координат, які видаються безплатформною інерціальною навігаційною системою, БПЛА здійснює політ по певних точках.

Формування інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА для успішного маневрування у навколишньому середовищі, яке повно перешкод, повинно бути здатне обчислити траєкторії, які будуть плавати навколо цих перешкод, та зорієнтувати БПЛА на остаточне положення. Отже, головною є вимога, обчислення композитних траєкторії, які включають маневри ухилення.

Розглянемо простий випадок єдиної перешкоди, що перетинає прямолінійний сегмент стандартної траєкторії, як показано на рисунку 2. Траєкторія зараз складається з п'яти сегментів, з початкових, проміжних і кінцевих маневрів дуги, разом з двома прямими відрізками. У початковій і кінцевій дузі маневри модифіковано, щоб відрізки були дотичними до перешкоди кола. Тому два варіанта уникнення траєкторії повинні бути розраховані для кожної перешкоди.

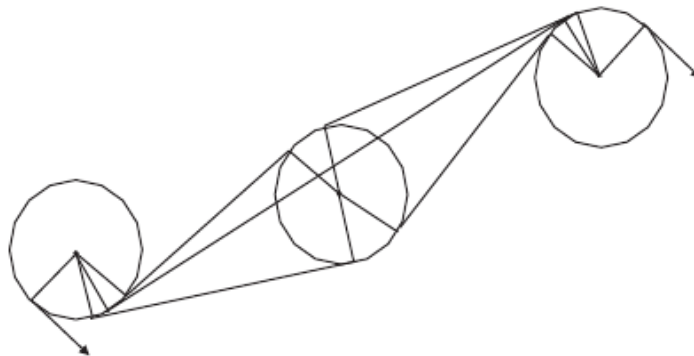


Рис. 2. Одиначна перешкода [7]

Якщо БПЛА виявляє перешкоду за допомогою датчика, розташованого на борту, БПЛА повинен повторно спланувати шлях або шляхом зміни кривизни між двома точками розглянутого випадку або перепланувати шлях з використанням проміжної точки. Перешкоди проходять перевірку визначення, якщо безпека перешкоди перетинає безпеку БПЛА. Якщо перетин не порожній, то перепланування не потрібно. Це може бути зроблено або шляхом збільшення кривизни траєкторії, або шляхом створення проміжної точки і проектуванні нового шляху, який включає в себе цю нову колійну точку.

Якщо припустити, що  $O_{obs}$  є перешкодою кола і безпеки БПЛА  $O_{safe}$ , умовою для уникнення зіткнення буде

$$O_{\text{obs}} \cap O_{\text{safe}} = \emptyset \quad (1)$$

Схема для перевантаженого середовища показана на рис. 3. Перешкоди моделюються у вигляді багатокутників. Области, які передбачаються стаціонарно та їх позиції відомі. Планування шляху з декількох безпілотних літальних апаратів через послідовність поз можна записати у вигляді

$$P_{s,i,j-1}(x_{s,i,j-1}, y_{s,i,j-1}, \theta_{s,i,j-1}) \xrightarrow{r_{i,j-1}(q)} P_{f,i,j}(x_{f,i,j}, y_{f,i,j}, \theta_{f,i,j})$$

$$i = 1, \dots, n_{UAV}, j = 2, \dots, n_p, |k_i(q)| < k_{\text{max}}, \prod_{\text{safe}}, \prod_{\text{lenght}} \quad (2)$$

де  $i = 1, \dots, n_{UAV}$  – це число безпілотних літальних апаратів,

$j = 2, \dots, n_p$  – кількість позицій (в тому числі час початку і кінця),

$x_{f,i,j}, y_{f,i,j}, \theta_{f,i,j}, x_{s,i,j-1}, y_{s,i,j-1}, \theta_{s,i,j-1}$  - координати початкової та кінцевої точки,

$P_{f,i,j}, P_{s,i,j-1}$  - початкова та кінцева точки,

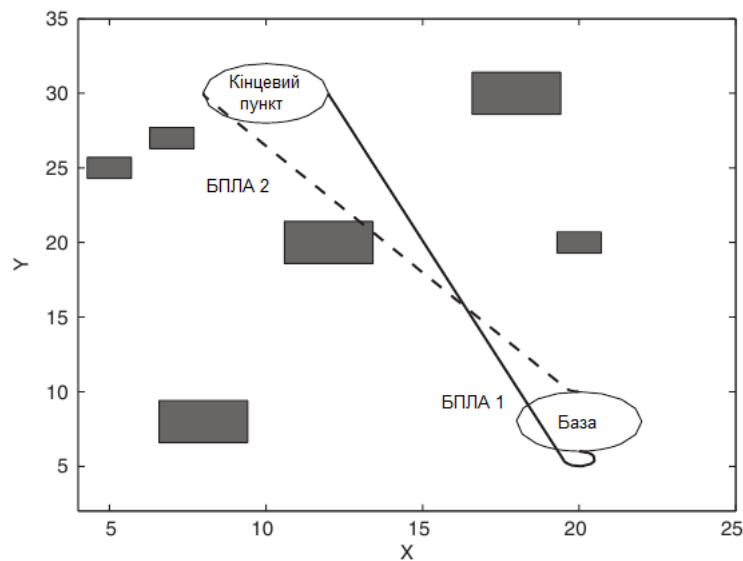
$r_{i,j-1}(q)$  - радіус кривизни руху,

$k_i(q)$  - кривизна руху,

$\prod_{\text{safe}}$  - кодобуток складових безпеки руху,

$\prod_{\text{lenght}}$  - кодобуток складових загального шляху слідування.

Прийmemo два БПЛА для реалізації алгоритму. Обидва БПЛА є однорідними за своїми фізичним можливостями, і, отже, вони обидва рухаються з тією ж швидкістю і мають обмеження кривизни.

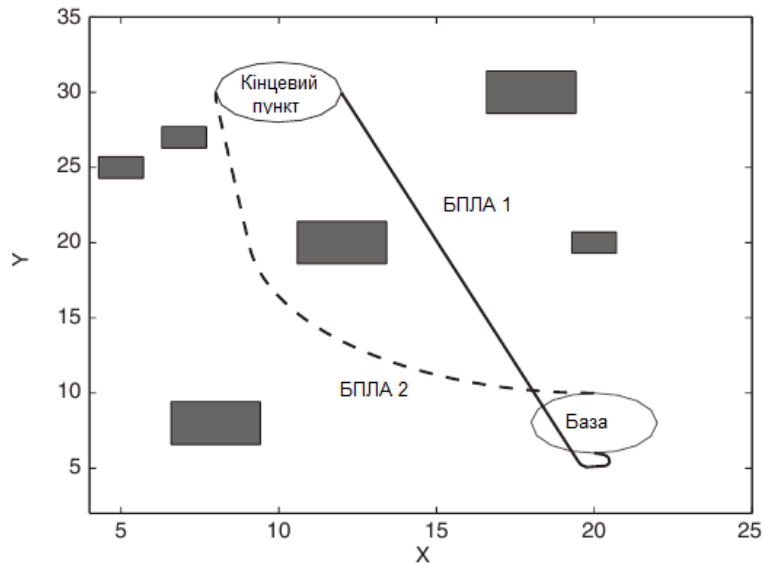


*власна розробка автора на основі [7,8]*

**Рис. 3. Моделювання шляхів двох безпілотних літальних апаратів у навколишньому середовищі з перешкодами**

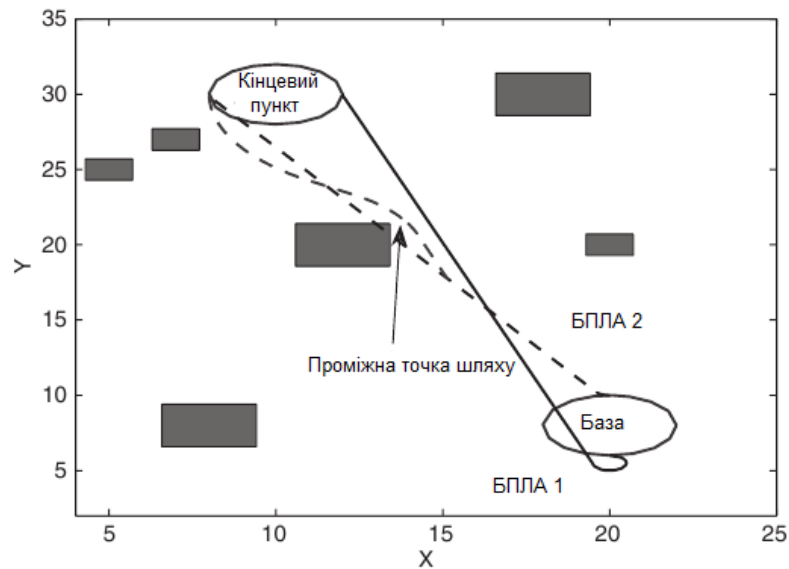
Рисунок 3 показує траєкторії двох безпілотних літальних апаратів у навколишньому середовищі з перешкодами. Шлях польоту другого БПЛА 2 перетинає перешкоду і шлях польоту першого БПЛА 1. Кривизна дуги шляху різноманітна щоб уникнути регіон загрози. Рисунок 4 показує, новий безпечний шлях після збільшення кривизни траєкторії БПЛА 2. Рисунок 5 показує рішення тієї ж задачі за допомогою проміжної точки.

Після того, як перешкоду перетину було виявлено, проміжні точки генерується.



*власна розробка автора на основі [7,8]*

**Рис. 4. Перепланування шляху БПЛА 2 з регулюванням кривизни**

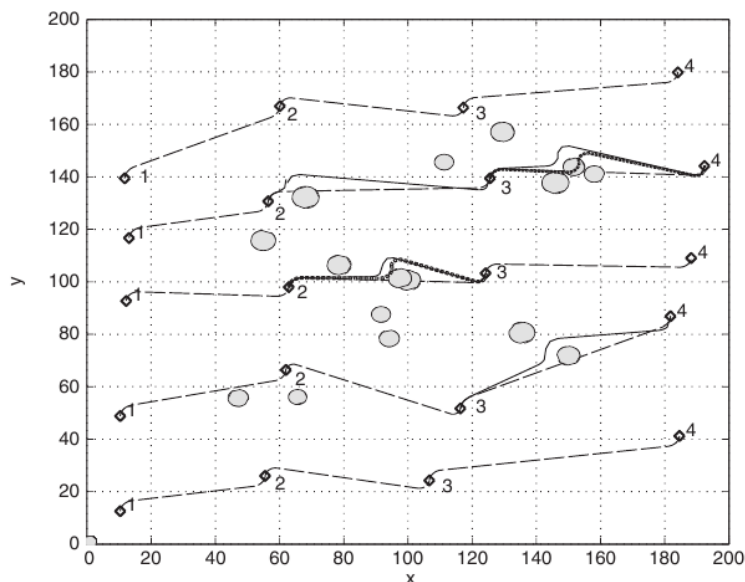


*власна розробка автора на основі [7,8]*

**Рис. 5. Перепланування шляху БПЛА 2 за допомогою проміжної точки**

Перешкоди перетину обробляються шляхом створення проміжних точок та / або пози. Перетин шляхів визначається інтерактивно для кротоїди дугових сегментів, а перетини ліній з еліпсів можуть бути виявлені за допомогою простої геометрії.

Проміжний шлях проводиться для кожного перехрестя в межах зони безпеки перешкоди. Після цього, шляхи переплановуються, щоб пройти через нові точки.



- - - Початковий шлях (так само, як кінцевий шлях, якщо ніяких змін)  
 \_\_\_\_\_ Остаточний шлях після модифікації  
 ..... Шляхи, отримані в ході проміжних точок

**Рис. 6. Результат моделювання: п'ять БПЛА кожен з чотирма точками у навколишньому середовищі з перешкодами**

Інтелектуальне управління системою навігації БПЛА вимагає обов'язкової розробки динамічної бібліотеки законів управління для різних завдань і умов польоту. Досягнення цієї мети вимагає багаторазового виконання процедури синтезу закону керування.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У рамках роботи розкрито методикою побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА. Наведена схема є вдосконаленою методикою побудови траєкторії польоту БПЛА в умовах перешкод. Система управління, що описана, може бути використана, у якості інтелектуальної системи стійкості БПЛА в умовах формування траєкторії польоту.

Алгоритм побудови інтелектуальної системи автоматичного управління системою навігації БПЛА є стійким до впливу зовнішніх та внутрішніх впливів.

Запропонована методика значно скорочує час проектування, та витрати на проектування. А результат моделювання є дієвим та безпомилковим.

#### Література:

1. Летунов Д. А. Оптимизация системы управления легкого беспилотного летательного аппарата по частотному критерию : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05 / Д. А. Летунов. – Рыбинск, 2011. – 16 с.
2. Машнин М. Н. Информационно-измерительная и управляющая система малоразмерного беспилотного летательного аппарата повышенной точности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / М. Н. Машнин. – Тула, 2013. – 20 с.
3. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. / под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова. М.: Физматлит. 2003. – С. 280.
4. Амелин К. С. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов. // Стахостическая оптимизация в информатике. СПб.: Изд-во С.-Петербур. Ун-та. 2009. – Вып. 5. – С. 157-166.
5. Колесов Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю. Б. Колесов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 239 с.
6. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства / М.Н. Ясечко, Дохов А.И., М.Г. Иванец, О.В. Тесленко / Под ред. М.Н. Ясечко. – Харьков: ХУПС, 2015. – 220 с.
7. Williams, P., and Crump, M., All-source navigation for enhancing UAV operations in GPS-denied environments. Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, Brisbane, September 2012.
8. Tang, D., Li, F., Shen, N., and Guo, S., UAV attitude and position estimation for vision-based landing. Proceedings of the 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, August 2011. – pp.4446- 4450.

Стаття надійшла до редакції 04.12.2017

УДК 539.3

**Н.В. Шинкарчук**

Рівненський державний гуманітарний університет

**КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ІЗОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ І ПРУЖНОГО ДИСКА**

*Проведено дослідження напруженого стану на контурі кругового отвору ізотропної пластинки, який частково спаяний з пружним круглим диском, за умови контактування берегів розрізу. Наведено інтегральні співвідношення, які визначають компоненти вектора зміщення через компоненти зовнішнього навантаження на контурі пружного круглого диска. Побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення контактних зусиль на контурі отвору пластинки та диска. Наближений розв'язок контактної задачі реалізовано методом механічних квадратур і колокації.*

*Ключові слова:* ізотропна пластинка, пружний диск, напружений стан, зона контакту, зона спаю, сингулярні рівняння.

**Н.В. Шинкарчук****КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНКИ С КРУГОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ И УПРУГОГО ДИСКА**

*Проведено исследование напряженного состояния на контуре кругового отверстия изотропной пластинки, частично спаянного с упругим круглым диском, при условии контакта берегов разреза. Приведены интегральные соотношения, которые определяют компоненты вектора смещения через компоненты внешней нагрузки на контуре упругого круглого диска. Построена система сингулярных интегральных уравнений с логарифмическими ядрами для определения контактных усилий на контуре отверстия пластинки и диска. Приближенное решение контактной задачи реализовано методом механических квадратур и коллокации.*

*Ключевые слова:* изотропная пластинка, упругий диск, напряженное состояние, зона контакта, зона спаю, сингулярные уравнения.

**N.V. Shynkarchuk****CONTACT INTERACTION OF AN ISOTROPIC PLATE WITH A CIRCULAR HOLE AND AN ELASTIC DISK**

*The solution of a contact task for an infinite isotropic plate with a circumferential cut and an elastic isotropic disk is proposed. The plate and the disk have to be soldered among themselves on the one part of the general contour, and a through symmetric section has to be on the other parts of the contour between them. By means of action of the concentrated moment loading enclosed in the center of the disk, the edges of a section of a lamellar design are in contact partially. Friction forces in the contact zone of the plate and the disk – are absent. The solution of such task assumes a tension component definition on a limit of the materials section and sets the size and position of the contact zone.*

*Boundary data of the problem on a site of smooth contact get out in the form of normal shifts equality of planimetric points of a plate and a disk, and on an interface site they get out in the form of shifts equality. Dependencies between the components of the displacement vector and contour points of the plate and the elastic disk and contact stresses are written down in the form of integral relations with logarithmic kernels. By the substitution of these expressions in boundary data of the problem, the system of four singular integral equations for definition of functions through which contact forces on the contact area and the juncture have been constructed. Except the received system of equations the condition of force equilibrium state of a disk has to be satisfied. An approximate solution of a problem is realized by mechanical quadratures and collocations method. The size and the position of the contact zone are defined by a dichotomy method. The results of numeric computation with incomplete contact of the section's edges are illustrated on schedules and in the spreadsheet.*

*Key words:* an isotropic plate, elastic disk, stained state, zone of contact, zone of solder, singular equations.

**Постановка проблеми.** Кусково-однорідні пластинки, спроєктовані у вигляді деталей машин і елементів конструкцій, широко використовуються в інженерній практиці. Їхня міцність значною мірою залежить від наявності на лінії поділу матеріалів дефектів типу тріщин (розривів), що виникли в процесі виготовлення, або експлуатації. Тріщини суттєво знижують допустиме зовнішнє навантаження та функціональний ресурс пластинчастих конструкцій. Дослідження і аналіз напруженого стану в околі таких дефектів становить значний теоретичний та практичний інтерес в сучасній інженерній механіці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Контактні задачі для однорідних і кусково-однорідних ізотропних пластин з розрізами по дузі кола, які перебувають в умовах узагальненого плоского напруженого стану, зведенням до задачі лінійного спряження [1] розглянуто в [2-4].

Шляхом представлення компонент вектора зміщення контурних точок інтегральними залежностями від компонентів тензора напружень з логарифмічними ядрами в [5] побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь для кусково-однорідної ізотропної пластинки з

криволінійним розрізом на лінії поділу матеріалів за умови контактування його берегів при її силовому та моментному навантаженні в центрі абсолютно жорсткого диска.

В роботі [6] розглянута контактна задача про передачу моментного навантаження до ортотропної пластинки через абсолютно жорсткий диск, вставлений в отвір пластинки з натягом; досліджується поява зазору між пластинкою і диском.

**Мета статті.** В даній статті запропоновано розв'язок контактної задачі для розробки інженерної методики розрахунку зварного з'єднання «колесо-вал» у передачах обертального руху, послаблених тріщинами на межі поділу матеріалів колеса та вала.

**Виклад основного матеріалу.** Зварне з'єднання «колесо-вал» служить для передачі обертального моменту від вала до зубчастого колеса. Такі з'єднання широко використовуються в тихохідних передачах обертального руху. Оскільки діаметр вала значно менший від діаметра колеса, останнє будемо моделювати нескінченною ізотропною пластинкою з круговим отвором одиничного радіуса. Частину вала, яка сполучена з колесом, будемо моделювати пружним круглим диском, виготовленим із того ж матеріалу, що й пластинка. Нехтуючи деформаціями згину і кручення вала та динамічними ефектами, вважаємо, що пара сил із моментом  $M_0$  (сталій обертальний момент, який передається на вал від двигуна) прикладена в центрі диска.

Нехай в круговий отвір одиничного радіуса нескінченної ізотропної пластинки товщиною  $2h$  без зазору і натягу вставлено пружний ізотропний диск такої ж товщини. Систему прямокутних  $(x, y)$  і полярних  $(\rho, \lambda)$  координат у серединній площині пластинки оберемо таким чином, щоб початок відліку співпадав з центром отвору, а полярна вісь співпадала з віссю абсцис. На симетричній ділянці  $\gamma_3 = [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$  контуру  $\gamma$  пружний диск спаяний з пластинкою. На іншій частині цього контуру між пластинкою і диском наявний наскрізний розріз. В центрі диска діє пара сил з моментом  $M_0$ . Внаслідок дії такого навантаження на ділянці  $\gamma_1 = [\alpha_1, \beta_1]$  пластинка вступає в гладкий контакт з диском. Контакт між пластинкою і диском на ділянках  $\gamma_2$  відсутній (рис. 1).

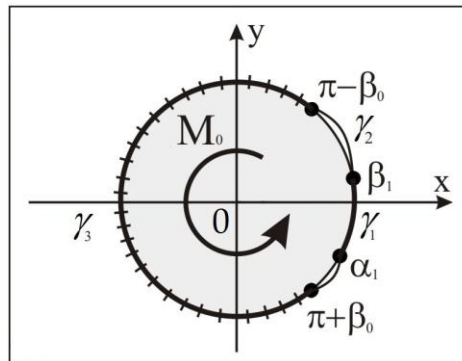


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Допустимо, що в процесі зварювання, чи експлуатації між колесом і валом виникла наскрізна тріщина (розріз). Для оцінки міцності з'єднання необхідно визначити напружений стан на межі поділу матеріалів колеса та вала, а також дослідити вплив на ці величини, при заданому навантаженні, положення і розмірів тріщини.

**Інтегральні рівняння задачі.** Граничні умови задачі в зоні гладкого контакту  $\gamma_1 = [\alpha_1, \beta_1]$  обираються у вигляді рівності нормальних зміщень контурних точок пластинки і диска [5, 7]

$$\cos \lambda (U - U^{(1)}) + \sin \lambda (V - V^{(1)}) = 0; \quad S_{\rho\lambda} = S_{\rho\lambda}^{(1)} = 0; \quad T_\rho = T_\rho^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma_1. \quad (1)$$

В зоні спаю  $\gamma_3 = [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$  граничні умови задачі формулюються у вигляді рівності компонент вектора зміщення пластинки і диска [1, 7]

$$U - U^{(1)} = 0; \quad V - V^{(1)} = 0; \quad S_{\rho\lambda} = S_{\rho\lambda}^{(1)}; \quad T_\rho = T_\rho^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma_3. \quad (2)$$

Тут  $T_\rho$ ,  $S_{\rho\lambda}$ ,  $T_\rho^{(1)}$ ,  $S_{\rho\lambda}^{(1)}$  – нормальні та дотичні зусилля на контурі отвору пластинки та на контурі пружного диска.

Компоненти вектора зміщення контурних точок пластинки для заданого навантаження визначаються за формулами [5]

$$\begin{aligned}
 2EhU &= (1-\nu) \int_{\alpha_1}^{\lambda} f_1'(t) dt + \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + c_1; \\
 2EhV &= (1-\nu) \int_{\alpha_1}^{\lambda} f_2'(t) dt - \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + c_2, \quad (3)
 \end{aligned}$$

аналогічні формули для диска при  $E^{(1)} = E$ ,  $\nu^{(1)} = \nu$ ,  $h^{(1)} = h$  з урахуванням (1), (2) мають вигляд [8]

$$\begin{aligned}
 2EhU^{(1)} &= (1-\nu) \int_{\alpha_1}^{\lambda} f_1'(t) dt - \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - \\
 &- \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - \frac{2M_0 + \tilde{\varphi}_0}{\pi} \sin \lambda - T^0 \cos \lambda + c_1^{(1)}; \\
 2EhV^{(1)} &= (1-\nu) \int_{\alpha_1}^{\lambda} f_2'(t) dt + \frac{2}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \\
 &+ \frac{2}{\pi} \int_{\pi-\beta_0}^{\pi+\beta_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \frac{2M_0 + \tilde{\varphi}_0}{\pi} \cos \lambda - T^0 \sin \lambda + c_2^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma, \quad (4)
 \end{aligned}$$

де  $\tilde{\varphi}_0$  – стала, яка визначає поворот диска як жорсткого цілого;  $E$ ,  $E^{(1)}$ ,  $\nu$ ,  $\nu^{(1)}$  – модулі Юнга і коефіцієнти Пуассона матеріалів пластинки і пружного диска;  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_1^{(1)}$ ,  $c_2^{(1)}$  – дійсні сталі;

$$f_1 + if_2 = i \int_{\alpha_1}^{\lambda} (T_{\rho}^* + iS_{\rho\lambda}^*) e^{it} dt; \quad T^0 = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} (f_2'(t) \cos t - f_1'(t) \sin t) dt.$$

Підставляючи (3), (4) в граничні умови (1), (2) та використавши позначення

$$\begin{aligned}
 f_1'(\lambda) + if_2'(\lambda) &= f_1^{\circ'}(\lambda) + if_2^{\circ'}(\lambda), & \lambda &\in [\alpha_1, \beta_1]; \\
 f_1'(\pi + \tilde{\lambda}) + if_2'(\pi + \tilde{\lambda}) &= \tilde{f}_1'(\tilde{\lambda}) + i\tilde{f}_2'(\tilde{\lambda}), & \tilde{\lambda} &\in [-\beta_0, \beta_0],
 \end{aligned}$$

одержимо систему з чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення шуканих функцій  $f_1^{\circ'}$ ,  $f_2^{\circ'}$ ,  $\tilde{f}_1'$ ,  $\tilde{f}_2'$

$$\begin{aligned}
 &\cos \lambda \left[ \frac{4}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda-\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \cos \lambda + \frac{2M_0 + \tilde{\varphi}_0}{\pi} \sin \lambda \right] + \\
 &+ \sin \lambda \left[ -\frac{4}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda-\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \sin \lambda - \frac{2M_0 + \tilde{\varphi}_0}{\pi} \cos \lambda \right] = \\
 &= \tilde{c}_1 \cos \lambda + \tilde{c}_2 \sin \lambda; \quad f_1^{\circ'}(\lambda) \cos \lambda + f_2^{\circ'}(\lambda) \sin \lambda = 0, \quad \lambda \in [\alpha_1, \beta_1]. \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{4}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda-\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \cos \lambda + \frac{2M_0 + \tilde{\varphi}_0}{\pi} \sin \lambda = \tilde{c}_1; \\
 &-\frac{4}{\pi} \left[ \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda-\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + T^0 \sin \lambda - \frac{2M_0 + \tilde{\varphi}_0}{\pi} \cos \lambda = \tilde{c}_2, \\
 &\lambda \in [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]; \quad \tilde{\lambda} \in [-\beta_0, \beta_0]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Тут  $\tilde{c}_1 = c_1^{(1)} - c_1$ ,  $\tilde{c}_2 = c_2^{(1)} - c_2$ .

До цієї системи рівнянь потрібно додати умови силової та моментної рівноваги диска [1, 5]

$$\int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_2^{\circ'}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) d\tilde{t} = 0; \quad \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f_1^{\circ'}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) d\tilde{t} = 0;$$



$$\int_{\alpha_1}^{\beta_1} (f_1^{\circ\prime}(t)\cos t + f_2^{\circ\prime}(t)\sin t)dt - \int_{-\beta_0}^{\beta_0} (\tilde{f}_1^{\prime}(\tilde{t})\cos \tilde{t} + \tilde{f}_2^{\prime}(\tilde{t})\sin \tilde{t})d\tilde{t} = M_0, \quad (7)$$

які служать для визначення сталих  $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$  і  $\tilde{\varphi}_0$ .

Якщо функції  $f_1^{\prime}(\lambda), f_2^{\prime}(\lambda)$  стануть відомі, то контактні зусилля на контурі отвору пластинки визначаються за формулою [5]

$$T_{\rho} + iS_{\rho\lambda} = (f_2^{\prime}(\lambda) - if_1^{\prime}(\lambda))(\cos \lambda - i\sin \lambda), \quad \lambda \in \gamma. \quad (8)$$

Кільцеві зусилля на контурі отвору пластинки  $T_{\lambda}$  і пружного диска  $T_{\lambda}^{(1)}$  знаходимо зі співвідношень [5, 8]

$$T_{\lambda} = \nu T_{\rho} + \left[ (1-\nu)T_{\rho}(\lambda) - \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} T_{\rho}(t)dt + \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} S_{\rho\lambda}(t)ctg \frac{\lambda-t}{2} dt \right];$$

$$T_{\lambda}^{(1)} = T_{\rho} - \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} S_{\rho\lambda}(t)ctg \frac{\lambda-t}{2} dt, \quad \lambda \in \gamma. \quad (9)$$

**Наближений розв’язок задачі.** Для знаходження наближеного розв’язку задачі необхідно використати числові методи. Оскільки система (5) – (7) має таку ж характеристичну частину, як і система рівнянь одержана в [5, 9], то метод механічних квадратур і колокації її наближеного розв’язання переноситься без змін. Слід зауважити, що при зведенні несиметричного проміжку інтегрування  $[\alpha_1, \beta_1]$  до проміжку  $[-1,1]$  використовується наступна заміна

$$tg \frac{\lambda}{2} = \frac{b_1 - a_1}{2} x + \frac{b_1 + a_1}{2}; \quad tg \frac{t}{2} = \frac{b_1 - a_1}{2} s + \frac{b_1 + a_1}{2},$$

де  $a_1 = tg \frac{\alpha_1}{2}, b_1 = tg \frac{\beta_1}{2}$ .

**Результати числового розрахунку.** Для однорідної ізотропної пластинки з розрізом по дузі кола, в центрі якого діє пара сил із моментом  $M_0$ , досліджено вплив величини зони спаю  $\beta_0$ , при  $\beta_0 = \pi/2; 2\pi/3; 5\pi/6$ , на розподіл напружень по лінії поділу матеріалів пластинки і диска, величину і положення зони контакту. Результати числового розрахунку контактних і кільцевих зусиль на контурі отвору при  $\nu = 0.3$  проілюстровано на рис 2 – 4, де суцільні лінії на рисунках відповідають зусиллям  $T_{\rho}$ , штрихові –  $S_{\rho\lambda}$ , штрихпунктирні –  $T_{\lambda}$ , пунктирні –  $T_{\lambda}^{(1)}$ . У таблиці 1 подано значення полярних кутів межових точок зони контакту, а також значення нормальних зусиль в околі вершин розрізу.

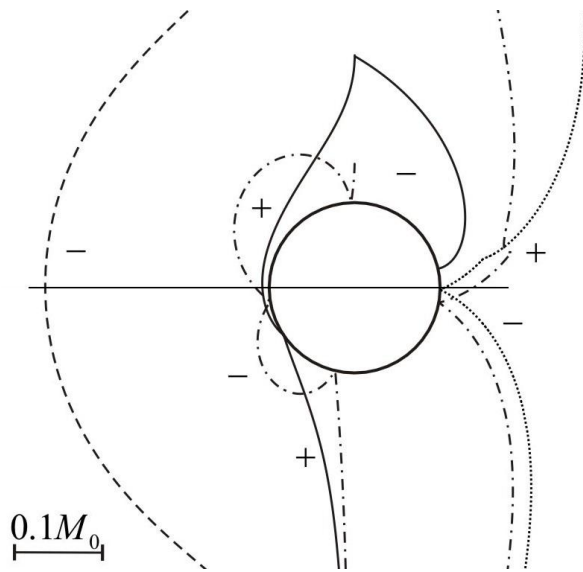


Рис. 2. Епюри розподілу зусиль  $T_{\rho}, S_{\rho\lambda}, T_{\lambda}, T_{\lambda}^{(1)}$  на контурі  $\gamma$  при  $\beta_0 = 90^\circ$

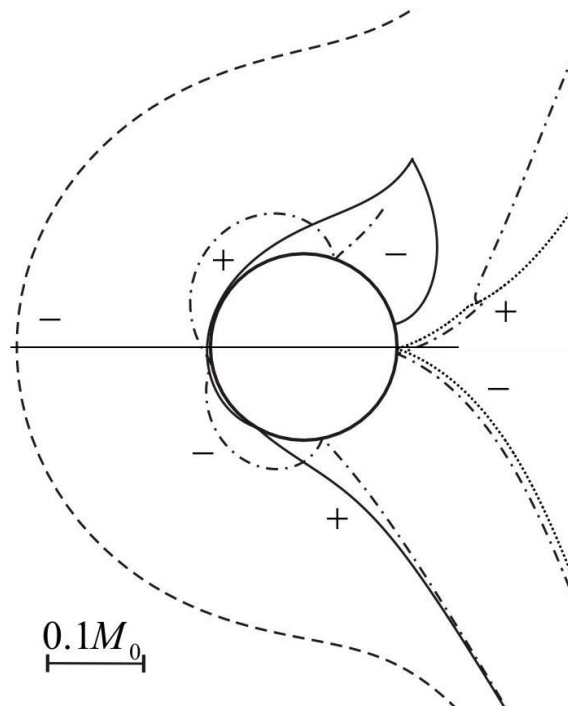


Рис. 3. Епюри розподілу зусиль  $T_\rho$ ,  $S_{\rho\lambda}$ ,  $T_\lambda$ ,  $T_\lambda^{(1)}$  на контурі  $\gamma$  при  $\beta_0 = 120^\circ$

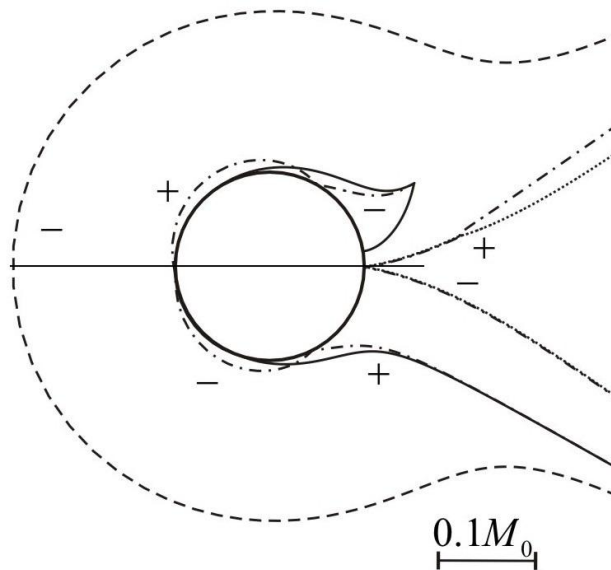


Рис. 4. Епюри розподілу зусиль  $T_\rho$ ,  $S_{\rho\lambda}$ ,  $T_\lambda$ ,  $T_\lambda^{(1)}$  на контурі  $\gamma$  при  $\beta_0 = 150^\circ$

Таблиця 1

Результати розрахунку величин  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $T_\rho(\lambda = \alpha_1)$ ,  $T_\rho(\lambda = \beta_1)$

$\beta_0$ (град)	$\alpha_1$ (град)	$\beta_1$ (град)	$T_\rho(\lambda = \alpha_1)$	$T_\rho(\lambda = \beta_1)$
90	12.89	90.00	0	-0.1667
120	14.01	60.00	0	-0.1240
150	9.13	30.00	0	-0.0703

**Висновки.** Наведені результати дають підставу стверджувати, що при довільному значенні  $\beta_0$  на ділянці розрізу існує одна зона контакту, яка прилягає до вершини розрізу  $\beta_1 = \pi - \beta_0$  і одна зона відставання, а це свідчить про неможливість забезпечення повного контакту берегів розрізу та непроникності (герметичності) пластинчастої конструкції. При цьому значення

$T_p(\lambda = \beta_1)$  плавно зростають при збільшенні ділянки розрізу. Збільшення ділянки спаю пластинки і пружного диска призводить до зменшення зони контакту.

#### Література:

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мусхелишвили. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
2. Гриліцький Д.В. Напруження в пластинках з коловою лінією розмежування граничних умов / Д.В. Гриліцький, Р.М. Луцишин. – Львів: Вид-во "Вища школа" при ЛДУ, 1975. – 111 с.
3. Гриліцький Д.В. Основні граничні задачі теорії пружності для безмежної ізотропної пластинки з впаяною круглою ізотропною шайбою з розрізами на лінії спаю / Д.В. Гриліцький // Питання механіки і математики. ЛДУ. – 1962. – Вип. 9. – С. 79 – 86.
4. Гриліцький Д.В. Про деякі випадки пружної рівноваги ізотропної пластинки з впаяною круглою ізотропною шайбою / Д.В. Гриліцький // Доп. АН УРСР. – 1960. – № 2. – С. 164 – 167.
5. Сяський А.О. Мішана контактна задача для пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска / А.О. Сяський, Н.В. Шинкарчук // Волинський математичний вісник. Серія прикладна математика. Випуск 7 (16) – Рівне : РДГУ, 2010. – С. 199 – 209.
6. Комбель С.М. Посадка жорсткого диска в еліптичний отвір нескінченної ортотропної пластинки // Машинознавство. – 2003. – № 8. – С. 25 – 31.
7. Сяський А. Напружений стан кусково-однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом / А. Сяський, Н. Шинкарчук, В. Кот // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль, 2014. – № 4 (76). – С. 63 – 70.
8. Сяський, В.А. Вплив тертя на розподіл напружень при контакті гладких циліндричних тіл і штампів з кутковими точками / В.А. Сяський // Волинський математичний вісник. – Рівне, 1999. – Вип. 6. – С. 127 – 134.
9. Сяський А.О. Кусково-однорідна ортотропна пластинка з еліптичним розрізом за умови контактування його берегів / А.О. Сяський, Н.В. Шинкарчук // Наукові нотатки : Міжвузівський збірник (за напрямом «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). – Луцьк : Луцький національний технічний університет, 2011. – Вип. 30. – С. 168 – 174.

#### Рецензенти:

**Власюк Анатолій Павлович**, д.т.н., професор, завідувач кафедри економіко-математичного моделювання та інформаційних технологій Національного університету «Острозька академія»;

**Батишкіна Юлія Валеріївна**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та методики викладання інформатики Рівненського державного гуманітарного університету.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2017

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!  
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ**

1. **Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:** постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.
2. **Статтю можна подавати українською, російською, або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03. Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 5-9 сторінок.
3. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
4. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
5. **Анотації** українською, російською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
6. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
7. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
8. Для набірання 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. Кошти просимо перерахувати на рахунок:

Отримувач: Луцький НТУ, код ЄДРПОУ 05477296, на р/р 31258322217820, ДКСУ м. Київ, МФО 820172

Обов'язково вказати: «За ІФЗ\* видання збірника «Н.Н.» ім'я, ПІБ авторів, (**При поданні статті додається копія квитанції про сплату**).

**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.

**При подачі статті англійською мовою вартість публікації становить 50% від номінальної**

**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 - ....

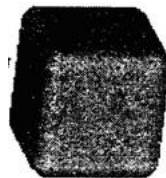


Рис. 1. Назва рисунка

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 60**

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