

НАУКОВІ НОТАТКИ

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

**Випуск 56
(жовтень-грудень)
2016**

Луцьк 2016

ЗМІСТ

Зміст	4
Акімов О.В. Дослідження горючості і займистості захисних покриттів для елементів енергетичних установок.....	7
Андрущак І.Є., Сільчук Ю.В., Прибиш І.О., Умша О.С., Семенюк Я.Р. Програмна реалізація чисельного методу оптимального керування в задачах профілактичної медицини...	14
Букетов А.В., Нігалатій В.Д., Сметанкін С.О., Зінченко Д.О. Використання модифікатора бензен-1,3-діаміну для поліпшення теплофізичних властивостей епоксидного композиту.....	18
Васильчук Б.А., Фільченко Д.В. Критерії якості систем рейтингування ВНЗ як інструмента для прийняття рішень.....	28
Волкова Н.В. Удосконалення технологій приготування рибних січених виробів для студентського харчування шляхом додаванням шроту.....	36
Гонсалес Санчес Х.А., Білий О.Л., Юхим Р.Я. Застосування епоксидних розчинів та поліефірних смол в якості ін'єкційних матеріалів для відновлення історичних будівель з вапнякового каменю.....	40
Горбачов П.Ф., Любий Е.В., Акбар Джан Полад Щодо питання визначення місткості вищих транспортних районів з прибуття та відправлення пасажирів.....	47
Грицюк І.В., Грицюк Ю.В., Бандура І.О. Особливості компенсації реактивних навантажень в електричних мережах з розосередженим генеруванням.....	55
Грицюк Ю.В., Грицюк І.В., Бандура І.О. Імітаційне моделювання впливу відновлюваних джерел енергії на параметри режиму розподільних електричних мереж.....	61
Гулієва Н.М., Степанюк В.О. Обладнання і технологія імпульсно-плазмової обробки поверхні.....	66
Гуменюк Ю.О., Герасимчук Г.А., Човнюк Ю.В. Концептуальні основи аналізу резонансних властивостей ґрунтів сільськогосподарського призначення при вібрації.....	71
Дацюк Л.М., Юхимчук С.Ф., Дацюк Т.Л. Обґрунтування параметрів компонування колісних лісових харвестерів.....	80
Єгоров Ю.В. оцінка можливості використання індуктора у якості джерела нагріву у процесі FDM друку.....	85
Ковальов І.А., Ратушний А.В., Семенова Н.В. Вплив форми лопаті робочого колеса відцентрового насоса низької швидкохідності на його напірні та енергетичні характеристики.	89
Крижанівський Є.І., Витязь О.Ю., Грабовський Р.С. Оцінка умов руйнування тривало експлуатованих труб бурильних колон при спуско-підймальних операціях.....	96
Мініцький А.В., Сосновський Л.О., Мініцька Н.В. Вплив технологічних факторів на процес допресовки порошкових брикетів на основі заліза.....	107
Мольчак Я.О., Мисковець І.Я., Колядинський М.І. Гідротехнічні споруди як захист від надзвичайних ситуацій, створених ТПВ.....	111
Наглюк М.І., Волков В.П., Наглюк І.С., Ляшок В.В. Уточнення строків зміни антифризів при експлуатації автобусів.....	115
Назаров І.О., Назаров В.І. Вплив експлуатаційних умов на ефективність гальмування легкових автомобілів.....	119
Пащенко В.М. Втрати в електроди плазмотронів на плазмоутворювальних сумішах повітря з вуглеводнями.....	128
Самчук Л.М. Оптимізація процесу виробництва притискової втулки за рахунок її виготовлення з відходів машинобудівних підприємств.....	135
Сич О.Є. Особливості структуроутворення високопористої склокераміки медичного призначення.....	142
Сокол Г.М. Структурна модифікація сапонітових глин кислотною обробкою.....	149
Степанчук А.М., Румянцева Ю.Ю., Демиденко О.А. Вплив складу та сруктури сплавів залізо-самофлюсівний сплав на їх козійну стійкість у розчинах сірчаної кислоти.....	154
Сяський В.А. Уточнена модель передачі обертального моменту від системи штампів з кутовими точками до пружного круглого диска.....	162

Фомін В.М., Сур'янінов М.Г. Плоский згин залізобетонної балки з урахуванням фізичної й геометричної нелінійностей і пластичності бетону при складному навантаженні.....	171
Чумало Г.В., Дацко Б.М., Івашків В.Р., Юркевич Р.М., Лужецький В.С. Дослідження контактної корозії різнорідних сталей у сірководневих середовищах.....	181
Полясов Г.С. Загальна властивість рішень споріднених Рімана-Гільберта-Привалова задач, з взаємно оберненими раціональними коефіцієнтами.....	187

ONTENTS

<i>Contents</i>	4
<i>Akimov A.V.</i> Research flammability and combustibility protective coatings for power plants elements.....	7
<i>Andrushchak I.E., Silchuk Yu.V., Prubush I.O., Umsha O.S., Semeniuk J.R.</i> Software implementation of numerical methods of optimal control in the problem decision system.....	14
<i>Buketov A.V., Nigalaty V.D., Smetankin S.O., Zinchenko D.O.</i> Using modifier benzene-1,3-diamine to improve the thermal properties of the epoxy composite.....	18
<i>Vasylchuk B., Filchenko D.</i> Quality criteria of hei rankings as an instrument for decision making...	28
<i>Volkova N.V.</i> Improvement of preparations' technologies of fish sechenny products for students food by meal addition.....	36
<i>Gonzalez Sanchez J.A., Bilyy O., Iukhym R.</i> Application of epoxy mortar and polyester resin as injection material for restoration calcareous stone of historical buildings.....	40
<i>Horbachov P.F., Liubyi E.V., Akbar Jan Polad</i> Definition of the capacity of main zones on the departure and arrival of passengers.....	47
<i>Hrytsiuk I., Hrytsiuk Yu., Bandura I.</i> Features compensation of reactive loads in electrical networks of distributed generation.....	55
<i>Hrytsiuk Yu., Hrytsiuk I., Bandura I.</i> Simulation of influence of renewable energy sources in mode settings power distribution networks.....	61
<i>Huliieva N.M., Stepaniuk V.O.</i> Equipment and technology of pulsed-plasma surface treatment.....	66
<i>Humenyuk YU., Herasymchuk H., Chovnyuk YU.</i> Conceptual bases of the resonance properties of soil for agricultural purposes during vibration.....	71
<i>Datsiuk L., Yuhymchuk S., Datsiuk T.</i> The substantiation of options of reasonably wheeled forest harvester.....	80
<i>Yehorov Y.</i> Possibility of the using of an inductor as a heat source during FDM printing evaluation.....	85
<i>Kovalyov I.A., Ratushnyi A.V., Semenova N.V.</i> Influence of form of blade of driving wheel of chempump of subzero high-speedness on his pressure and power descriptions.....	89
<i>Kryzhanivskiy Ye.I., Vytyaz O.Y., Hrabovskiy R.S.</i> Estimation of collapse conditions of long-term operated drill pipes during tripping.....	96
<i>Minitzky A.V., Sosnovsky L.A., Minitzka N.V.</i> Influence of technological factors on the re-pressing of the powder compacting the iron-based.....	107
<i>Molchak Y.O., Myskovets I.Y., Kolyadynskiy M.I.</i> Waterworks as protection against emergencies created by MSW.....	111
<i>Nahliuk M., Volkov V., Nahliuk I., Lyashcok V.</i> Clarification of terms of antifreeze change under operation conditions.....	115
<i>Nazarov I.A., Nazarov V.I.</i> Influence of operating conditions braking performance for cars.....	119
<i>Pashchenko V.M.</i> Losses into the plasma torch electrodes working on plasma-forming mixtures of air with hydrocarbons.....	128
<i>Samchuk L.</i> Optimization of production by clamping bushings its production from waste engineering companies.....	135
<i>Sych O.</i> Aspects of the structure formation of highly-porous glass-ceramics for medical application.....	142
<i>Sokol H.M.</i> Structural modification of saponite clay by acid treatment.....	149
<i>Stepanchuk A.N., Rumyantseva Y.Y., Demydenko A.A.</i> Influtnce of composition and structure of iron-sfa alloys on their corrosion resistance in the sulphuric acid.....	154
<i>Syaskyy V.</i> Refined transmission model of rotational moment from the system of hard stamps to the elastic round disk.....	162
<i>Fomin V.M., Suryaninov N.</i> Flat bend of the ferroconcrete beam taking into account physical and geometrical not linearities and plasticity of concrete at difficult loading.....	171
<i>Chumalo H.V., Datsko B.M., Ivashkiv V.R., Yurkevych R.M., Luzhetskyy V.S.</i> Investigation of contact corrosion of the different types of steels in hydrogen sulfide environments.....	181
<i>Poletaev G.S.</i> General property the solutions related Riemann-Hilbert-Privalov problems with mutually inverse rational coefficients.....	187

УДК 667.64:678.026

А.В. АКИМОВ*Херсонская государственная морская академия***ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЮЧЕСТИ И ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Проведены экспериментальные исследования горючести и воспламеняемости разработанных полимерных композитных материалов и защитных огнестойких покрытий, полученных на основе пластифицированной трихлорэтилфосфатом эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20, наполненной частицами антипиренов различной зернистости и физической природы. Исследования горючести и воспламеняемости проводили на экспериментальном стенде с использованием стандартного концентрационного метода кислородных индексов при сжигании исследуемых образцов в средах с различной концентрацией кислорода. Горючесть материалов оценивали предельным кислородным индексом, являющимся отношением объемного количества кислорода к общему объему кислорода и азота. Испытания проводили для шести разработанных эпоксикомпозитных материалов (для каждого композита исследовали по 12 образцов). В результате получены средние значения объемного количества кислорода и азота, что позволило оценить предельный кислородный индекс для каждого материала, а также были определены потери массы образцов при горении. Сравнение разработанных материалов, наполненных частицами антипиренов, с аналогами показало, что по кислородному индексу их можно отнести к самозатухающим негорючим материалам, которые можно использовать для защитных огнестойких покрытий элементов энергетических установок при воздействии агрессивных сред.

Ключевые слова: горючесть, антипирены, эпоксидные композиты, кислородный индекс.

Рис. 1, табл. 1, лит. 14.

О.В. Акімов*Херсонська державна морська академія***ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРЮЧОСТІ І ЗАЙМИСТОСТІ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ
ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

Проведено експериментальні дослідження горючості і займистості розроблених полімерних композитних матеріалів і захисних вогнестійких покриттів, отриманих на основі пластифікованої трихлоретилфосфатом епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20, наповненої частинками антипіренів різної зернистості і фізичної природи. Дослідження горючості і займистості проводили на експериментальному стенді з використанням стандартного концентраційного методу кисневих індексів при спалюванні досліджуваних зразків в середовищах з різною концентрацією кисню. Горючість матеріалів оцінювали граничним кисневим індексом, який визначається як відношення об'ємної кількості кисню до загального об'єму кисню та азоту. Випробування проводили для шести розроблених епоксикомпозитних матеріалів (для кожного композиту досліджували по 12 зразків). В результаті отримані середні значення об'ємної кількості кисню та азоту, що дозволило оцінити граничний кисневий індекс для кожного матеріалу, а також були визначені втрати маси зразків при горінні. Порівняння розроблених матеріалів, наповнених частками антипіренів, з аналогами показало, що за значеннями кисневого індексу їх можна віднести до самозатухаючих негорючих матеріалів, які можна використовувати для захисних вогнестійких покриттів елементів енергетичних установок, які працюють у агресивних середовищах.

Ключові слова: горючість, антипірени, епоксидні композити, кисневий індекс.

A.V. Akimov*Kherson State Maritime Academy***RESEARCH FLAMMABILITY AND COMBUSTIBILITY PROTECTIVE COATINGS
FOR POWER PLANTS ELEMENTS**

Experimental studies of combustibility and flammability developed polymeric composite materials and protective fire-resistant coatings produced on the basis of plasticized trichloroethylbisphenol epoxy resin ED-20 filled with particles of fire retardants in different grits and physical nature. Studies flammability and combustibility was performed on an experimental stand concentration using the standard method by burning oxygen index of the samples in the media with different concentrations of oxygen. Flammability of materials evaluated limiting oxygen index is the ratio of the volume of oxygen to the total volume of oxygen and nitrogen. Tests were conducted for six developed epoxy composite materials (for each composite was investigated on 12 samples). As a result, average values obtained by bulk oxygen and nitrogen, allowing to estimate a limiting oxygen index for each material, and the samples were determined by weight loss during combustion. Comparing the developed materials filled with particles, flame retardants, with analogues showed that the oxygen index can be attributed to their non-flammable self-extinguishing materials which can be used for protective coating of fireproof elements of power plants by aggressive environments.

Keywords: flammability, flame retardants, epoxy composites, oxygen index.

Постановка проблеми. Развитие промышленности в современных условиях невозможно без использования полимерных материалов и, особенно, защитных покрытий на их основе, которые отличаются повышенными показателями теплофизических и физико-механических свойств, незначительной токсичностью и горючестью. Для деталей энергетических установок,

эксплуатируемых под действием высоких температур и давлений, перспективным является использование защитных покрытий на основе полимеров. Важнейшими характеристиками указанных покрытий являются: тепло- и огнестойкость, устойчивость к воздействию агрессивных сред (топливо, масло, вода, газы и пары, ПАВ и др.) [1–11].

Анализ последних исследований и публикаций. Для эпоксидных полимеров наиболее распространенным и эффективным способом снижения горючести является применение антипиренов, которые являются неорганическими и органическими веществами и содержат такие элементы как: фосфор, азот, бор и галогены. Антипирены бывают инертные и реакционноспособные. Реакционноспособными являются в основном элементоорганические и органические вещества. Неорганические антипирены достаточно редко взаимодействуют с макромолекулами полимера, это возможно только при наличии реакционноспособных групп, обеспечивающих химическое взаимодействие компонентов. Антипирены аддитивного типа привлекательны тем, что введение их в связующее обеспечивает улучшение свойств полимерных материалов. Однако следует заметить, что универсальных антипиренов, которые пригодны для снижения горючести любых полимерных материалов, не существует. Легкая воспламеняемость эпоксидных смол обусловлена тем, что продуктами их деструкции являются летучие вещества, содержащие значительное количество горючих соединений (оксид углерода, ацетон, формальдегид, ацетальдегид). Вместе с тем, при воздействии повышенных температур формируется кабронизированный остаток. Его образование обусловлено тем, что эпоксидные олигомеры, отвержденные аминами, при воздействии температур склонны к дегидратации, вследствие отрыва атома водорода от ароматического и алифатического звеньев цепи, с последующей конденсацией углеродных остатков и образованием квазиграфитовой структуры. Поэтому весьма эффективным методом снижения горючести эпоксидных полимеров является использование антипиренов, оказывающих влияние на процессы структурирования полимера при воздействии повышенных температур. Применение соединений, катализирующих пиролитические процессы, способствующие коксообразованию, также обеспечивает снижение загрязнения окружающей среды.

Решающим фактором, определяющим эффективность огнезащитных покрытий, является их теплоизолирующая способность, которая зависит от толщины покрытия. Для обеспечения эффективной огнезащиты такие покрытия должны иметь толщину 4...50 мм. Однако чрезмерное увеличение их толщины отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках, поэтому перспективны огнезащитные покрытия вспучивающегося типа. Огнезащита с помощью таких покрытий основана на эффекте вспучивания благодаря наличию в рецептуре веществ, которые при нагревании выделяют инертные газы. В момент выделения газов покрытие размягчается, вспучивается, создавая плотный слой угольной пены. Благодаря отличной теплоизоляционной способности этот слой замедляет распространение тепла в сторону защищаемой поверхности и воздействие на нее критических температур. В качестве вспучивающего агента для огнестойкой композиции на основе эпоксидной диановой смолы возможно использование бисульфата графита, который представляет собой электролитическое соединение внедрения графита. Графит способен образовывать слоистые соединения с большим количеством веществ, в которых внедряемые атомы, молекулы и ионы проникают между гексагональными плоскостями, что вызывает увеличение расстояния между углеродными атомами. К внедряющимся веществам относятся почти все щелочные металлы, газогены, хлориды многих металлов, сильные кислоты, некоторые окислы и сульфиды металлов, и другие вещества [12]. Таким образом, бисульфат графита может быть рекомендован в качестве антипирирующей добавки при получении огнестойких композиций для вспучивающихся покрытий на основе эпоксидной диановой смолы.

В качестве модификаторов полифункционального действия для эпоксидного полимера, выполняющих одновременно роль пластификаторов и замедлителей горения, применяют: фосфорсодержащий диметилакрилат (ФОМ), трихлорэтилфосфат (ТХЭФ). В качестве наполнителей, усиливающих взаимный эффект влияния, используют: полифосфат аммония, хлористый аммоний, терморасширенный графит (ТРГ), графит тигельный (ГТ), технический графит (сажа). Для эффективного снижения горючести содержание фосфора в эпоксидной композиции должно быть не менее – 5...6 масс. %.

В результате теоретических и экспериментальных исследований влияния различных антипиренов и наполнителей на эксплуатационные, технологические и пожароопасные свойства эпоксиполимеров была создана огнезащитная композиция ЭКПГ (эпоксидная композиция пониженной горючести) на основе эпоксидиановой смолы ЭД-20, отвержденной аминным отвердителем [1313]. Для снижения

горючести покрытия использовали азотсодержащий антипирен – пенообразователь, для повышения жаростойкости в состав композиции дополнительно вводили небольшое количество минерального наполнителя на основе базальта. Испытания на горючесть по кислородному индексу (КИ) показали, что покрытие имеет величину индекса $KII=32\%$, т.е. является самозатухающим. Кроме этого установлено, что данная композиция имеет существенный недостаток – повышенную дымообразующую способность.

В работе [14] рассматривали задачу создания огнестойких эпоксидных композитов, содержащих техногенные отходы производства. При этом использовали эпоксидно-диановый олигомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ6-02-594-85). В качестве модификаторов применяли: фосфорсодержащий диметилакрилат – ФОМ-2 (ТУ 6-02-3-338-88), фосполиол – ФП (ТУ 2226-115-00210045-2000), фостетрол – ФТ (ТУ 6-02-1022-80), фосдиол – ФД (ТУ 6-02-1329-86). В качестве наполнителей использовали: кубовый остаток – отход производства поликапроамида, гальваношлам – отход гальванических ванн производства свечей зажигания и тальк. Установлено, что более высокими жаростойкими свойствами обладают композиты, содержащие ФОМ, а также ФОМ и ФД одновременно. Кроме этого, эти же композиты отличаются более высокими значениями ударной вязкости и прочности при изгибе.

Также изучены процессы изменения массы, температурные переходы, проведен анализ химического строения поверхности и объема при нагреве до температуры $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ эпоксидной композиции (ЭД-20 + ПЭПА), содержащей соли аммония и модифицированной различными добавками: боратом кальция, диоксидом марганца и продуктом дегидрополиконденсации фенантрена, содержащего хром и никель. Установлено, что полифосфорная кислота (продукт разложения солей аммония) стимулирует образование графитоподобного углеродного слоя на внутренней поверхности пенных пузырьков, а на поверхности образцов в процессе пиролиза имеет место увеличение концентрации фосфорсодержащих и углеродных продуктов. Введение в композицию никельсодержащих фенантронов увеличивает концентрацию углерод – углеродных и углерод – металлических соединений почти в три раза, что сопровождается заметным увеличением теплоемкости. Степень вспучивания композиции с диоксидом марганца возрастает в 16 раз. Считают, что как структурообразователи вспененного кокса наиболее эффективны борат кальция и металлсодержащие фенантроны.

В рамках решения задач по созданию композитов нового поколения был проведен комплекс исследований горючести, теплофизических и физико-механических свойств эпоксидных композитов [10-14]. При этом были разработаны эпоксидные композиции с улучшенными свойствами, содержащие химически активные модификаторы. Изучена возможность применения в качестве наполнителя для эпоксидной смолы отходов обмолота сельскохозяйственного производства (ООСП), в частности, отходов обмолота проса. Полученные данные доказывают целесообразность их использования для наполнения эпоксидной смолы, что позволяет расширить области применения данного наполнителя для создания композитов широкого спектра назначения. При этом разработаны трудносгораемые эпоксидные композиты. В частности, для модификации эпоксидного олигомера использовали минеральные наполнители и соединение полифункционального действия, выполняющее роль замедлителя горения и пластификатора – трихлорэтилфосфат (ТХЭФ). Установлено, что при поджигании на воздухе разработанного материала (q , масс.ч.: ЭД-20 (100) + ТХЭФ (30) + наполнитель ООСП (30) + ПЭПА (15)) возгорание происходит через 1,5 мин. При этом наблюдали вспенивание поверхности покрытия, а в отсутствие источника зажигания пламя затухает. Была установлена скорость распространения пламени в продольном и поперечном направлении, составляющая 2,5 и 1,5 мм/мин, соответственно. Кроме того, комплексное использование ТХЭФ и ООСП позволяет улучшать физико-механические свойства эпоксидных композитов – ударную вязкость, разрушающие напряжения при изгибе, твердость, термо- и теплостойкость. Можно утверждать о расширении области применения эпоксидных композитов, а также о решении проблемы использования отходов сельскохозяйственного производства.

В настоящее время существует спрос на материалы для ремонтных работ в различных отраслях промышленности. В связи с этим ставили задачи по созданию конкурентоспособных, не уступающих по свойствам импортным аналогам, композитных материалов на основе эпоксидного связующего. В частности, для получения износо-, абразивостойких композитов в качестве наполнителей использовали: корунд и мелкодисперсные металлические порошки (железо, медь и олово). При введении металлических наполнителей композитам придают специфические свойства: при введении железа – ферромагнитные, при введении меди –

улучшаются фрикционные характеристики полимера.

Таким образом, из приведенного выше можно констатировать следующее. При формировании прочных конструкционных материалов покрытий на их основе с повышенными показателями теплофизических свойств и пониженной горючестью необходимо анализировать физико-химические процессы, изменяющиеся в процессе полимеризации полимеркомпозитов после введения дисперсного наполнителя, что является одной из актуальных проблем современного материаловедения. Эти исследования являются наиболее актуальными при разработке эпоксидных композитных материалов, обладающих широким спектром улучшенных свойств. Одним из путей решения данной задачи является создание новых эпоксидных композитов при целенаправленном регулировании их эксплуатационных характеристик научно-обоснованным введением дисперсных наполнителей различной активности относительно эпоксидного связующего, что позволит улучшить как адгезионные, так и когезионные свойства композитов. При выборе типа наполнителя основным фактором является его способность смачиваться смолой, а также размер зерен. Применением наполнителей, состоящих из двух или большего количества размеров зерен, можно добиться повышения характеристик композитов. При этом избыток наполнителя или его дисперсность могут служить причиной ухудшения свойств эпоксидных композитов. Так, например, чрезмерно высокое содержание крупнозернистого наполнителя может стать причиной недостаточного смачивания связующим частиц или их неравномерного распределения в объеме материала, что может вызвать неравномерную усадку при отверждении полимера. Мелкозернистые наполнители необходимо вводить при более высоком содержании в смоле, чем крупнозернистые, так как они обладают большей удельной площади поверхности. Таким образом выбор количества вводимого наполнителя является существенным при формировании композитов с улучшенным комплексом свойств. Также важным является введение в композит пластификатора – антипирена, в результате чего снижается горючесть и температура стеклования, текучести композита. Таким образом, в присутствии пластификатора полимер сохраняет высокоэластичные свойства при более низкой температуре.

Цель работы – исследовать горючесть разработанных эпоксидных композитных огнеупорных покрытий для деталей энергетических установок.

Материалы и методика исследования. В качестве основы для связующего при формировании эпоксидных КМ выбран эпоксидно-диановый олигомер марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), характеризующийся высокой адгезионной прочностью к металлической основе, возможностью отверждения при низких температурах, малой усадкой, отсутствием выделения летучих веществ при формировании в изделия, технологичностью при нанесении на детали со сложным профилем поверхности [2-5].

В качестве отвердителя для эпоксидного олигомера применяли отвердитель аминного типа – полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ 6-02-594-85), способный формировать трехмерную сетчатую структуру при отсутствии нагрева и позволяет отверждать материалы при комнатных температурах. Также для отверждения ЭД-20 был использован ангидридный отвердитель горячего отверждения – изо-метилтетрагидрофталевого ангидрида (Изо-МТГФА) (ТУ 2494-015-14331137-2012).

В качестве пластификатора применяли трихлорэтилфосфат (ТХЭФ) (ТУ 6-05-1611-78) – полный эфир ортофосфорной кислоты и этиленхлоргидрина; эффективный антипирен, значительно улучшающими противопожарные свойства материалов. ТХЭФ образует однородную физическую смесь с полимером и не вступает с ними в химическую реакцию, что усиливает огнезащитный эффект. ТХЭФ хороший пластификатор, присутствие атомов хлора в составе трихлорэтилфосфата не уменьшает его совместимость с полимерами. При введении в композицию ТХЭФ получают самозатухающийся материал, горение которого быстро прекращается после нивелирования действия открытого пламени.

Введение различных по природе, форме и дисперсности наполнителей в эпоксидное связующее способствует физико-химическому взаимодействию, возникающее на границе раздела фаз «полимер-наполнитель», и зависит от химической активности наполнителя, удельной площади поверхности что существенно влияет на процессы структурообразования и определяет свойства КМ в процессе эксплуатации. С учетом того, что необходимо обеспечить негорючесть материалов в качестве наполнителей для экспериментальных исследований использованы:

– мелкозернистые ($d = 5...10$ мкм) наполнители: соевитовый порошок (ТУ36-131-83) и углекислый кальций (ГОСТ 4530-76);

– крупнозернистые ($d = 63$ мкм) наполнители: алюминат кальция (ГОСТ 969-91) и хлорамин

Б (ТУ 9392-031-00203306-97).

Горючість матеріалів оцінювали стандартним методом експериментального визначення кислородного індекса (КИ) [7, 8] по ГОСТ 12.1.044-89.

Результати досліджень і їх обговорення. В нинішнє час не є єдиного кінетичного методу визначення горючості полімерних матеріалів. З усіх методів випробувань матеріалів на горючість і воспламеняємість найбільше поширення для порівняльної оцінки рецептур замедлителів горіння у зарубіжних і вітчизняних спеціалістів отримав метод кислородного індекса [7, 8].

Стандартний метод експериментального визначення кислородного індекса (КИ) по ГОСТ 12.1.044-89 розроблений для випробування пластмас, в тому числі ячеїстих, щільністю не менше 100 кг/м^3 , а також пластмас в формі плінок і листів товщиною не більше 10,5 мм. Даний метод може також служити для порівняльної оцінки горючості інших твердих матеріалів, в особливості при обробці їх рецептур, направлених на зниження горючості і воспламеняємість.

Суть методу складає в визначенні мінімальної концентрації кислорода в кислородно-азотній суміші, при якій випробувані матеріал здатен воспламенятися і горіти. Зовнішній вигляд установки показано на рис. 1 а, а схема випробування зразка – на рис. 1 б.

Визначення горючості і воспламеняємість полімерів і полімерних композитів концентраційним методом кислородних індексів проводять при зжиганні досліджувані зразки в середовищах з різною концентрацією кислорода. При цьому фіксують концентрацію кислорода (в %) в оточуючій середі, необхідну для підтримання горіння зразка в часі трьох хвилин.

Горючість матеріалів оцінюють предельним кислородним індексом (ПКІ), являючимся відношенням об'ємного кількості кислорода V_{O_2} до загальної об'єму кислорода і азота $V_{O_2+N_2}$ (в повітрі це співвідношення дорівнює 21), т.е. $ПКІ = V_{O_2}/V_{O_2+N_2}$.

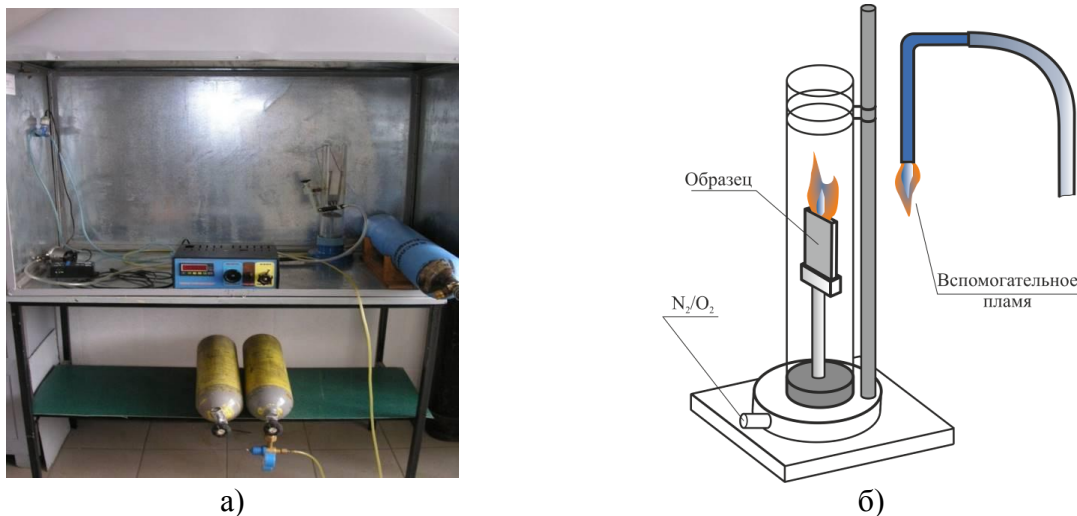


Рис. 1. - Установка для определения кислородного индекса по ГОСТ 12.1.044-89: а) внешний вид установки; б) схема испытания образца.

В качестве характеристики, определяющей горючість КМ, используют также значение предела горения ($C_{пр}$). Эту величину определяют аналогично ПКІ, при горении зразка в сосуде, через который снизу-вверх пропускают кислородно-азотную газовую смесь. В зависимости от места зажигания зразка и направления распространения пламени различают $C_{пр}$ снизу и $C_{пр}$ сверху. Значение $C_{пр}$ снизу всегда ниже из-за более жестких условий испытания, чем значение $C_{пр}$ сверху, которые совпадают со значением ПКІ для данного материала. Трудновоспламеняемыми (самозатухающими) считаются полимерные материалы, для которых $27 < ПКІ < 50$.

На горючість исследовали следующие разработанные нами эпоксикомпозитные материалы, состоящие из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 ($q = 100$ масс.ч.), пластифицированной трихлорэтилфосфатом ($q = 10$ масс.ч.) и наполненной частицами АК – алюмината кальция, ХАБ – хлорамина Б, СП – совелитового порошка и УК – углекислого кальция:

- КМ1 – АК (70 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + СП (20 масс.ч.);
 КМ2 – АК (60 масс.ч.) + ХАБ (2 масс.ч.) + СП (10 масс.ч.);
 КМ3 – АК (80 масс.ч.) + ХАБ (2 масс.ч.) + СП (10 масс.ч.);
 КМ4 – АК (40 масс.ч.) + ХАБ (2 масс.ч.) + УК (30 масс.ч.);
 КМ5 – АК (30 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + УК (20 масс.ч.);
 КМ6 – АК (40 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + УК (15 масс.ч.).

Определение горючести и воспламеняемости полимеров и полимерных композитов концентрационным методом кислородных индексов проводят при сжигании образцов в средах с различной концентрацией кислорода. При этом фиксируют концентрацию кислорода (в %) в течение трех минут.

Горючесть материала оценивали предельным кислородным индексом (ПКИ), являющимся отношением объемного количества кислорода V_{O_2} к общему объему кислорода и азота ($V_{O_2} + V_{N_2}$) (в воздухе это соотношение равно 21), т.е. $ПКИ = 100 V_{O_2} / (V_{O_2} + V_{N_2})$. Испытания проводили для рассматриваемых КМ1-КМ6 (для каждого композита исследовали по 12 образцов). Средние значения V_{O_2} , V_{N_2} , расчетные значения ПКИ и потери массы образцов (ϵ_m , %) при горении приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты испытаний горючести КМ

Исследуемый параметр	Исследуемый материал							Аналоги	
	ЭМ	КМ1	КМ2	КМ3	КМ4	КМ5	КМ6	Chartek 7	833FRB
V_{O_2} , дм ³ /мин	2,6	5,1	4,2	4,4	4,9	5,2	3,4	4,8	4,5
V_{N_2} , дм ³ /мин	8,0	5,6	6,4	6,2	5,7	5,5	7,3	5,6	6,1
ПКИ	24,6	47,6	39,4	41,4	46,0	48,4	31,6	46,2	42,5
Потеря массы образцов, %	1,1	0,7	0,7	0,4	0,7	0,8	1,1	1,2	1,4

Примечание: ЭМ – эпоксидная матрица; Chartek 7 – эпоксидное вспучивающееся огнезащитное покрытие; 833FRB – двухкомпонентный герметизирующий и заливочный эпоксидный компаунд (соответствует по огнеупорности требованиям UL, класс 4V-0, категория QMFZ2).

Выводы. Экспериментально установлено, что для всех разработанных композитов (КМ1-КМ6), а также для аналогов (Chartek 7, 833FRB) потери массы в процессе горения составляют $\epsilon_m < 8\%$, горение образцов продолжается в течение времени $t < 5$ с после удаления источника открытого пламени (допустимое горение после удаления горелки в течение времени $t < 30$ с). Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о негорючести разработанных эпоксидных композитов, которые можно использовать для защитных огнестойких покрытий элементов энергетических установок, подверженных воздействию агрессивных сред.

Литература

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: [учеб. пособие] / [М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.]; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
2. Технические свойства полимерных материалов :[учеб.-справ. пособие] / В.К. Крыжановский [и др.]; под ред. В. К. Крыжановского. – [2-е изд., испр. и доп.]. – СПб. : Профессия, 2007. – 235 с.
3. Стухляк П.Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий / П.Д. Стухляк. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.
4. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 658 с.
5. Производство изделий из полимерных материалов : [учеб. пособие] / В.К. Крыжановский [и др.]; Под общ. ред. В.К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2008. – 460 с.
6. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Профессия, 2012. – 624 с.
7. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 415 с.
8. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов : [учеб. пособ.] / И.П. Мийченко. – СПб. : Научные основы и технологии, 2012. – 374 с.
9. Крыжановский В.К. Технические свойства пластмасс : [учеб. пособие] / В.К. Крыжановский. – СПб. : Профессия, 2014. – 246 с.

10. Крыжановский В.К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс / В.К. Крыжановский. – СПб. : Науч. основы и технологии, 2009. – 203 с.
11. Технология полимерных материалов [учеб. пособие для вузов по спец. "Химическая технология высокомолекулярных соединений"] / А.Ф. Николаев, В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов [и др.]; под общ. ред. В. К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2008. – 533 с.
12. Гулай О.И. Свойства композиционных материалов на основе кремнийорганического лака КО-921 структурированных эпоксидной смолой ЭД-20 / О.И. Гулай, Я.А. Середницкий // Пластические массы. – 2001. – № 12. – С. 21-23.
13. Яковлева Р.А. Снижение дымообразующей способности вспучивающихся эпоксидных покрытий пониженной горючести / Р.А. Яковлева, Ю.В. Попов, Т.Н. Обиженко [и др.] // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: доклады международной конференции «Композит – 2007». – Саратов: СГТУ, 2007. – С. 339-342.
14. Плакунова Е.В. Модифицированные эпоксидные композиции / Е.В. Плакунова, Е.А. Татаринцева, Л.Г. Панова // Пластические массы. – 2003. – №2 – С. 39-40.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2016

UDC 61:004.651(075.8)

Andrushchak I.E., Silchuk Yu.V., Prubush I.O., Umsha O.S., Semeniuk J.R.
SOFTWARE IMPLEMENTATION OF NUMERICAL METHODS OF OPTIMAL
CONTROL IN THE PROBLEM DECISION SYSTEM

The work is dedicated to software implementation of the direct method of optimal control and demonstrate it for solving tasks of preventive medicine. Software implementation is available graphical interpretation, which allows its use in practice.

Keywords: numerical method for the optimal control model of coexistence of the two strains, the method of DCA, Java, SQL.

Андрущак І.Є., Сільчук Ю.В., Прибиш І.О., Умша О.С., Семенюк Я.Р.
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ В
ЗАДАЧАХ ПРОФІЛАКТИЧНОЇ МЕДИЦИНИ

В роботі розглядається програмна реалізація прямого методу знаходження оптимального керування і демонстрування його для отримання розв'язку задач профілактичної медицини. Програмна реалізація має доступну графічну інтерпретацію, що робить можливим її використання на практиці.

Ключові слова: чисельний метод оптимального керування, модель співіснування двох штамів вірусу, метод DCA, Java, SQL.

Андрущак И.Е., Сильчук Ю.В., Прибыш И.О., Умша О.С., Семенюк Я.Р.
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В работе рассматривается программная реализация прямого метода нахождения оптимального управления и демонстрации его для получения решения задач принятия решений. Программная реализация имеет доступную графическую интерпретацию, что делает возможным ее использование на практике.

Ключевые слова: численный метод оптимального управления, модель сосуществования двух штаммов вируса, метод DCA, Java, SQL.

Introduction. In medicine, the term "differential diagnosis" means a systematic approach based on evidence, to determine the causes of the symptoms observed in the case when there are several alternative explanations, and to reduce the list of possible diagnoses.

Today, medical diagnostics can be performed automatically using computer systems and algorithms. Such systems are usually referred to diagnostic decision support system or medical diagnostic systems. They belong to a more general class of clinical decision support systems [Martsenyuk, 2004-2012]. The purpose of these systems is the systematic support of the doctor in the differential diagnosis. Many of these systems can provide results even when not enough data, ie under uncertainty, and most importantly – they are limited as to the amount of information that can store and process.

One approach that reflects the natural process of thinking in the differential diagnosis is a method of induction of decision trees. During the late 1970s, early 1980s J.R.Quinlan [Quinlan, 1986] developed an algorithm for constructing decision tree ID3 (Iterative dyhotomayzer). Later J.R.Quinlan presented algorithm C4.5 (successor ID3), which has become a benchmark, which is often compared to the latest algorithms in the field of computer knowledge. In 1984, a group of statisticians (L.Breiman, J.Friedman, R.Olshen, C.Stone) published work on Classification and Regression Trees (CART) [Breiman, 1984], which described the construction of binary decision trees. The algorithms ID3 and CART, despite the fact that developed independently and at about the same time, implementing this approach to learning decision trees based on the training data. This decision trees are built as a result of the recursive procedure of the "top-down". Most algorithms for induction of decision trees also fit this general approach. This study set recursively divided into smaller subsets as far as how the tree is constructed.

Mathematically, the problem is the induction of decision trees is formulated as follows. We set D , that contains N sets of training data. In addition, each i -й set $(A_1^i, A_2^i, \dots, A_p^i, C^i)$ consists of input data – attributes A_1, \dots, A_p and output data - an attribute class C . Attributes A_1, \dots, A_p can take as numerical and categorical values. Attribute class C take one of K discrete values: $C \in \{1, \dots, K\}$. The aim is to predict the decision tree class attribute value C based on attribute values A_1, \dots, A_p . This

should maximize the accuracy of the prediction attribute class, namely $P\{C = c\}$ at the terminal nodes for any $c \in \{1, \dots, K\}$. Algorithms induction of decision trees automatically divided into units of numerical values of attributes A_i two intervals: $A_i \leq x_i$ та $A_i > x_i$, and categorical attributes A_j —two subsets: $A_j \in S_j$, $A_j \notin S_j$. Breakdown based numerical attributes tend to Mirach based on entropy or Gini index [Han, 2001]. The process is repeated recursively partitioning as long as there will not improve the accuracy of forecasting. The last step involves removal of nodes to avoid overfitinhu model. As a result we get a set of rules that go from the root to each terminal node containing inequality for numerical attributes and conditions for the inclusion of categorical attributes.

The aim is to develop a method of induction of decision trees with the ability to program implementation as a clinical expert system.

The method of induction of decision trees. The basis is taken of this recursive procedure [Han, 2001].

Generating a decision tree

Incoming data: D —set of training data sets $(A_1^i, A_2^i, \dots, A_p^i, C^i)$.

Output: decision tree.

Method:

1. Create node N .
2. If all the sets in D belong to a common class C , then return node N a sheet with the name of the class C .
3. If the list of attributes (and therefore D) is empty, then return node N a sheet with the name of the most common class D .
4. Apply algorithm attribute selection from the list of attributes for the set D with the aim of finding the "best" attribute division.
5. Remove attribute division from the list of attributes.
6. For each subject division j attribute to consider separation D_j —a plurality of sets D , satisfying separation j .
7. If D_j -empty, then connect to the site N leaf under the most common class D , otherwise – attached to N node returned recursive method call Generation of the decision tree input D_j and a list of attributes.
8. End cycle step 6.
9. Return unit N .

Based on attribute selection algorithm j —step of recursion put such information indicator:

$$Gain(A_i) = Info(D_j) - Info_{A_i}(D_j). \quad (1)$$

Here

$$Info(D_j) = - \sum_{k=1}^K p_k^j \log_2(p_k^j) \quad (2)$$

- Information needed for classification set (A_1, A_2, \dots, A_p) in D_j ,

$$Info_{A_i}(D_j) = \sum_{l=1}^{K_i} \frac{\#(D_j^l)}{\#(D_j)} Info(D_l) \quad (3)$$

- Information needed for classification (A_1, A_2, \dots, A_p) in D_j after separation D_j into subsets D_j^l according to the attribute values A_i .

In the formula (2) the probability that a random set of D_j belongs to the set C_{k,D_j} rated as

$$p_k^j = \frac{\#(C_{k,D_j})}{\#(D_j)}, \text{ where } C_{k,D_j} \text{ – plural sets of } D_j, \text{ which attribute class } C = k. \text{ Here } \#(\bullet) \text{ – number}$$

of items in the set.

In the formula (3) $\frac{\#(D_j^l)}{\#(D_j)}$ – estimate the probability that a random set of D_j belongs to the set

D_j^l , де D_j^l – Set sets with D_j , which attribute $A_i = a_i^l$. This attribute $A_i \in \{a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{K_i}\}$.

So, $Gain(A_i)$ evaluates reduce the information required to classify a random data set D_j by known attribute value A_i . Thus the available attributes for each node of the decision tree for separation conditions should be selected attribute A_{i*} with the largest value $Gain(A_{i*})$. As a result of the selection process to finalize the classification of the data set in D_j try the least information.

Software implementation. The method is implemented in Netbeans development environment in the programming language Java. Base training data deployed on the server MySQL. On fig.1 presents a conceptual model of information system. In class DecisionTree directly implemented method of induction of decision trees. In class DataManager received calls from DecisionTree to query the mysql database to obtain training data.

MySQL database consists of two tables – Table attribute, designed to store information about the attributes and tables categorised_data – for sets of training data. The structure of the tables in the SQL language for the examples below:

```
CREATE TABLE mysql.attribute (
    id integer not null unique,
    attribute_name varchar(25),
    attribute_field_name varchar(25),
    primary key (id)
) ENGINE=InnoDB;
CREATE TABLE mysql.categorised_data (
    id integer not null unique,
    A1 varchar(12),
    A2 varchar(8),
    A3 varchar(7),
    A4 varchar(7),
    A5 varchar(7),
    class varchar(8),
    primary key (id)
) ENGINE=InnoDB;
```

Software Project classes are included in the package decision_tree.model. This includes beans-class Attribute, Attribute_for_list and CategorisedData to work with relevant data tables. SQL-queries to obtain relevant data, including calculations of the information provided in the class realized AttributeListPeer.

Conclusions. The paper considered the program implementation of decision trees induction based on the information provided.

In the example shown, this approach allows to develop a system to support clinical decisions.

It is shown that it has sufficient SQL syntax features that allow information to calculate performance-based database tables.

Through the use of Java-class implementing this method of decision tree induction is a web-integrated.

Prospects of research is to analyze the performance of the software depending on the number and volume attributes sets of training data.

List of references:

1. J.Han and M.Kamber, Data Mining: Concepts and Techniques, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1st edition, 2001.
2. T.Hastie, R.Tibshirani and J.H.Friedman, The Elements of Statistical Learning, Springer, New York, 1st edition, 2001.
3. C.Ordonez, Comparing association rules and decision trees for disease prediction, In Proc. ACM HIKM Workshop, 2006, pp. 17-24.
4. C.Ordonez, Integrating K-means clustering with a relational DBMS using SQL, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (TKDE) 18(2) (2006), 188-201.
5. J.R.Quinlan. Induction of decision trees. Machine Learning, 1: 81-106, 1986.
6. J.R.Quinlan. C4.5: Programs for Machine Learning. Morgan Kaufmann, 1993.
7. L.Breiman, J.Friedman, R.Olshen, and C.Stone. Classification and Regression Trees. Wadsworth International Group, 1984.
8. Марценюк В.П., Кравец Н.О. О программной среде проектирования интеллектуальных баз данных // Клиническая информатика и телемедицина – 2004. – №1. – с.47-53.
9. Марценюк В.П. Математичні моделі в системі підтримки прийняття рішень страхового забезпечення лікування онкологічних захворювань: підхід на основі динаміки Гомперца / В.П. Марценюк, І.Є. Андрущак, І.С. Гвоздецька, Н.Я. Климук // Доповіді Національної академії наук України. –2012. – №10. – С. 34-39.
10. Марценюк В.П. Підхід на основі актуарних математичних моделей до задач страхової медицини / В. П.Марценюк, І.Є. Андрущак, Н.Я Климук // Медична інформатика та інженерія. Науково-практичний журнал. – 2010. – №4. – С. 85-87.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2016

А.В. Букетов, В.Д. Нігалатій, С.О. Сметанкін, Д.О. Зінченко
ВИКОРИСТАННЯ МОДИФІКАТОРА БЕНЗЕН-1,3-ДІАМІНУ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ
ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИДНОГО КОМПОЗИТУ

Досліджено вплив модифікатора бензен-1,3-діаміну на теплофізичні властивості епоксидного діанового олігомеру марки ЕД-20. У результаті аналізу отриманих даних встановлено оптимальну концентрацію модифікатора ($C_6H_8N_2$), що дозволило суттєво поліпшити теплофізичні властивості епоксикомпозитів. Встановлено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з підвищеними показниками теплофізичних властивостей необхідно у епоксидний зв'язувач вводити оптимальну кількість модифікатора – $q = 0,010...0,250$ мас.ч. на 100 мас.ч. смоли ЕД-20. У такому випадку формується композит зі значенням теплостійкості за Мартенсом – $T = 367$ К. Досліджено термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалів, які можливо використовувати у різних температурних діапазонах. На основі експериментальних досліджень теплофізичних властивостей з використанням сучасних методів дослідження (ДТА-, ТГА-аналіз) встановлені допустимі межі температури, при яких можливо використовувати модифіковані бензен-1,3-діаміном епоксидні композити.

Ключові слова: епоксидний композит, полімер, модифікатор, теплофізичні властивості, теплостійкість.

Рис. 4, табл. 4, літ. 10.

А.В. Букетов, В.Д. Нігалатій, С.А. Сметанкин, Д.А. Зинченко
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИКАТОРА БЕНЗОЛ-1,3-ДИАМИНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНОГО КОМПОЗИТА

Исследовано влияние модификатора бензол-1,3-диамина на теплофизические свойства эпоксидного дианового олигомера марки ЭД-20. В результате анализа полученных данных установлена оптимальная концентрация модификатора ($C_6H_8N_2$), что позволило существенно улучшить теплофизические свойства эпоксидных композитов. Установлено, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с повышенными показателями теплофизических свойств необходимо в эпоксидное связующее вводить оптимальное количество модификатора – $q = 0,010...0,250$ масс.ч. на 100 масс.ч. смолы ЭД-20. В таком случае формируется композит со значением теплостойкости по Мартенсу – $T = 367$ К. Исследован термический коэффициент линейного расширения материалов, которые можно использовать в различных температурных диапазонах. На основе экспериментальных исследований теплофизических свойств с использованием современных методов исследования (ДТА-, ТГА-анализ) установлены допустимые пределы температуры, при которых возможно использовать модифицированные бензол-1,3-диамином эпоксидные композиты.

Ключевые слова: эпоксидный композит, полимер, модификатор, теплофизические свойства, теплостойкость.

A.V. Buketov, V.D. Nigalaty, S.O. Smetankin, D.O. Zinchenko
USING MODIFIER BENZENE-1,3-DIAMINE TO IMPROVE THE THERMAL PROPERTIES
OF THE EPOXY COMPOSITE

The effect of the modifier benzene-1,3-diamine in the thermal properties of the epoxy oligomer bisphenol brand ED-20. As a result of analysis of the data set the optimal concentration of the modifier ($C_6H_8N_2$), which significantly improve the thermal properties of epoxy composites. It was found that the formation of a composite material or a protective coating with enhanced thermal properties of the necessary epoxy binder to introduce the optimum amount of modifier – $q = 0,010... 0,250$ % of 100 % ED-20 resin. In this case, the composite is formed with the heat resistance value Martens – $T = 367$ K. The thermal coefficient of linear expansion of the materials that can be used in different temperature ranges. On the basis of experimental studies of thermal properties using modern research methods (DTA, TGA analysis) set the allowable temperature limits at which it is possible to use modified benzene-1,3-diamine epoxy composites.

Keywords: epoxy composite, polymer modifier, thermal properties, heat resistance.

Постановка проблеми. Розвиток науково-технічного прогресу вимагає створення нових матеріалів з підвищеним стандартом якості, поліпшеними експлуатаційними характеристиками і тривалим життєвим циклом. У зв'язку з цим в різних галузях промисловості все частіше використовують вироби на основі полімерних композитів, які є одними з найбільш ефективних і технологічних сучасних матеріалів. На сьогодні епоксидні композити широко застосовують у промисловості. Разом з тим, з огляду на те, що до композитних матеріалів (КМ) ставлять підвищені вимоги, виникає необхідність поліпшення їх експлуатаційних характеристик в цілому. Тому розробка і дослідження нових матеріалів з високими показниками експлуатаційних характеристик є актуальним завданням сучасного полімерного матеріалознавства [1-4]. Відомо, що створення нових матеріалів шляхом поєднання різних компонентів – економічніший процес, ніж синтезування нових полімерів. Отже, для підвищення механічних та теплофізичних характеристик таких конструкційних матеріалів, якими є композити, є перспективним їх

модифікація різними за хімічною природою сполуками, які є активними до між фазової взаємодії з епоксидним олігомером. Це дозволяє суттєво поліпшувати когезійні властивості матеріалів. Перспективним в цьому плані є використання модифікатора бензен-1,3-діаміну, який містить аміни та активні групи ($C_6H_8N_2$), здатні взаємодіяти з епоксидним зв'язувачем. Передбачали, що застосування даного модифікатора забезпечить поліпшення теплофізичних властивостей КМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний науковий і практичний досвід з розроблення і дослідження властивостей композитних матеріалів (КМ) на основі полімерних зв'язувачів висвітлено у працях авторів [1-5]. Аналіз наведених вище праць дозволяє стверджувати, що одним із шляхів підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів є модифікування матриці енергетичними полями, органічними і неорганічними хімічними компонентами (модифікаторами, пластифікаторами), що дозволить поліпшити як їх когезійні, так і теплофізичні властивості [6, 7]. При цьому значної уваги приділяють дослідження структурних процесів при нагріванні КМ, що дозволяє оцінити температурний діапазон використання нових матеріалів [1-10]

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора бензен-1,3-діаміну на структурні процеси у епоксидних композитах в умовах впливу теплового поля.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84).

Для зшивання епоксидних композицій використано низькомолекулярний твердник поліетиленполіамін $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводячи твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювач для експериментальних досліджень використано модифікатор бензен-1,3-діамін. Елементарний склад модифікатора наступний, %: вуглець – 66,64; водень – 7,46; азот – 25,90.

Епоксидні КМ формували за технологією, наведеною у праці [7].

У роботі досліджували теплофізичні властивості КМ, а саме: теплостійкість (за Мартенсом), термічний коефіцієнт лінійного розширення, термостійкість (ДТА і ТГА-аналіз).

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

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження: $65 \times 7 \times 7$ мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразка з точністю $\pm 0,01$ мм. Швидкість підняття температури становила $v = 2$ К/хв.

Відхилення значень при дослідженнях показників теплофізичних властивостей КМ (теплостійкість (за Мартенсом), ТКЛР) становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження впливу кількості наповнювача на термічні перетворення у композитах застосовували метод термогравіметричного (ТГА) і диференціально-термічного (ДТА) аналізу, використовуючи дериватограф «Thermoscan-2». Дослідження проводили у температурному діапазоні $\Delta T = 298...873$ К, використовуючи кварцові тиглі для зразків з об'ємом $V = 0,5$ см³. Під час дослідження швидкість підняття температури становила $v = 5$ К/хв, при цьому як еталонну речовину використовували Al_2O_3 ($m = 0,5$ г), наважка досліджуваного зразка становила – $m = 0,3$ г. Похибка визначення температури становила $\Delta T = \pm 1$ К. Точність визначення теплових ефектів – 3 Дж/г. Точність визначення зміни маси зразка – $\Delta m = 0,02$ г.

Результати досліджень та їх обговорення. З наукової і практичної точки зору значної уваги необхідно приділяти динаміці властивостей КМ, які працюють у різних діапазонах підвищених температур. Тому, на початковому етапі досліджували теплостійкість (за Мартенсом) КМ, наповнених модифікатором бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$), у температурному діапазоні $\Delta T = 273...423$ К. При цьому вміст модифікатора змінювали у межах $q = 0,10...2,00$ мас.ч.

Встановлено [5-7], що теплостійкість модифікованої ультразвуком епоксидної матриці становить $T = 341$ К (рис.1). Введення модифікатора бензен-1,3-діаміну за вмісту

$q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. приводить до значного підвищення теплостійкості КМ відносно матриці, формуючи перший максимум, який становить $T = 367$ К. Це свідчить про фізико-хімічну взаємодію амінних груп модифікатора з макромолекулами та сегментами епоксидного зв'язувача. Вважали, що саме це приводить до рівномірного процесу полімеризації КМ (у діапазоні температур $\Delta T = 273 \dots 393$ К), внаслідок чого формується і надалі збільшується густина просторової сітки полімеру. У результаті цього підвищується когезійна міцність, а, відповідно, й теплостійкість модифікованої матриці. Отриманий результат добре узгоджується з динамікою фізико-механічних властивостей, де за вмісту у КМ модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,25$ мас. ч. виявлено наступні результати: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 58$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,4$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 11$ кДж/м². При подальшому введенні модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. спостерігали монотонне зменшення показників теплостійкості, мінімум ($T = 360$ К) яких спостерігали за вмісту часток $q = 1,00$ мас.ч. Проте, наповнення матеріалу модифікатором бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 1,25 \dots 1,75$ мас.ч. приводить до підвищення теплостійкості КМ до $T = 363 \dots 370$ К. Другий максимум на кривій залежності $T-q$ було виявлено за вмісту модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч., в результаті чого формується КМ з максимальними показниками теплостійкості ($T = 377$ К).

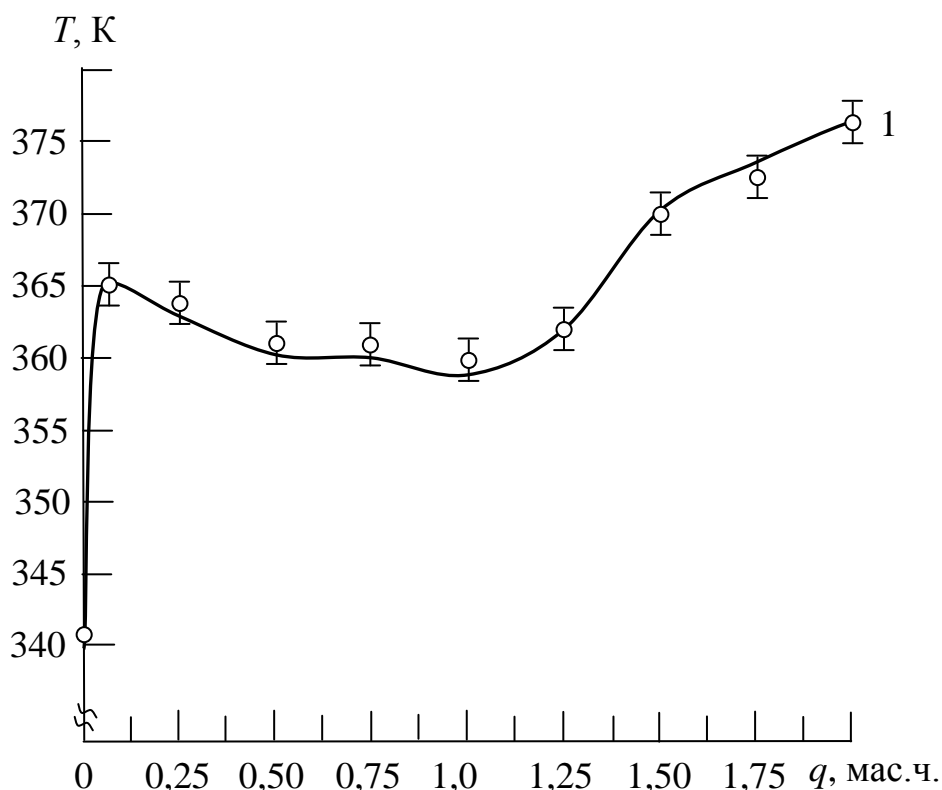
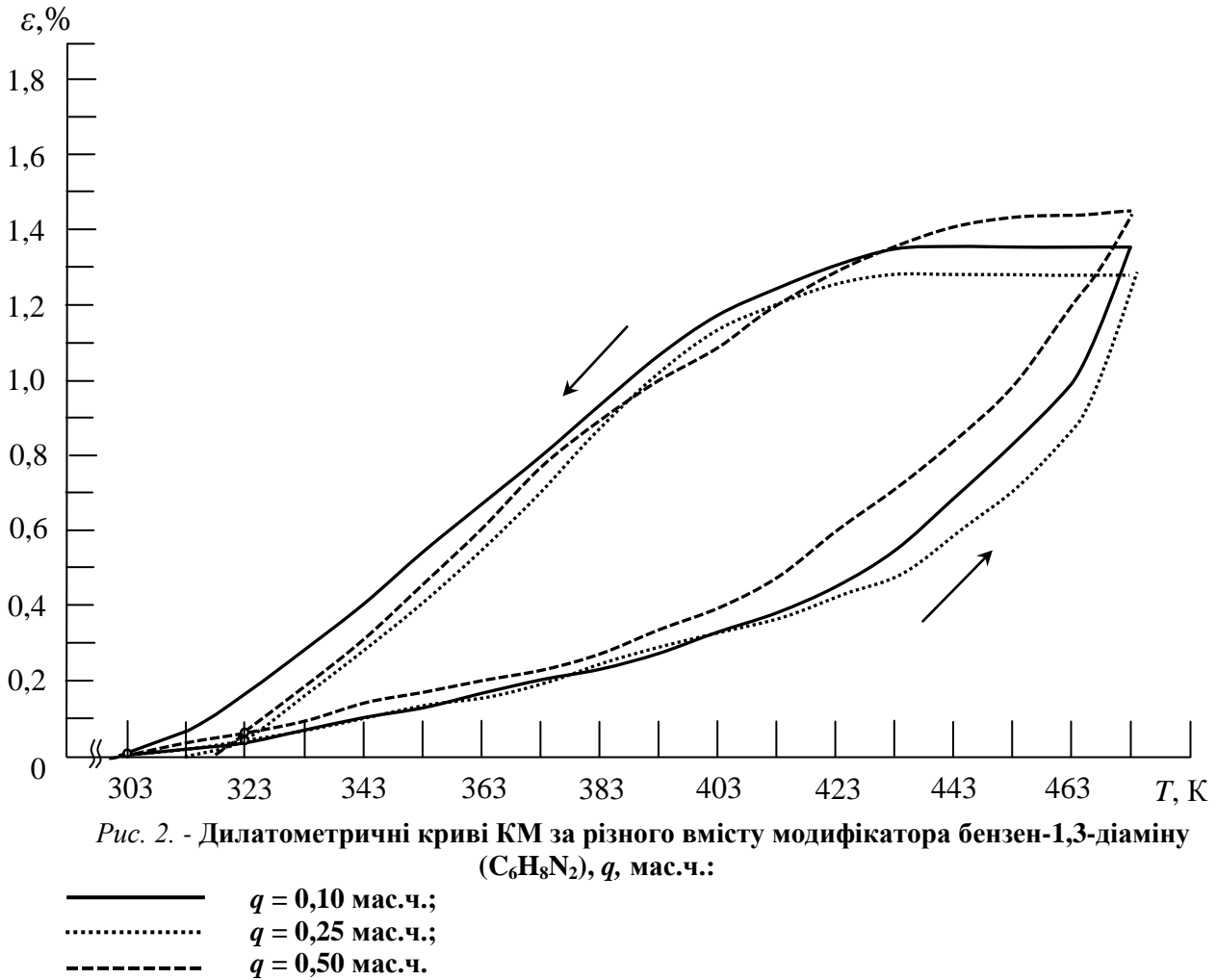


Рис. 1. - Залежність теплостійкості КМ (за Мартенсом) (T) від вмісту (q , мас.ч.) модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$).

На основі дилатометричних кривих, що ілюструють залежність відносної деформації від температури (рис. 2) розраховали ТКЛР КМ у різних діапазонах температур. Результати розрахунку ТКЛР композитів за різних температурних інтервалів дослідження наведено у табл. 1.

Експериментально встановлено (табл. 1), що зі зростанням температури ТКЛР епоксикомпозитних матеріалів збільшується. Дослідження поведінки КМ у області лінійного розширення при $\Delta T = 303 \dots 323$ К дозволяє стверджувати, що найменшим значенням ТКЛР характеризуються матеріали із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. При цьому значення ТКЛР знаходяться у межах $\alpha = (2,2 \dots 2,9) \times 10^{-5} K^{-1}$. Особливої уваги заслуговує дослідження ТКЛР матеріалів у діапазоні температур $\Delta T = 303 \dots 373$ К (табл. 1). Доведено, що найменшим термічним коефіцієнтом лінійного розширення у наведеній вище температурній області дослідження відзначається модифіковані матриці за вмісту добавки $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. Їхній ТКЛР становить $\alpha = (2,7 \dots 2,8) \times 10^{-5} K^{-1}$. Слід зазначити, що

у областях лінійного розширення $\Delta T = 303 \dots 423$ і $\Delta T = 303 \dots 473$ К також найменші значення ТКЛР, які становлять $\alpha = (3,5 \dots 7,8) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, характерні для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. (табл. 1).



Таблиця 1

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) КМ за різних температурних діапазонів випробувань

№	Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{ K}^{-1}$			
		Температурні діапазони випробування, ΔT , К			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	матриця	6,3	6,8	9,9	10,9
2	0,10	2,2	2,8	3,8	7,8
3	0,25	2,9	2,7	3,5	7,6
4	0,50	3,3	3,4	5,2	8,4
5	1,00	3,8	3,2	4,3	9,0
6	1,50	3,3	3,7	4,7	8,9
7	2,00	3,4	3,3	3,9	9,3

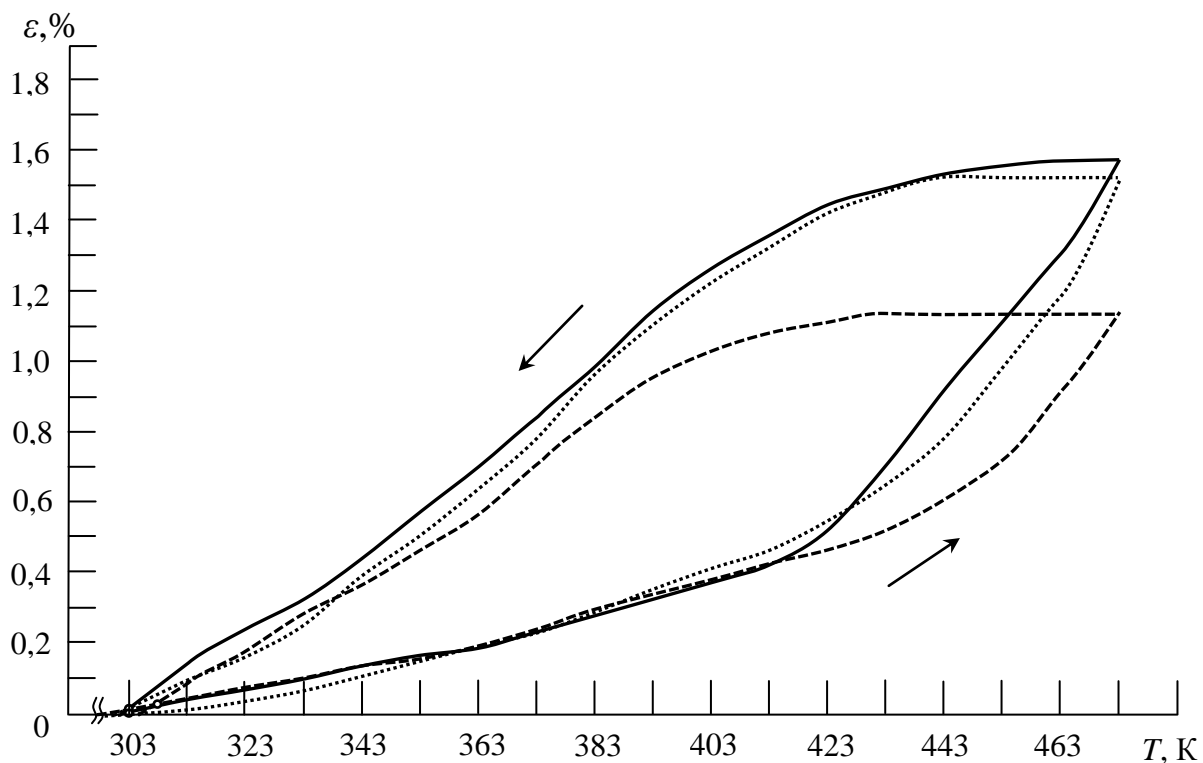


Рис. 3. - Дилатометричні криві КМ за різного вмісту модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$), q , мас.ч.:

- $q = 1,00$ мас.ч.;
- ⋯ $q = 1,50$ мас.ч.;
- - - $q = 2,00$ мас.ч.

З наведеного вище можна стверджувати, що найкращими показниками ТКЛР у досліджуваних теплових діапазонах відзначається КМ із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Можна припустити, що у такому матеріалі за оптимального вмісту добавки відбувається активізація фізико-хімічних процесів взаємодії модифікатора зі зв'язувачем, яка приводить до ущільнення просторової сітки полімеру. Останній, у свою чергу, відзначається здатністю чинити опір деформуванню (лінійному чи об'ємному) при впливі температурного фактору (за максимального значення температури – $\Delta T = 303 \dots 473$ К). Крім того, на основі наведених вище результатів випробувань теплостійкості і ТКЛР композитів можна констатувати про їх добру узгодженість, що свідчить про достовірність проведених досліджень.

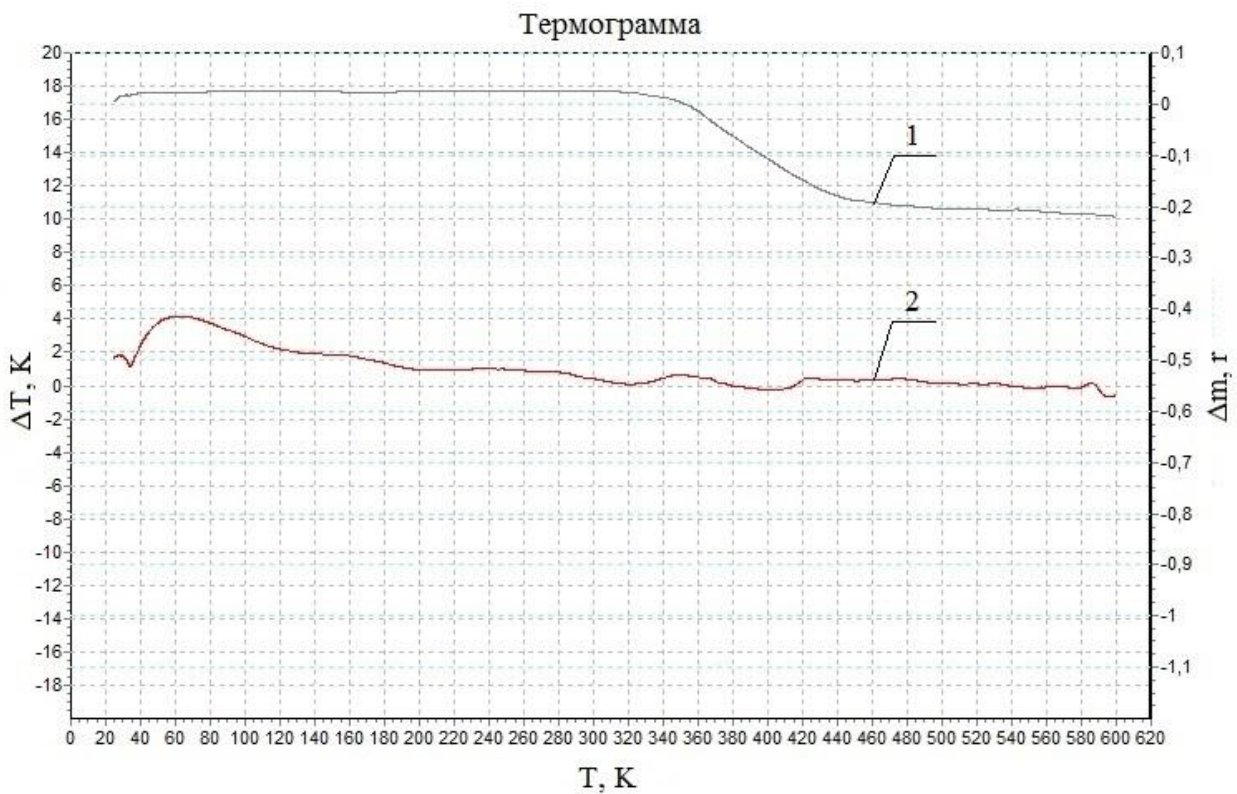
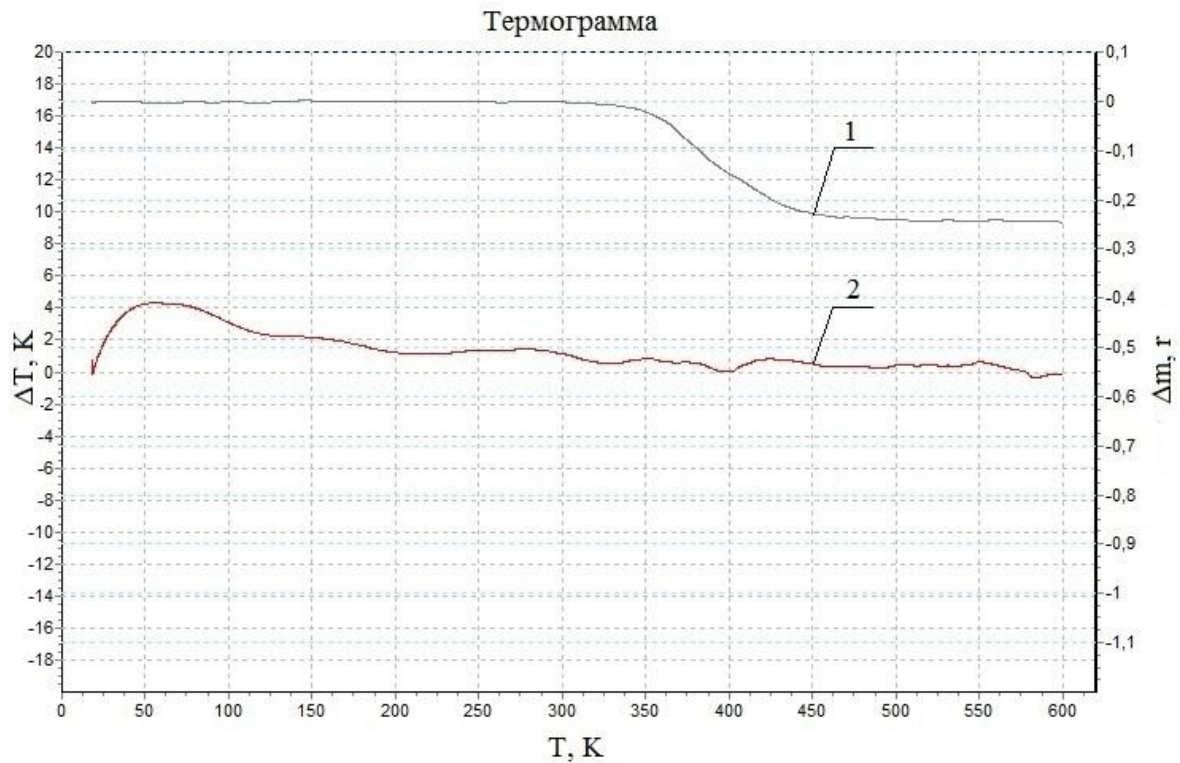
При аналізі дилатометричних кривих (рис. 2, рис. 3) додатково встановлено, що під час нагрівання і подальшого охолодження відбувається усадка матеріалів, значення якої наведено у табл. 2. Як видно із табл. 2, усадка КМ не перевищувала 2 %, а у деяких випадках вона взагалі становила $\delta = 0,002 \dots 0,003$ %. Це свідчить про суттєвий вплив модифікатора на теплофізичні властивості матриці. Отримані результати дозволяють констатувати про необхідність використання КМ у вигляді покриттів на довговимірних поверхнях складного профілю, які працюють у різних діапазонах підвищених температур.

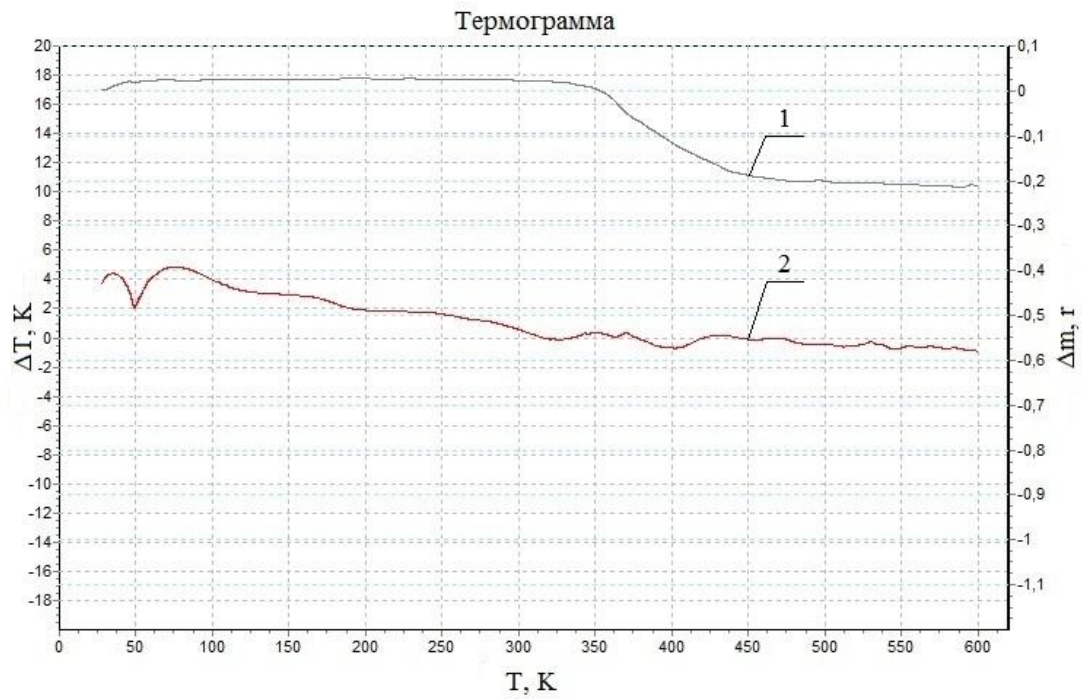
Таблиця 2

Значення усадки КМ

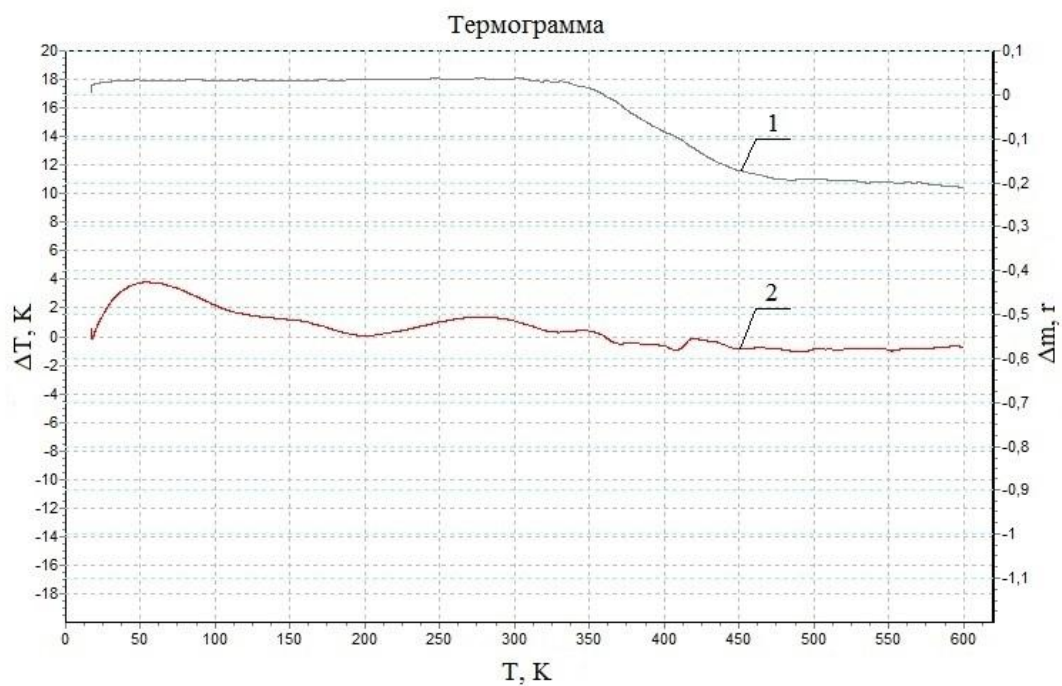
Характеристика	Вміст модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$), q , мас.ч.						
	матриця	0,10	0,25	0,50	0,100	1,50	2,00
Усадка, δ , %	0,320	0,040	0,140	0,150	0,021	0,003	0,002

У роботі додатково досліджували і аналізували поведінку епоксидних композитів за підвищених температур (термостійкість) методом термогравіметричного (ТГА) та диференціально-термічного (ДТА) аналізу (рис. 4). Аналіз проводили у середовищі повітря. При дослідженні процесу руйнування зв'язків у модифікованій матриці обрано швидкість підняття температури зразків $\nu = 10$ К/хв.





в)



г)

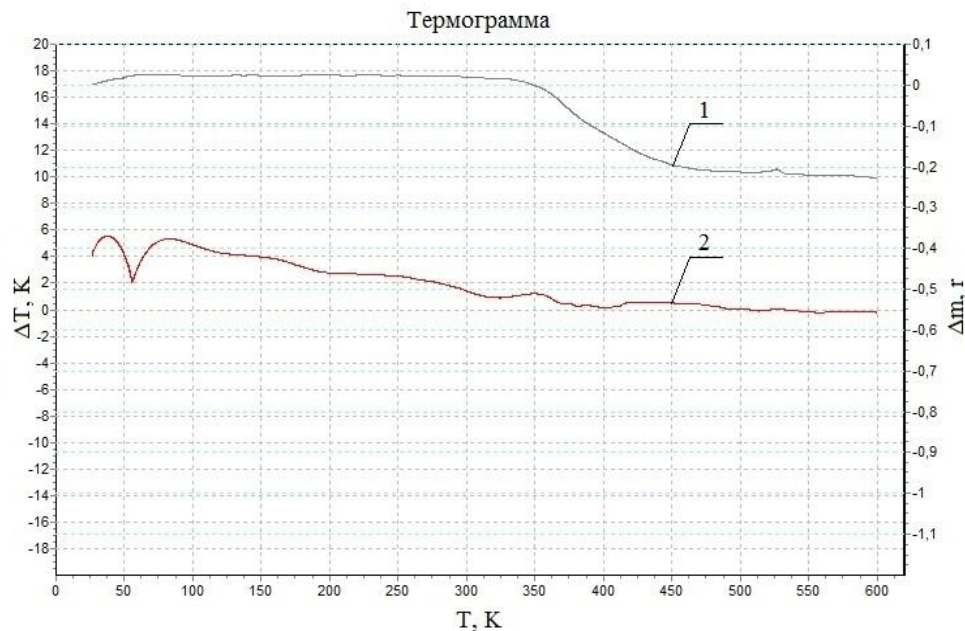
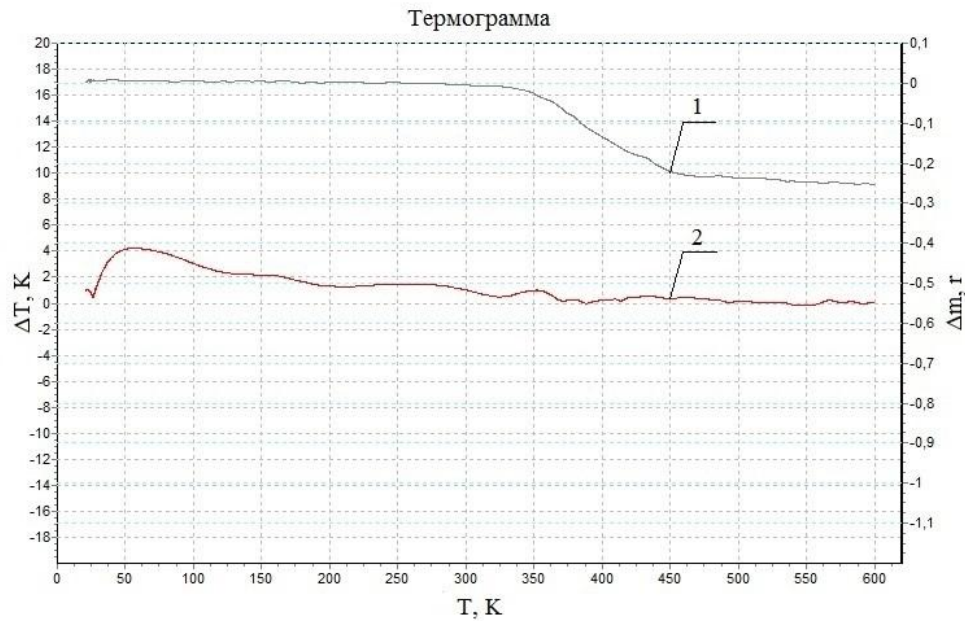


Рис. 4. - Результати термогравіметричного (1) і диференціально-термічного (2) аналізу для КМ із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$): а) 0,10 мас.ч.; б) 0,25 мас.ч.; в) 0,50 мас.ч.; г) 1,00 мас.ч.; д) 1,50 мас.ч; е) 2,00 мас.ч.

На основі експериментальних досліджень встановлено відсутність втрати маси (рис. 4, табл. 3) для досліджуваних КМ у температурній області $\Delta T = 303,0 \dots 598,3$ К. Це вказує на відсутність суттєвих структурних перетворень при нагріванні у КМ та опосередковано свідчить про незначний вміст води у досліджуваних зразках. Слід підкреслити, що початковому етапі нагрівання зразків (від $T = 303,0$ до $T_0 = 598 \dots 605$ К) не спостерігали деструкції матеріалів. Відомо [10], що на основі кривої ТГА за рахунок втрати маси зразків відносно еталону можна визначити температуру, при якій відбувається початок деструкції. При дослідженні КМ, модифікованих бензен-1,3-діаміном, початок деструкції встановлено при $T_0 = 598,6 \dots 608,5$ К, а закінчення процесу – при $T_k = 736,6 \dots 754,3$ К. Відносна втрата маси для усіх зразків КМ складає $\varepsilon_m = 73,0 \dots 76,6$ % (табл. 3). На основі експериментальних даних встановлено, що найменшим значенням температури початку деструкції ($T_0 = 598,6$ К) характеризується КМ із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,25$ мас.ч., який до того ж має найменшу

відносну втрату маси ($\epsilon_m = 73,0\%$). Вважали, що це свідчить про утворення щільної просторової сітки полімеру, яка зменшує інтенсивність рухливості основного ланцюга, макромолекул і сегментів модифікатора та епоксидного зв'язувача, за рахунок чого відбувається руйнування меншої кількості зв'язків.

Таблиця 3

Термостійкість КМ, наповненого модифікатором бензен-1,3-діаміном ($C_6H_8N_2$)

Вміст наповнювача, q , мас.ч.	T_0 , К	T_5 , К	T_{10} , К	T_{20} , К	T_k , К	ϵ_m , %
0,10	598,6	621,2	632,3	643,3	736,7	76,6
0,25	598,6	620,9	630,7	642,0	744,4	73,0
0,50	601,3	623,5	631,9	640,2	747,5	73,3
1,00	608,6	624,1	633,0	646,4	750,2	74,0
1,50	601,5	621,5	629,6	645,8	743,3	75,0
2,00	605,6	622,6	632,2	643,0	754,0	75,0

Примітка: T_0 – початкова температура втрати маси (початок деструкції); T_5 , T_{10} , T_{20} – температури втрати маси (5 %, 10 %, 20 %); T_k – кінцева температура втрати маси (завершення деструкції); ϵ_m – відносна втрата маси.

За допомогою кривих ДТА додатково встановлено екзотермічні ефекти при нагріванні КМ у діапазоні температур $\Delta T = 453,3 \dots 673,6$ К (табл. 4). При цьому, одним із найважливіших параметрів є максимальне значення екзоэффекту. Слід зауважити, що зміщення піка екзотермічного ефекту у область високих температур передбачає збільшення термостабільності матеріалу в умовах впливу теплового поля. Це, у свою чергу, зумовлено стійкістю фізико-хімічних зв'язків у КМ, що передбачає поліпшені когезійні властивості матеріалів в умовах впливу теплового поля. Встановлено, що максимальне значення екзоэффекту, яке становить $T_{max} = 643,0$ К, характерне для КМ, наповненого бензен-1,3-діаміном у кількості $q = 0,50$ мас.ч. Слід зауважити що, отриманий результат не зовсім узгоджується з результатами випробувань фізико-механічних та теплофізичних властивостей КМ. На основі аналізу температур початку і закінчення екзоэффекту T_n і T_k (табл. 4) встановлено наступне: найкращі результати показників початкової температури екзоэффекту ($T_n = 600,1$ К та $599,2$ К) характерні для зразків із модифікатором у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 1,00$ мас.ч. Кінцева температура екзоэффекту для даних КМ становить $T_k = 669,0$ й $T_k = 644,1$ К відповідно. Однак, слід звернути увагу на результати дослідження КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Для такого матеріалу початкова температура екзоэффекту, порівняно з КМ, що містить модифікатор у кількості $q = 1,00$ мас.ч., є меншою на $\Delta T_n = 4,9$ К. Однак, більша кінцева температура екзоэффекту (на $\Delta T_k = 25,3$ К) та максимальне значення екзоэффекту (на $\Delta T_{max} = 4,3$ К). Відповідно, можна стверджувати про кращі теплофізичні властивості у комплексі даного композиту, порівняно з КМ, які містить модифікатор у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Отже, за допомогою комплексної оцінки T_n і T_k (табл. 4), можна стверджувати, що КМ, який містить модифікатор бензен-1,3-діамін у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч., характеризується найкращими теплофізичними властивостями серед усього діапазону досліджених матеріалів.

Таблиця 4

Температурні інтервали екзоэффектів композитів згідно ДТА

Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Температурні інтервали екзоэффектів				Максимальне значення екзоэффектів, T_{max} , К
	T_n , К	T_k , К	ΔT_1 , К	ΔT_2 , К	
матриця	460,0	659,0	199,0	3,05	518,0
0,10	600,1	669,0	68,9	0,86	623,6
0,25	594,3	669,4	75,1	0,93	623,3
0,50	596,6	674,2	77,6	1,04	643,0
1,00	599,2	644,1	44,9	0,97	619,0
1,50	595,8	644,3	48,5	0,81	626,4
2,00	597,2	643,7	46,5	0,75	621,9

Примітка: T_n – початкова температура екзоєфекту; T_k – кінцева температура екзоєфекту; ΔT_1 – температурний інтервал екзоєфекту; ΔT_2 – різниця температур між зразком, у якому відбуваються перетворення, і еталоном, у якому перетворень немає.

Висновки. На основі експериментальних досліджень теплофізичних властивостей з використанням сучасних методів дослідження (ДТА-, ТГА-аналіз) встановлені допустимі межі температури, при яких можливо використовувати модифіковані бензен-1,3-діаміном епоксидні композити. А саме:

1. Для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними теплофізичними властивостями у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатор у кількості $q = 0,010 \dots 0,25$ мас.ч. У результаті формується матеріал, який, окрім поліпшених фізико-механічних властивостей, відзначається теплостійкістю (за Мартенсом) – $T = 367$ К. У свою чергу, для формування композитного матеріалу чи захисного покриття, що відзначається лише підвищеними показниками теплофізичних властивостей, у епоксидний зв'язувач слід вводити модифікатор за вмісту $q = 2,00$ мас.ч., теплостійкість (за Мартенсом) якого становить $T = 377$ К.

2. Досліджено поведінку розроблених композитів під впливом теплового поля. Експериментально встановлено, що за максимального діапазону температур $\Delta T = 303 \dots 473$ К доцільно використовувати композити із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. Такі матеріали характеризуються найменшим значенням термічного коефіцієнту лінійного розширення, який становить $\alpha = (7,6 \dots 7,8) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

3. Методом термогравіметричного та диференціально-термічного аналізу досліджено термостійкість розроблених композитів. Встановлено, що відносна втрата маси для усіх зразків модифікованої матриці у діапазоні температур $\Delta T = 598,3 \dots 754$ К складає $\varepsilon_m = 73,0 \dots 76,6$ %. Максимальне значення екзоєфекту становить $T_{max} = 643,0$ К для композиту, наповненого модифікатором бензен-1,3-діаміном у кількості $q = 0,50$ мас.ч. Однак, за допомогою комплексної оцінки T_n і T_k було обрано оптимальний діапазон вмісту модифікатора у епоксидній матриці – $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. Такий матеріал відзначається наступними показниками термостійкості: початкова температура екзоєфекту – $T_n = 594,3 \dots 600,1$ К; кінцева температура – $T_k = 669,0 \dots 669,4$ К, а максимальне значення екзоєфекту – $T_{max} = 623,3 \dots 623,6$ К.

Література

1. Kinloch A.J. Thermoplastic-toughened epoxy polymers / A.J. Kinloch, M.L. Yuen, S.D. Jenkins // Journal of Materials Science, vol. 29. – 1994. – P. 3781- 3790
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 // Kompositi. Polim. Mater.- 2001.- 23, '1.- P. 61-68.
4. Prabhu T. N. Thermal Degradation of HDPE Short Fibers Reinforced Epoxy Composites / T. N. Prabhu, T. Demappa, V. Harish // OSR Journal of Applied Chemistry (IOSRJAC).- 2012.- 1 (1). – P. 39-44.
5. Jung-il K. Positive temperature coefficient behavior of polymer composites having a high melting temperature / K. Jung-il, P.H. Kang, Y.C. Nho // J. Appl. Poly Sci., 92.- 2004.- P. 394-401.
6. Букетов А.В. Исследование влияния 1,4-бис(Н,Н диметилдифокарбамато)бензена на механические свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, Б.Д. Гришук, В.С. Барановський // Пластические массы. – 2014. – № 3-4. – С. 26–34.
7. Букетов А.В. Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленис (4,1-фенилен)бис(Н,Н-диетилдифокарбамату) на структуру и свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, В.О. Скирденко // Пластические массы. – 2014. – № 7-8. – С. 9-16.
8. Galstian I.Ye. Electrical and thermoelectric properties of the composite polytetrafluoroethylene –multi-walled carbon nanotubes / I.Ye. Galstian, G.Yu. Mykhailova, Yu.F. Bozbej, M.M. Nishchenko // international research and practice conference [Nanotechnology and nanomaterials (Nano-2015)], (Lviv 26-29 august 2015) – Lviv: Eurosvit, 2015. – P. 62.
9. Buketov A.V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler / A.V. Buketov, O.O. Sapronov, M.V. Brailo // Strength of Materials.-Vol. 46, No 5. - 2014.- P.717-721.
10. Buketov A.V. Epoxy nanocomposites: monograph / A.V. Buketov, O.O. Sapronov, V.L. Aleksenko. – Kherson : KSMa, 2015. – 184 p.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2016

УДК: 004.67:005.336.6:378:005.6

Б.А. Васильчук, Д.В. Фільченко*Сумський державний університет***КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ СИСТЕМ РЕЙТИНГУВАННЯ ВНЗ ЯК ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ**

Робота присвячена оцінюванню систем рейтингування вищих навчальних закладів з точки зору взаємодії з користувачем і надання йому результатів. Сформульовано список критеріїв оцінювання якості систем рейтингування вищих навчальних закладів, виділені сильні і слабкі сторони існуючих систем, визначено напрями їх подальшого розвитку з точки зору підвищення корисності для широких мас користувачів.

Ключові слова: системи підтримки прийняття рішень, системи рейтингування ВНЗ, критерії якості інформаційних систем

Б.А. Васильчук, Д.В. Фільченко**КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА СИСТЕМ РЕЙТИНГОВАНИЯ ВУЗОВ КАК ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Работа посвящена оцениванию систем рейтингования высших учебных заведений с точки зрения взаимодействия с пользователем и представления ему результатов. Сформулирован список критериев оценивания качества систем рейтингования высших учебных заведений, выделены сильные и слабые стороны существующих систем, определены направления их дальнейшего развития с точки зрения повышения полезности для широких масс пользователей.

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений, системы рейтингования вузов, критерии качества информационных систем

B. Vasylychuk, D. Filchenko**QUALITY CRITERIA OF HEI RANKINGS AS AN INSTRUMENT FOR DECISION MAKING**

The work is devoted to the evaluation of rating systems of higher education institutions in terms of interaction with a user and presentation of results to him or her. Based on the developed list of quality evaluation criteria of rating systems of higher education institutions the strengths and weaknesses of the systems under consideration have been marked, as well as the directions of their further improvement in terms of increasing the utility for the masses of users have been identified.

Keywords: decision support systems, universities rating systems, quality criteria of information systems

Введение

На сегодняшний день одним из способов отследить и сравнить количественные и качественные показатели деятельности высших учебных заведений (вузов) является построение их рейтингов. С этой целью разработано большое количество международных и национальных информационных систем для построения рейтингов разной направленности. Их задача – на основе множества данных о вузах рассчитать и предоставить позиции вузов в рейтинге широким массам пользователей. Все они имеют общий принцип организации работы: сбор исходных данных, проведение расчетов для определения рейтинговых позиций, представление результата пользователю. Но по каждому из этапов есть отличия. Так, по способу получения исходных данных можно выделить системы от вебметрических (Webometrics [1], 4ICU [2]) до экспертно-статистических (U.S. News [16], THE [3], QS [4]); по методике определения рейтинговых позиций – от средневзвешенного агрегирования с предопределёнными коэффициентами (большинство существующих систем рейтингования) до нелинейного агрегирования (CWUR [6], G-Factor [7]) и выбора весовых коэффициентов индикаторов рейтинга методами факторного анализа (украинский рейтинг «Компас» [8]); по представлению результата пользователю – от полностью не интерактивных таблиц (украинский рейтинг «Топ-200 Украина» [9]) до интерактивных форм взаимодействия с пользователем (U-Multirank [10]).

С целью приблизить системы построения рейтинга к единому стандарту был создан ряд документов, оговаривающих набор критериев, которым должны соответствовать рассматриваемые системы. Например, международная экспертная группа по ранжированию вузов IREG в своем документе рассматривает цели и задачи ранжирования, разработку индикаторов и их весов, сбор и обработку данных, презентацию результатов [11]. Профессор Саймон Маргинсон для оценки систем рейтингования выделил такие критерии, как материальность, объективность, прозрачность и другие критерии, характеризующие качество рейтинга [12]. Отдельные организации,

занимающиеся построением рейтингов вузов, также публикуют свои критерии качества. Однако все они рассматривают подобные системы преимущественно с точки зрения методики построения рейтингов, а не принципов взаимодействия информационной системы с конечным пользователем.

Большинство существующих систем построения рейтинга вузов предоставляют пользователю результат в виде отсортированной таблицы, упорядоченной по убыванию рейтинговых мест (что соответствует основной задаче таких систем), не предоставляя возможности участия пользователя в процессе ранжирования. Такой вид представления является приемлемым для представителей СМИ в качестве информационного повода с однозначной интерпретацией. Но для таких категорий пользователей, как абитуриенты, студенты, ученые, администрация вузов [13] и т.п. система должна служить прежде всего информационной системой (ИС), которая больше всего схожа с системой поддержки принятия решений (СППР) и осуществлять процесс построения рейтинга согласно предпочтениям пользователя, предоставляя ему информацию для самостоятельного принятия решения. То есть, задачей пользователя может быть не только получение и обработка информации от системы, но и непосредственное участие в построении рейтинга согласно собственным предпочтениям. Разнообразие существующих систем рейтингования вузов, а также разная степень вовлечения пользователя в процесс принятия решений при сравнении вузов составляет проблему для конечного пользователя.

Задачи исследования

Таким образом, актуальным является изучение и решение следующих задач: сформировать критерии качества систем построения рейтинга вузов, включая критерии, характерные для СППР, сделать сравнительный анализ систем, согласно сформированным критериям, провести SWOT-анализ существующего положения в особенностях представления результатов рейтингования для конечного пользователя.

Обзор существующих критериев качества систем рейтингования вузов

Рассмотрим некоторые критерии, согласно которым можно оценить систему построения рейтинга вузов. Среди всех критериев нас интересуют только те, которые характеризуют этап взаимодействия с пользователем и представление ему результатов.

Согласно Берлинским принципам ранжирования высших учебных заведений [11], системы рейтингования вузов должны:

- 1) Давать ясную информацию о своих задачах и своей целевой аудитории: каждый пользователь системы должен четко понимать, с какой целью система была создана и на кого ориентирована, чтобы иметь возможность выбрать подходящую, согласно своим потребностям;
- 2) Четко разделять вузы разных видов: каждый вид учебных заведений имеет свои особенности, из-за которых их нельзя рассматривать и сравнивать вместе;
- 3) Учитывать языковые, культурные, исторические и экономические факторы стран, вузы которых являются участниками рейтинга;
- 4) Предоставлять ясную и понятную информацию об индикаторах, которые учитываются в составлении рейтинга: пользователь должен знать, на основании чего ведутся расчеты рейтинговых мест и четко понимать значение каждого из индикаторов, влияющих на результат;
- 5) Предоставлять пользователю возможность участия в формировании результата рейтингования, например, возможность указывать удельные веса индикаторов;
- 6) Предоставлять возможность выбора формы презентации результатов рейтинга: пользователь может иметь желание не только просматривать результат в виде итоговой таблицы, но и в виде инфографики, а также в виде различных графиков и диаграмм, как статических, так и динамических; отдельно могут быть предоставлены инструменты для сравнения результатов нескольких вузов.

Профессор Саймон Маргинсон предлагает критерии качества предоставления результатов рейтинга конечному пользователю [**Помилка! Невідомий аргумент ключа.**], которые частично пересекаются с критериями из Берлинских принципов [**Помилка! Невідомий аргумент ключа.**], например, выделяются материальность и прозрачность, которые соответствуют пункту 4 предыдущего списка. Но вместе с этим присутствует и такой критерий, как «порядок пропорциональности», который указывает на то, что при составлении рейтинга нельзя вносить в одну группу университеты со значительными различиями. Стоит разделять места вузов в рейтинговой таблице, а в случае их группировки – четко указывать причину, по которой они попали в одну группу и давать возможность проследить различия вузов внутри неё.

Предлагаемые критерии качества систем построения рейтинга вузов

Рассматривая системы построения рейтинга вузов как ИС наиболее похожие на СППР, стоит выделить виды методов принятия решений в СППР [14]:

- 1) не учитывающие предпочтения лица, принимающего решение (ЛПР);
- 2) априорные и апостериорные;
- 3) интерактивные, или адаптивные (FFANN, PREF, IEM, BC-ЕМО и др.).

Проводя параллель между видами методов принятия решений в СППР и системами рейтингования вузов, первому виду соответствуют те системы, которые предоставляют пользователю только таблицу с конечным результатом, а последнему – те, которые предоставляют пользователю возможность участия в построении рейтинга, задавая весовые коэффициенты, накладывая ограничения на параметры выборки, оценивая предоставленные системой решения.

Общие рекомендации к организации диалога с пользователем в информационных системах изложены в стандарте ISO 9241-110 [15].

Основываясь на перечисленных выше критериях и опыте работы с разными системами рейтингования вузов, можно составить следующий список критериев качества систем:

1. наличие информационного сопровождения результатов рейтинга:
 - 1.1. описаны задачи (целевая функция) построения рейтинга;
 - 1.2. определена целевая аудитория;
 - 1.3. доступен перечень факторов, влияющих на целевую функцию, перечень индикаторов, с помощью которых оцениваются факторы, и способ их агрегирования в интегральный показатель (функция агрегирования и её весовые коэффициенты);
2. разделение принципиально разных видов вузов для их рейтингования по отдельности;
3. обоснованное объединение вузов в группы на этапе представления результатов рейтинга;
4. интерактивность:
 - 4.1. в отношении процесса построения рейтинга:
 - 4.1.1. возможность выбора удельных весов индикаторов пользователями;
 - 4.1.2. априорное (до ранжирования) наложение ограничений на параметры выборки (по странам, по размеру вуза, по другим характеристикам объекта рейтингования);
 - 4.2. в отношении представления результата рейтинга:
 - 4.2.1. разнообразие форм представления результата;
 - 4.2.2. инструментарий сравнения результатов нескольких вузов (в том числе методами бенчмаркинга);
 - 4.2.3. инструментарий анализа результатов для конкретного вуза или группы вузов (в динамике, выявление трендов, тенденций, приростов и т.п.);
5. удобство оперирования результатами рейтинга:
 - 5.1. возможность проведения сортировок по конечному результату и по значениям каждого индикатора или фактора;
 - 5.2. представление результатов рейтинга в разных шкалах: места в рейтинге (ranks), баллы (rates), группы (groups) и исходные данные (rawdata);
 - 5.3. наличие профиля вуза с дополнительной информацией для дальнейшего принятия решения;
 - 5.4. возможность выгрузки результатов рейтинга в файлы специальных форматов для последующего самостоятельного анализа.

Рассмотрим типичный алгоритм действий пользователя в системе рейтингования вузов. Он состоит из следующих шагов:

- 1) ознакомление с методикой сравнения, которая используется в системе (целевая функция, факторы, индикаторы, способ сбора исходных данных и их агрегирования в интегральный индекс);
- 2) выбор нужного объекта (или нескольких объектов) из всей совокупности результатов рейтинга для сравнения;
- 3) интерпретация данных, полученных из результатов рейтинга;
- 4) ознакомление с дополнительной информацией о вузе, которая может повлиять на принятие решения.

Сопоставим данный алгоритм с критериями качества систем рейтингования, сформированными ранее (рис. 1).



Рис. 1. Соответствие групп критериев качества систем рейтингования алгоритму действий пользователя (цифрами обозначены пункты алгоритма)

Анализ систем построения рейтинга вузов

Для анализа соответствия сформированным критериям были выбраны следующие системы рейтингования вузов: ARWU (Academic Ranking of World Universities) [17], U.S. News Best Global Universities Rankings (US News), THE WUR (Times Higher Education World University Rankings), QS WUR (QS World University Rankings), U-Multirank, Webometrics, CWUR (Center for World University Rankings) [18], RUR (Round University Ranking) [19], CWTS (Leiden Ranking) [20], SIR (Scimago Institutions Rankings) [21], NTU Ranking (National Taiwan University Ranking) [22], UI GreenMetric WUR [23], 4ICU (4 International Colleges & Universities), URAP (University Ranking by Academic Performance), «Компас» и «Топ-200 Украина» (рейтинги украинских вузов).

Анализируя перечисленные системы рейтингования вузов в соответствии со сформированными критериями качества, можно выделить ряд их сильных и слабых сторон.

Информационное сопровождение у большинства систем рейтингования представлено на достаточном уровне (табл. 1). Однако, только для небольшой части систем явно указано, что именно оценивается в рейтинге (все стороны деятельности вуза или только какие-то аспекты или направления) и кто является основной целевой аудиторией, потребителем результатов (студенты и абитуриенты или ученые, грантодатели и т.д.). Среди таких рейтингов стоит отметить U-Multirank, QSWUR, Webometrics, UIGreenmetric WUR. Что касается информации об индикаторах, исходных данных и их агрегировании в интегральный индекс, то некоторые системы рейтингования предоставляют информацию не в полном объеме (например, рейтинг 4ICU не указывает весовые коэффициенты для линейного агрегирования индикаторов, рейтинг CWUR не разглашает источники исходных данных).

Таблица 1.

Анализ систем рейтингования вузов по группе критериев «Информационное сопровождение» (1 – соответствует критерию; 0,5 – частично соответствует; 0 – не соответствует; «-» - отсутствует)

Пункты списка	Системы построения рейтинга вузов															
	ARWU	USNews	THE WUR	QS WUR	U-Multirank	Webometrics	CWUR	RUR	CWTS	SIR	NTU Ranking	UIGreenMetric	4ICU	URAP	«Компас»	«Топ-200 Украина»
1.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5
1.2	0	1	1	1	1	1	0	1	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5
1.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5

Возможность разделения принципиально разных видов вузов для их рейтингования по отдельности присутствует только у небольшого числа систем: U-Multirank, QSWUR (только в предлагаемом файле формата Excel). При этом следует отметить, что компания QS дополнительно предоставляет результаты рейтингов по регионам и по отраслям знаний, полученные по отдельной методике.

Группирование вузов в результатах рейтинга преимущественно отсутствует, но те системы, которые используют его, чаще всего делают это необоснованно, группируя статистически неразличимые вузы по заранее определенным промежуткам рейтинговых мест (например, ARWU,

THE, QS). Только две системы из рассматриваемых используют группирование вузов обоснованно: U-Multirank, объединяя результаты по каждому показателю в рейтинговые группы, и CWTS, строя доверительные интервалы по каждому показателю, давая возможность оценить степень различимости рейтинговых мест между собой (табл. 2).

Таблиця 2.

Анализ систем рейтингования вузов по группе критериев «Объединение и группировка вузов» (1 – соответствует критерию; 0,5 – частично соответствует; 0 – не соответствует; «-» - отсутствует)

Пункты списка критериев	Системы построения рейтинга вузов															
	ARWU	USNews	THE WUR	QS WUR	U-Multirank	Webometrics	CWUR	RUR	CWTS	SIR	NTU Ranking	UIGreenMetrics	4ICU	URAP	«Компас»	«Топ-200 Украина»
2	0	0	0	0,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5
3	0	-	0	0	1	-	0	0	1	0	-	-	-	0	0	0

Рассматривая группу критериев «Интерактивность» (табл. 3) стоит выделить системы U-Multirank и мобильное приложение QSWUR как наиболее интерактивные для конечного пользователя. Большинство систем не предоставляют возможности пользователям устанавливать собственные весовые коэффициенты для индикаторов, кроме мобильного приложения QSWUR. Остальные системы или не имеют понятия «весовой коэффициент» из-за отсутствия процесса построения интегрального индекса индикаторов (рейтинг CWTS) или весовые коэффициенты установлены авторами системы на основании статистического анализа (рейтинг «Компас») или экспертно (большинство других рейтингов). Что касается системы U-Multirank, то она работает в двух режимах: как без интегрального индекса (как CWTS), так и с ним, но при этом используется принцип «олимпийского медального зачёта». Интересный подход к экспертной установке весовых коэффициентов представлен в системе «Компас»: весовые коэффициенты индикаторов устанавливаются в зависимости от степени влияния каждого индикатора на интегральный индекс, которая оценивается с помощью факторного анализа на существующих (исторических) данных. Таким образом, весовые коэффициенты в системе «Компас» показывают не важность (весомость) каждого индикатора, установленную экспертно авторами для получения оценки интегрального индекса, а «фактическую» значимость каждого индикатора в интегральном индексе в тот момент времени, статистические данные по которому доступны.

Большинство систем предоставляют возможность наложения ограничений на параметры выборки вузов. Преимущественно, это такие параметры, как континент, страна, город, отрасль знаний, некоторые индикаторы самой системы. Стоит отметить, что в то время, как большая часть систем просто предлагает наложить ограничение на параметры выборки до получения результатов рейтингования, в системе U-Multirank ограничение параметров выборки является обязательным этапом принятия решения, который реализован в диалоговом режиме (пользователю задаются уточняющие вопросы для динамического сужения выборки вузов).

Таблиця 3.

Анализ систем рейтингования вузов по группе критериев «Интерактивность в отношении построения рейтинга» (1 – соответствует критерию; 0,5 – частично соответствует; 0 – не соответствует; «-» - отсутствует)

Пункты списка критериев	Системы построения рейтинга вузов															
	ARWU	USNews	THEWUR	QSWUR	U-Multirank	Webometrics	CWUR	RUR	CWTS	SIR	NTU Ranking	UIGreenMetric	4ICU	URAP	«Компас»	«Топ-200 Украина»

4.1.1	0	0	0	1	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
4.1.2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0

Как такового разнообразия форм представления результата рейтингования в системах нет (табл. 4). Все они предоставляют базовую форму представления результата в виде таблицы. Отличием U-Multirank является то, что он предоставляет возможность пользователю самостоятельно формировать таблицу результата, добавляя или удаляя колонки с индикаторами из базовой таблицы, а также предоставляет результаты рейтинга на круговой диаграмме и диаграммах рассеяния. CWTS в дополнение к таблице имеет форму представления в виде диаграммы рассеивания.

Инструмент сравнения вузов есть в системах RUR и U-Multirank, а также в системе ARWU на условиях дополнительной подписки (подсистема GRUP). При этом, инструмент сравнения в U-Multirank является более настраиваемым под потребности пользователя и имеет более соответствующий этим потребностям перечень пунктов для сравнения.

Инструмент анализа результатов рейтингования представлен системами преимущественно в личных профилях вузов. Наиболее информативные профили вузов имеют следующие системы: ARWU, US News, QSWUR, U-Multirank, RUR, CWTS. Их профили содержат в той или иной степени информацию о рейтинговых местах, баллах по индикаторам рейтинга, приросты или убывания в течение промежутка времени, графики и диаграммы, а в мобильном приложении QSWUR и в U-Multirank также доступны некоторые исходные данные вузов.

Таблица 4.

Анализ систем рейтингования вузов по группе критериев «Интерактивность в отношении представления результата рейтинга» (1 – соответствует критерию; 0,5 – частично соответствует; 0 – не соответствует; «-» - отсутствует)

Пункты списка критериев	Системы построения рейтинга вузов															
	ARWU	USNews	THE WUR	QS WUR	U-Multirank	Webometrics	CWUR	RUR	CWTS	SIR	NTU Ranking	UIGreenMetri	4ICU	URAP	«Компас»	«Топ-200 Украина»
4.2.1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4.2.2	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
4.2.3	1	1	0,5	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Группа критериев «Удобство оперирования результатами ранжирования» представлена системами на среднем уровне (табл. 5). Возможность проведения сортировок предоставляют такие системы рейтингования, как THEWUR, U-Multirank, Webometrics, RUR, 4ICU. При этом все из этих систем, кроме 4ICU, предоставляют возможность сортировки по индикаторам, а не только по рейтинговому месту или алфавиту.

По степени агрегирования исходных данных в результатах рейтинга наименее информативной является система 4ICU, представляющая результаты рейтинга только в виде места вуза в рейтинге, даже без детализации по индикаторам. Остальные системы, кроме итоговых рейтинговых мест, также представляют информацию о баллах интегрального показателя или индикаторов, что является более информативным для пользователя, который может по этим данным определить степень различия рейтинговых мест вузов. Стоит отметить, что мобильное приложение QSWUR и система U-Multirank предоставляет доступ и к исходным данным вузов.

Дополнительные данные в профиле вузов представляют собой такую информацию о вузе, как направления обучения, программы стажировки, стоимость и условия обучения, инфраструктура университета и т.п. У пользователей, владеющих такой дополнительной информацией, появляется больше параметров, по которым они могут их сравнивать уже вне рейтинга. Наиболее полно такая информация предоставлена в профилях систем US News, QSWUR, RUR, 4ICU.

Для дополнительного анализа и обработки данных рейтинговой таблицы некоторые системы предоставляют возможность загрузить полученные данные в виде файла специального формата.

Системы QSWUR, CWTS, Scimago предоставляют для загрузки файл в формате XLS или CSV, которые являются наиболее удобными для обработки. Система U-Multirank предлагает загрузить файл в формате PDF или HTML, которые являются менее удобными для обработки и анализа. Другие системы не имеют подобного функционала.

Таблица 5.

Анализ систем рейтингования вузов по группе критериев «Удобство оперирования результатами рейтинга» (1 – соответствует критерию; 0,5 – частично соответствует; 0 – не соответствует; «-» - отсутствует)

Пункты списка критериев	Системы построения рейтинга вузов															
	ARWU	USNews	THE WUR	QS WUR	U-Multirank	Webometrics	CWUR	RUR	CWTS	SIR	NTU Ranking	UIGreenMetric	4ICU	URAP	«Компас»	«Топ-200 Украина»
5.a	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5.б	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
5.в	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5
5.г	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0

Выводы

Таким образом, на основании документа «Берлинские принципы ранжирования вузов», критериев Саймона Маргинсона и опыта использования систем построения рейтинга вузов были сформулированы и разделены на группы критерии качества таких систем. Также был составлен алгоритм действий пользователя в подобных системах, который отражает применимость сформулированных критериев качества. В соответствии с определенными критериями было проанализировано множество существующих систем рейтингования вузов, среди которых как международные, так и украинские системы.

В результате анализа было установлено, что в целом на текущем этапе существования и развития систем рейтингования вузов существующие системы не в полной мере соответствуют сформированным критериям качества и слабо ориентированы на вовлечение пользователей в процесс построения рейтинга вузов с собственными предпочтениями. Наиболее соответствующими установленным критериям, являются системы U-Multirank и QSWUR, что следует из таблиц, составленных для анализа существующих систем.

Данное исследование позволило определить основные слабые места существующих систем построения рейтинга вузов и основные направления, в которых они должны развиваться, чтобы быть наиболее полезными для широких масс пользователей.

Литература.

1. Ranking web of universities [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.webometrics.info/en>.
2. 4 International Colleges & Universities [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.4icu.org/>.
3. The Times Higher Education World University Rankings [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings>.
4. QS World University Rankings [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.topuniversities.com/university-rankings>.
5. University Ranking by Academic Performance [Электронныйресурс] – Режимдоступудоресурсу: <http://www.urapcenter.org>.
6. Centerfor World University Rankings [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://cwur.org/>.
7. Filchenko D. A Web Metrics of the Universities Mutual Impact: G-Factor Revisited / D. Filchenko, V. Lyubchak. // Proceedings of the 8th International Conference on Webometrics, Informetrics and Science to metrics (WIS) & 13th COLLNET Meeting, Seoul, South Korea. – 2012. – С. 240–243.
8. Рейтинг "Компас" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.yourcompass.org/>.

9. Рейтинг "Топ-200 Україна" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://euroosvita.net/?category=3>.
10. U-Multirank [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.umultirank.org/>.
11. IREG. Берлинские принципы ранжирования высших учебных заведений [Електронний ресурс] / IREG. – 2006. – Режим доступу до ресурсу: http://ireg-observatory.org/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=60.
12. Курбатов С. В. Університетські рейтинги як інструмент оцінки ефективності / Сергій Володимирович Курбатов // Феномен університету у контексті часових та просторових викликів / Сергій Володимирович Курбатов. – Суми: ТОВ "ВТД "Університетська книга", 2014. – С. 157.
13. Васильев А. В. Вебометричні рейтинги як складова інструментарію ефективного менеджменту ВНЗ / А. В. Васильев, Д. В. Фільченко. // Вища школа : наук.-практ. вид. – 2013. – №2. – С. 37–44.
14. Шварц Д. Т. Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Обзор / Д. Т. Шварц. // Наука и образование. – 2013. – №4. – С. 245–264.
15. ISO 9241-110:2006 Ergonomics of human-system interaction – Part 110: Dialogue principles [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38009.
16. U.S. News Best Global Universities Rankings [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.usnews.com/education>.
17. Academic Ranking of World Universities [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.shanghai ranking.com/ru/>.
18. Center for World University Rankings [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://cwur.org/>.
19. Round University Ranking [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://roundranking.com/>.
20. CWTS Leiden Ranking [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.leidenranking.com/>.
21. Scimago Institutions Rankings [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.scimagoir.com/>.
22. National Taiwan University Ranking [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://nturanking.lis.ntu.edu.tw/>.
23. UI Green Metric World University Ranking [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://greenmetric.ui.ac.id/>.

Рецензенты:

- 1) **Лавров Евгений Анатольевич**, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета;
- 2) **Новомлинец Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и автоматизированного проектирования строительных конструкций, первый проректор Черниговского национального технологического университета.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2016.

УДК 639.38

Н.В. Волкова*Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ***УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИГОТУВАННЯ РИБНИХ СІЧЕНИХ ВИРОБІВ ДЛЯ СТУДЕНТСЬКОГО ХАРЧУВАННЯ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯМ ШРОТУ**

Піднімаються питання розробки концепції повноцінного здорового харчування студентської молоді на основі використання в січених рибних виробках біодобавки шрот з насіння вівса. Зазначено що шрот використовують у технології приготування рибних січених виробів як структуроутворюючий компонент, що підвищує смакові якості та енергетичну цінність виробу. Проаналізовано комплекс фізико-хімічних, органолептичних та функціонально-технічних показників біологічної добавки шрот з метою використання її під час виробництва рибних січених виробів.

Ключові слова: біодобавка шрот, рибні січені вироби, студентське харчування

Н.В. Волкова**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИГОТОВЛЕНИЯ РЫБНЫХ РУБЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СТУДЕНЧЕСКОГО ПИТАНИЯ ПУТЕМ ДОБАВЛЕНИЯ ШРОТА**

Затрагиваются вопросы разработки концепции полноценного здорового питания студенческой молодежи на основе использования в сеченых рыбных изделиях биодобавки шрот из семян овса. Отмечено что шрот используют в технологии приготовления рыбных сеченых изделий как структуроутворюючий компонент, который повышает вкусовые качества и энергетическую ценность изделия. Проанализирован комплекс физико-химических, органолептических и функционально-технических показателей биологической добавки шрот с целью использования ее во время производства рыбных сеченых изделий.

Ключевые слова: биодобавка шрот, рыбные сеченые изделия, студенческое питание

N.V. Volkova**IMPROVEMENT OF PREPARATIONS' TECHNOLOGIES OF FISH SECHENNY PRODUCTS FOR STUDENTS FOOD BY MEAL ADDITION**

Questions of the concepts development of good healthy nutrition of student's youth on the basis of use in chopped fish products of dietary supplement meal from an oats seed are brought up. The modern production of fish goods is accompanied plenty of output of albumen. Questions of the concepts development of good healthy nutrition of student's youth on the basis of use in chopped fish products of dietary supplement meal from an oats seed are brought up. The modern production of fish goods is accompanied plenty of output of albumen. The complex of physical and chemical, organoleptic and functional and technical indicators of biological additive meal for the purpose of its use is analysed during production of fish chopped products.

Keywords: biotaddition outs seed, fish chopped products, student feed

Постановка проблеми: На сьогоднішній день розробка нових харчових продуктів тісно пов'язана з комплексом існуючих сировинних, фінансових та технологічних ресурсів і обмежень.

Останнім часом в умовах несприятливої екологічної ситуації особливо гостро постає питання здоров'я суспільства. Відомо, що здоров'я людини практично на 40 % залежить від якості продуктів харчування та від вмісту в них поживних речовин. До сировини багатої на білкові речовини належить, передусім, м'ясна та рибна сировина. Слід зазначити, що за своїм хімічним складом рибна сировина майже не поступається м'ясу свійських тварин, а за вмістом мінеральних речовин, вітамінів і ступенем засвоюваності білків – перевершує його. Сьогодні рибна промисловість перебуває в складному становищі. Зниження обсягів вилову риби та нерибних продуктів моря у Світовому океані привело до зменшення запасів біоресурсів і, як наслідок, до зросту цін на рибну сировину. Як відомо, рівень споживання риби та продуктів її переробки є одним із найважливіших показників якості життя населення. У таких умовах раціональне використання рибної сировини і реалізація комплексного підходу до її переробки з виробництвом харчової та кормової продукції є стратегічно необхідним напрямом розвитку рибної промисловості [6].

Розробка концепції харчування студентів має враховувати певні особливості організму студентів та фактори, які мають вплив на стан їх здоров'я. Основними складовими концепції здорового харчування студентів мають бути: профілактична спрямованість харчування, якісне та кількісне співвідношення біодобавок; енергетична відповідність, режим харчування, безпечність харчування, культура харчування [1].

Метою статті є аналіз комплексу фізико-хімічних, органолептичних та функціонально-

технічних показників біологічної добавки шрот з метою використання її під час виробництва рибних січених виробів для студентського харчування.

Матеріали і методи. Питання здорового харчування студентської молоді вивчають А. Афонін, В. Бобрицька, Г. Грибан, О. Меліков, П. Ткаченко та інші. Аналіз робіт дослідників визначає необхідність вивчення чинників, які характеризують здоровий раціон харчування, вміст у ньому поживних та енергетично цінних речовин. Проблеми застосування методів біотехнології для покращення технологій приготування страв розглядають О. Д'яков, О. Жулінська, О. Ільмінська, Т. Лазарева, Л. Мостова, Б. Панікарова, К. Свідло, О. Торяник та інші.

Питання організації харчування студентів, на жаль, сьогодні не постає як першочергове. В Україні майже немає сучасних законів, постанов, методичних рекомендацій щодо раціонального харчування саме студентів, тобто молоді, яка зайнята активною розумовою працею. В діючому законі Про Освіту (2014) відмічено, що організація та відповідальність за харчування у державних навчальних закладах покладається на місцеві органи виконавчої влади та органи місцевого самоврядування, центральні органи виконавчої влади яким підпорядковані навчальні заклади та керівники навчальних закладів і здійснюється за рахунок бюджетних асигнувань, що на сьогоднішній день є неможливим. В наказі Міністерства охорони здоров'я України про затвердження норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах та енергії наведені загальні дані – середньостатистичні норми без урахування особливостей трудової діяльності та харчування студентів [3].

У роботах М. Амосова, О. Асмолова, Л. Божович, В. Крутецького, С. Максименка та інших студенти розглядаються як професійно-виробнича група населення певної вікової категорії, що об'єднана певними особливостями праці та умовами життя. Враховуючи ці фактори, доцільно виділити студентів в особливу групу. У цей період закінчується фізичний розвиток організму та статеве дозрівання, уповільнюється темп росту тіла, помітно збільшується м'язова маса, сила і працездатність, закінчується формування і функціональний розвиток тканин та органів [2].

Результати дослідження.

Виходимо з того, що студенти мають такі особливості життєдіяльності: напружена розумова праця; навантаження на нервову систему, необхідність запам'ятовування великої кількості інформації; навантаження на органи зору; частий вплив стресових ситуацій, низький рівень енерговитрат, порушення харчового статусу. Всі перераховані чинники можуть вплинути на стан здоров'я студента [2].

Студенти розглядаються як професійно-виробнича група населення певної вікової категорії, що об'єднана певними особливостями праці та умовами життя. Враховуючи ці фактори, доцільно виділити студентів в особливу групу. Період навчання у ВНЗ складає 4...5 років. Вік студентів коливається від 17 до 23 років. В цей період закінчується фізичний розвиток організму та статеве дозрівання, уповільнюється темп росту тіла, помітно збільшується м'язова маса, сила і працездатність, закінчується формування і функціональний розвиток тканин та органів. Саме тому є актуальною тема правильної організації харчування студентів, яка потребує розробки науково обґрунтованої Національної концепції забезпечення здоров'я молоді та сприятиме реалізації системного підходу до харчування студентів.

Зміна характеру харчування (споживання високорафінованих продуктів, продуктів тривалого зберігання); порушення режиму харчування; малорухомий спосіб життя (гіпокінезія, гіподинамія) може призвести до захворювань органів травлення, нервових стресів та неврозів, втомлюваності та поганого засвоєння матеріалу, що у свою чергу веде до неякісної підготовки майбутнього спеціаліста, а нинішнього студента.

Надзвичайно важливим є відповідність енергоцінності раціону до енергозатрат, збалансованість раціону. Добова витрата енергії повинна повністю покриватися за рахунок енергії, отриманої з їжі. В повсякденному раціоні мають бути основні компоненти: білки, жири і вуглеводи з гармонійним поєднанням всіх чотирьох смаків: гіркового, солоного, солодкого і кислого. У 3-5 разовому режимі харчування збагаченому вітамінами, мікроелементами перевага повинна надаватися натуральним продуктам, вживанню достатньої кількості рідини.

Можна рахувати, що фактор харчування вказує вплив на довго тривалість життя і активну діяльність людини.

Кожні 10-11 років кількість населення світу збільшується в середньому на 100 млн. , в теперішній час перевищила 6 млрд. Щороку вмирає приблизно 13 млн. дітей в віці до 5 років із

котрих 8 млн. в результаті сукупної дії недостатнього харчування і інфекційних захворювань. Такий високий рівень смертності дітей обумовлений недостатністю харчування в 75% випадків не від компонентів харчування, а від аліментарного дефіциту компонентів харчування.

Розробка концепції харчування студентів має враховувати певні особливості організму студентів та вплив факторів, котрі мають вплив на стан їх здоров'я. Основними складовими концепції мають бути: профілактична направленість харчування, якісне та кількісне співвідношення шроту; енергетична відповідність, режим харчування, безпечність харчування, культура харчування.

До продуктів, які підсилюють активність мозкової діяльності, і при цьому є відносно дешевими, смачними та енергетично вмісними є риба.

Сучасне виробництво рибної продукції супроводжується великою кількістю білоквмісних відходів (кістки, плавники, шкіра, нутроці тощо), які складають від 30 до 50 % від маси вихідної сировини. Білоквмісні відходи – це джерело колагену та продуктів його гідролізу, які застосовуються в багатьох галузях промисловості. Рибну колагеномістку сировину (КС) найчастіше поділяють на дві великі групи: м'яку сировину – шкіра, нутроці та кісткову – кістки, хрящі, плавники. Залежно від джерела походження колаген поділяють на волокнистий колаген дерми шкіри, гіаліновий колаген кісткової тканини – осейн, хондритовий колаген хрящів, іхтуаліновий колаген рибного мішура – іхтиокол і колаген плавників риб – іхтилепелін [6].

Рибний колаген знайшов своє застосування у багатьох галузях промисловості. У поліграфії колаген використовується у процесі виробництва фотоплівок; він також входить до складу автомобільних фарб і клейових матеріалів. У медицині з нього виготовляють трубки, губки, пластирі, пов'язки, косметичні імпланти, розчинні шви, протези кровоносних судин та систем тощо, включають до складу мазей від опіків, від рубців, для кращого загоєння післяопераційних швів. У легкій промисловості колаген є сировиною для виробництва взуття, сумок, гаманців, водонепроникних костюмів, поясів тощо; а в косметичній галузі – як складова частина масок, кремів, скрабів. Найширше рибний колаген використовується у харчовій промисловості: при виробництві желатину, для освітлення вин, для отримання їстівних оболонок, харчових плівок і покриттів, при виробництві штучної ікри, бульйонів, соусів, напоїв, коктейлів і як добавки в хлібопекарному та кондитерському виробництві [4].

Одним із постачальником рибного колагену є продукти, приготовані з риби. Січені вироби з риби містять у своєму складі філе риби без шкіри й костей, овочеву сировину, сіль харчову йодовану, структуруючі добавки, зокрема біодобавки. Страви з рубленої риби жарять, тушкують, запікають, рідкіше варять на пару або припускають (наприклад, кнелі). При цьому біодобавки слугують не лише постачальником необхідних мікроелементів для організму, тобто підвищують її харчову цінність та активізують смакові якості, але й засобом удосконалення технології приготування страви [4].

Однією з найбільш використовуваних біодобавок є шрот (з німецької Schrot – дрібні шматки, обрізки) – твердий залишок насіння олійних культур після вилучення з нього олії органічними розчинниками в дистильаторах і випарниках. Шрот є побічним продуктом виробництва рослинних олій, отриманий після екстрагування з макухи олій розчинниками. Речовина із вмістом 1,5-2 % олії, що залишається після остаточної обробки, і є шротом. Екстракція у шроті збільшує сорбційні властивості, здатність до зв'язування і видалення з організму токсинів і радіонуклідів. Спеціально підібрана ступінь подрібнення дає можливість організму всмоктувати з нього необхідні мікро- та макроелементи, водо- та жиророзчинні вітаміни, амінокислоти та інші життєво необхідні сполуки, а також працювати сорбентом [7].

Залежно від початкової сировини розрізняють соняшниковий, соєвий, ріпаковий (камоловий), арахісовий, гірчичний, конопляний, кукурудзяний та інші види шротів. Шрот використовується, насамперед, як високопротеїнова добавка для виробництва високоякісних кормів для худоби та птиці, оскільки шрот вважається багатим на протеїни, жири, рослинні білки, клітковину, вітаміни Е та В, калій, фосфор та інші мінеральні речовини [7].

Ляний, соєвий і особливо соняшниковий шрот включають у комбікорми для сільськогосподарських тварин і птахів всіх видів; конопельний – для молочних корів, годування великої рогатої худоби, дорослих овець і ставкових риб; коріандровий і рициновий – в обмеженій кількості (через вміст рицину), головним чином для відгодівлі великої рогатої худоби; бавовниковий – у невеликих кількостях (через вміст госипола) для молочних корів і відгодівлі великої рогатої худоби й свиней [7].

За вмістом сирого протеїну виокремлюються два види шроту: високопротеїновий і

низькопротеїновий. Найціннішим є високопротеїновий соєвий шрот, профат якого становить 48-49 %, з яких 45-46 % білок, а решта – жири. Низькопротеїновий соєвий шрот містить 42-43 % білків та 2-3 % жирів. Високопротеїновий соняшниковий шрот містить від 39 % білка, а низькопротеїновий до 36 %. Ріпаковий або ж каноловий шрот містить до 36 % білка. Ці три види шроту є найпопулярнішими на світовому ринку. Водночас, ця популярність не завжди збігається з обсягами виробництва, наприклад третє місце належить бавовниковому шроту, але він майже не використовується поза країнами виробниками [7].

Шрот із насіння вівса додатково збагачує організм флавоноїдами, клітковиною, білками, жирами, вуглеводами, вітамінами В1, В2, РР, В3, Е, мікро- та мікроелементами. Він, при невеликій вартості, сприяє оптимальному функціонуванню органів дихання, травлення, печінки, підшлункової залози, ендокринної, серцево-судинної й імунної систем. При цьому знижує калорійність їжі, очищає організм від токсинів, радіонуклідів, шлаків і паразитів [7].

Нами були проведені дослідження, спрямовані на розробку технології уведення білкової добавки (БД) у рибну колагеномістку сировину. Як вихідна сировина для БД використовується шрот із насіння вівса, що вводиться на етапі перемішування рецептурних компонентів фаршу, та в такий спосіб не змінює традиційний технологічний процес виробництва рибних січених виробів.

Б. Панікаровою з'ясовано, що використання БД у рецептурах рибних січених виробів приводить до зменшення втрат під час технологічного процесу в усіх дослідних зразках. Найбільше зниження втрат маси спостерігається для рибних січених виробів із вмістом БД 15 % і складає 4,5 % для пудингу та 5,5 % для рибних котлет. Дослідження тривалості теплової обробки показало, що використання білкової добавки у технологіях виробництва рибних січених виробів, скорочує теплову обробку, зокрема для котлет, шніцеля та пудингу рибного на 4,3 %, 6,8 % та на 10,4 % відповідно [4].

Було досліджено біологічну цінність нових рибних січених виробів на основі фаршу з розробленою добавкою. Її оцінювали за розрахунковими показниками: амінокислотним скором, коефіцієнтом різниці амінокислотного скору (КРАС), біологічній цінності (БЦ), коефіцієнту утилітарності (U). Визначено, що значення амінокислотних скорів рибних січених виробів з 5 %, 10 % та 15 % БД за вмістом незамінних амінокислот у розроблених виробках більш наближений до вимог ФАО/ВООЗ. Збільшення частки БД в рецептурі позитивно впливає на значення показника КРАС [4].

Висновки. Отже, білкову добавку шрот доцільно використовувати у технології приготування рибних січених виробів як структуроутворюючий компонент, що підвищує смакові якості та енергетичну цінність виробу. Напрями подальших досліджень вбачаємо в розробці концепції харчування студентів із визначенням умісту шроту, який потрібно вводити до раціону для компенсації підвищених енергетичних витрат, у зв'язку з особливостями діяльності студентів та розробки раціону, що містять у своєму складі рибні січені вироби із біодобавками для повноцінного функціонування тканин та органів підростаючого організму.

Список використаних джерел:

1. Грибан Г. П. Основи повноцінного харчування студентської молоді як один із показників здорового способу життя / Г. П. Грибан, П. П. Ткаченко // Achievement of high school. – 2012. – № 24. – С. 58-63.
2. Крутецкий В. А. Основы педагогической психологии / В. А. Крутецкий. – Москва : Просвещение, 1972. – 255 с.
3. Максименко С. Д. Актуальні питання психологічного обґрунтування заходів пропаганди здорового способу життя серед підлітків та юнаків / С. Д. Максименко // Практична психологія та соціальна робота. – 2010. – № 11. – С. 1-3.
4. Панікарова Б. О. Удосконалення технології рибних січених виробів шляхом використання білкової добавки з колагеновмісної сировини : автореферат... канд. техн. наук, спец. : 05.18.16 – технологія харчової продукції / Панікарова Б. О. – Харків, 2014. – 21 с.
5. Свідло К. В. Методологія і організація наукових досліджень у харчовій галузі : підручник для студентів вищих навчальних закладів / К. В. Свідло, Т. А. Лазарева, Л. О. Барієва. – Харків : Світ книг, 2013. – 225 с.
6. Технологія харчових продуктів функціонального призначення : підручник для студентів вищ. навч. закл. / Л. М. Мостова, Н. Ю. Олійник, К. В. Свідло, Т. А. Лазарева. – Харків : УППА, 2013. – 450 с.
7. Шрот як харчова добавка [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%80%D0%BE%D1%82> (20.10.2016).

Стаття надійшла до редакції 08.11.2016.

UDK 691.2, 693.15, 691.58, 699.8

¹Gonzalez Sanchez J.A., ¹Bilyy O., ²Iukhym R.¹*Centre for Corrosion Research, Autonomous University of Campeche, Campeche, Mexico*²*Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Science in Ukraine, Lviv, Ukraine***APPLICATION OF EPOXY MORTAR AND POLYESTER RESIN AS INJECTION MATERIAL FOR RESTORATION CALCAREOUS STONE OF HISTORICAL BUILDINGS**

The injecting a new material into the damaged places is one of the most promising approaches to the prolongation of a long-term structure's service life. Such technology can be successfully applied to historical monuments and buildings of colonial and prehispanic time in Campeche.

Keywords: epoxy mortar, polyester resin, injection technology, restoration work, calcareous stone

¹Гонсалес Санчес Х.А., ¹Білий О.Л., ²Юхим Р.Я.¹*Центр корозійних досліджень, Автономний університет Кампече, Кампече, Мехіко*²*Фізико механічний інститут ім.Г.В. Карпенка НАНУ, Львів, Україна***ЗАСТОСУВАННЯ ЕПОКСИДНИХ РОЗЧИНІВ ТА ПОЛІЕФІРНИХ СМОЛ В ЯКОСТІ ІН'ЄКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ З ВАПНЯКОВОГО КАМЕНЮ**

Згідно зі світовою практикою відновлення пошкоджених бетонних конструкцій за тривалої експлуатації і опірності зростання критичних дефектів за допомогою ін'єкції нового матеріалу в пошкоджені місця є одним з найбільш перспективних підходів до подовження довгострокових термінів служби. Така технологія може бути успішно застосована до історичних пам'яток і будівель, зроблені з каменю. У роботі проведено дослідження ін'єкційних матеріалів – епоксидного розчину та поліефірної смоли – , що використані для відновлення міцності та цілісності Колоніальних та Доіспанських будівель з вапняку.

Ключові слова: епоксидна смола, поліефірна смола, ін'єкційні технології; реставраційні роботи, вапняковий камінь.

¹Гонсалес Санчес Х.А., ¹Білий О.Л., ²Юхим Р.Я.¹*Центр корозионних исследований, Автономный университет Кампече, Кампече, Мехико*²*Физико-механический институт им.Г.В. Карпенко НАНУ, Львов, Украина***ПРИМЕНЕНИЕ ЭПОКСИДНЫХ РАСТВОРОВ И ПОЛИЭФИРНЫХ СМОЛ В КАЧЕСТВЕ ИНЪЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ С ИЗВЕСТНЯКОВОГО КАМНЯ**

В работе проведено исследование инъекционных материалов - эпоксидного раствора и полиэфирной смолы, используемых для восстановления прочности и целостности Колоніальних и Доіспанських зданий сооруженных из известняка

Ключевые слова: эпоксидная смола, полиэфирная смола, инъекционные технологии; реставрационные работы, известняковый камень.

Introduction. In accordance with world practice, the restoration of impaired concrete structures under long-term operation and confinement of the growth of critical defects by means of injecting a new material into the damaged places is one of the most promising approaches to the prolongation of a long-term structure's service life [1-5, 11]. Such technology can be successfully applied to colonial and prehispanic monuments and buildings of Campeche area from stone, such as limestone materials. Injection technologies are on the specific polymer materials based that are suitable for processing on construction sites and provide the appropriate adhesion with base material (concrete or rock) in cracks and other type of defects [2-5].

The process of injection materials includes direct preparation at the working site at ambient temperatures. In particular, aqueous suspensions of cement or cement/polymer compositions can be prepared by mixing cement and mineral components with water in concrete mixers similar to ordinary concrete mortars. Polymer compositions are prepared by mixing two reagents: 'base' and 'hardener', or unsaturated monomer (oligomer) and initiator, which cure according to polycondensation or free radical polymerization mechanisms, respectively.

The selection of the injection process depends on the different types of defects to repair and restorative materials. The pressurization of paste-like suspended cement or cement/polymer compositions in feeders, as opposed to polymer compositions, is impossible due to heterogeneity and the presence of mineral abrasive particles. Therefore, the common methods for concrete mortars, such as screw,

membrane, or piston pumps, are applicable for feeding pastes into cracks or defects. Conversely, high-pressure feeders up to 10-150 atm are common for feeding the prepared polymer compositions into cracks or defects in concrete structures [6], [7].

Preliminary preparation of free accessible building structures for injection repair or restoration work begins with the complete removal of surface and inner layers of "weak" or degraded concrete from areas of cracking, delimitation, or other defects by using mechanical facilities. Such procedure allows removing the weak surface layer and provides high adhesion of polymer to the surface cracks.

The most popular polymer compositions are silicon-organic, polyurethane, poly-epoxy, or poly-acrylate compositions. In case when cracks are wet and case active cracks for restoration work, should be used injection materials that include two-component (polyol-polyisocyanate) polyurethane systems. Only those injection polymer compositions that are able to substitute water in concrete, limestone surfaces and/or chemically fix it with the formation of high-molecular compounds stable over long-term service are preferable in the case of wet cracks. In the case of cracks with dry surfaces, it is possible to use all the other listed injection materials to restore the strength.

An important criterion when choosing injection materials is their adhesion to the main material (stone or concrete), presence of water in cracks and the ratio between the modulus of elasticity. In case of high open cracks use of mixtures of polymer compounds with sand and fiber, should be improved the strength characteristics of structures.

The implementation of polymer materials injection technologies for recovering the strength and increasing the durability of structures built with concrete or limestone has proved to be a high efficiency process [2-7]. The highest positive results corresponded to the case of feeding pressurized epoxy or polyurethane compositions into the depth of profound surface or inner cracks in damaged concrete structures. This conclusion complies with the practical results of many specialists.

Experimental methodology. Samples preparation. In order to determine the mechanical properties of calcareous stone under study, the three point bending test was chose due to its easy implementation and effectiveness. Samples for experimental testing were cute from continuous limestone oval form with dimensions of approximately 60-80-50 cm. In some cases, the preparation of samples was confirm by coincidence material with layers of limestone, but in some cases, the anisotropy on axis orientation was difficult to identify. Two to five prismatic samples with dimensions 6x6x20 cm in length were cute from every stone. The cutting tool and samples are shows in Fig. 1.

As the technology making samples allows for certain deviation, then to take parallel sides of their faces boundary was polished to the desired size using sandpaper of different sizes. Here 60 prismatic samples were produced and tested by the following methodology.

Tension bending tests. The main characteristics of limestone rocks are compressive and tensile strength, Young's modulus, Poisson ratio that are affect by the porosity of the material. In order to establish the influence of the nature of stone on the physical and mechanical characteristics, a modelling of the interaction is necessary to make some experimental and analytical studies. In the present case the mechanical properties were determined by the three point bending scheme according to Standard D790 [8], GOST 10180-90 [9].



Fig. 1. Cutting instrument and samples

To determine the flexural strength of the stone sample carried by the cross section on the line of force application, the maximal load should by transfer according to equation 1:

$$\sigma_b = \frac{3F \cdot L}{2bh^2}, \quad (1)$$

where F is maximal load, L - distance between supports, h and t : the height and width of the sample respectively.

The Young's modulus is determined from the linear part of load-deflection diagrams of samples as indicated by equation 2:

$$E = \frac{1}{4b} \left(\frac{L}{h} \right)^3 \frac{\Delta F}{\Delta l}, \quad (2)$$

where $\Delta F, \Delta l$ indicate the increase of force and increase of deflection respectively on the linear section of the diagram force vs elongation.

Flexural strain. The nominal fractional change in the length of an element of the outer surface of the test specimen at the middle of the length where the maximum strain occurs can be obtained using equation (3) following standard ASTM D-790:

$$\varepsilon = \frac{6lh}{L^2}, \quad (3)$$

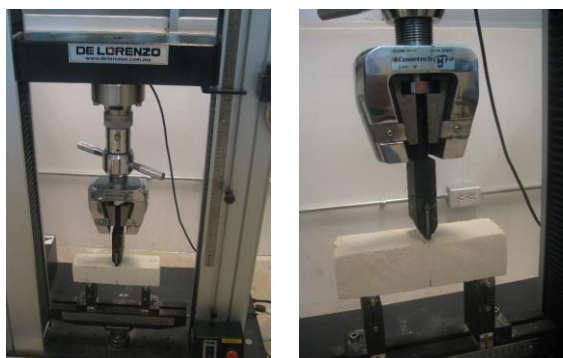


Fig 2. Universal test machine DE LORENZO

here L – deflection under maximal force, other parameters are as described above.

Tensile bending tests were carried out at the Laboratory of Materials Preparation and Characterization of the Engineering and Exact Sciences Division of the Anahuac Mayab University, Merida, Yucatan, Mexico using the universal test machine DE LORENZO. The test results (the deflection and load) as a graphic file and the results was recorded using QcTechB program support.

Three point bending test. More than 60 prismatic samples prepared from 17 calcareous stones were subjected to three point bending test. The load

was applied to samples at a speed of 0.5 mm/min.

After first three point bending tests the samples were divided into two groups depending on the type of polymer used for joining the two halves of broken samples. A number of samples were joined using **epoxy mortar ResiFija MPY-2733** and were identified as group EM. The second group of samples were joined using a **polyester resin** and was identified as group PR. The polymerization of epoxy mortar involved the use of 0.03 Vol% of hardener whereas for polyester resin a 0.02 Vol% of hardener was used. The room temperature during preparation of polymer mixtures was $29 \pm 2^\circ\text{C}$. Samples 1, 3, 6-8, 13-15, 23 composed group PR. Group EM was composed by samples 2, 5, 12, 16-18, 21 and 22.

Research results. The result of analysis is presented in the table 1 for group PR and in table 2 for group EM.

The results indicated that the calcareous set of rocks studied have different mechanical behaviour due to their inherent anisotropy which induced also different damage and as a result great variation of strength within each set of samples. The results of samples with form ratio $L/h=5$ subjected to three point bending test are listed at the table 3.

Table 1

Values from three point bending tests of samples in group PR

№ of example	Flexural strength H/mm ²	Young module. MPa	Flexural strain	After injection		
				Flexural strength H/mm ²	Young module. MPa	Flexural strain
1.1	-	-	-	-	-	-
1.2	3.911	-	-	5.44	322	0.015
1.3	3.36	294	0.011	3.97	254	0.013
1.4c	-	-	-	4.13	807	0.0054
1.5	3.53	259	0.013	2.84	319	0.009
3.1	3.43	449	0.0098	4.4	459	0.0098

3.2	4.71	703	0.0068	5.14	328	0.015
6.1	7.586			6.26	824	0.0091
6.2	-			4.58	57	0.0095
6.3	3.27	632	0.0062	3.23	690	0.0059
6.4	3.52			3.75	515	0.0086
6.5c	-	-	-	3.23	811	0.0047
6.6c	-	-	-	5.31	791	0.007
7.1c	-	-	-	4.12	702	0.0083
7.2c	-	-	-	9.09	1868	0.0057
7.3	2.16	1571	0.0016	6.19	1632	0.0043
7.4	3.07	962	0.0035	6.72	1510	0.0049
8.1	1.7	442	0.0044	-	-	-
8.2c	-	-	-	5.41	618	0.0098
8.3	8.31	782	0.02	9.73	554	0.012
8.4	8.95	1152	0.0074	8.38	1183	0.0073
8.5	0.41	-	-	6.73	970	0.007
13.1c	-	-	-	5.82	808	0.0088
13.2c	-	-	-	6.26	455	0.016
13.3	5.31	852	0.0081	4.82	801	0.0071
13.4c	-	-	-	5.28	676	0.0094
13.5	6.69	487	0.015	2.07	479	0.0054
14.1	5.16	-	-	5.84	946	0.0065
15.1	2.85	720	0.0052	3.6	820	0.0057
15.2c	-	-	-	2.39	329	0.007
15.4c	-	-	-	1.34	403	0.0036
23.1	4.62	783	0.0065	2.44	459	0.0055
23.2	7.12	-	-	3.85	609	0.007
23.3c	3.71	635	0.0062	6.26	821	0.0089

Table 2

Values from three point bending tests of samples in group EM

№ of example	Flexural strength H/mm ²	Young module, MPa	Flexural strain	After injection		
				Flexural strength H/mm ²	Young module, MPa	Flexural strain
2.1c	-	-	-	3,72	960	0,004
2.2c	-	-	-	6,07	1186	0,0057
2.3c	-	-	-	7,08	1308	0,0058
2.4	5,78	984	0,006	7,74	925	0,0096
2.5	4,71	1364	0,004	5,83	1057	0,0065
2.6	8,26	1411	0,006	7,56	1682	0,0053
2.7	6,37	1325	0,0052	6,6	1005	0,0077
5.1c	-	-	-	8,72	1041	0,0098
5.2	3,36	587	0,0081	7,64	692	0,012
5.3	1,18	278	0,004	6,94	719	0,01
12.1	2,93	321	-	2,34	321	0,008
12.2	4,28	480	0,0094	3,5	355	0,0096
12.3c	-	-	-	1,59	399	0,0041
12.4	2,34	235	0,011	1,98	229	0,009
12.5c	-	-	-	1,84	320	0,0056
16.1	2,78	632	0,0054	4,29	815	0,0061
16.2	5,62	-	-	-	-	-
16.3c	-	-	-	7,52	967	0,0081
17.1c	-	-	-	7,05	876	0,0083
17.2c	-	-	-	5,43	778	0,0098
17.3	2,55	611	0,0049	3,43	601	0,0064
17.4	3,53	528	0,0071	4,0	940	0,0048
18.1c	-	-	-	1,12	286	0,0043
18.2	2,00	477	0,0057	1,83	170	0,011
18.3	-	-	-	1,79	453	0,0044

18.4	-	-	-	0,74	163	0,004
21.1c	-	-	-	3,55	742	0,0055
21.2	7,09	667	0,012	-	-	-
21.3	6,55	239	0,020	6,27	679	0,01
22.1c	-	-	-	6,43	1539	0,005
22.2	5,62	761	0,008	7,89	898	0,009
22.3c	-	-	-	10,47	1033	0,01
22.4c	-	-	-	8,74	1008	0,01

Table 3

Result testing the samples without glued crack by proportion $L/h = 5$

№ of example	Flexural strength H/mm ²	Young module, MPa	Flexural strain
1	7,25	6233	0,0013
2	7,34	5705	0,0014
3	5,15	4785	0,001
4	4,48	4315	0,0012
5	4,91	1970	0,0025

Porosity and density of such samples are similar to the sample 23 series, but for samples ($L/h = 5$) the Young's modulus obtained was around 4-6 GPa and low strain (~0.001). The results of three point bending test applied to samples before and after the polymer injection were displayed as flexural strength – strain diagram as shown by fig. 3.

It was observed that the application of epoxy and polyester resin restore the strength of the joined samples at 100%. Some cases showing less strength after injection were observed which could be associated to the presence of different kind of voids, internal cracks and irregularities in the calcareous stone samples.

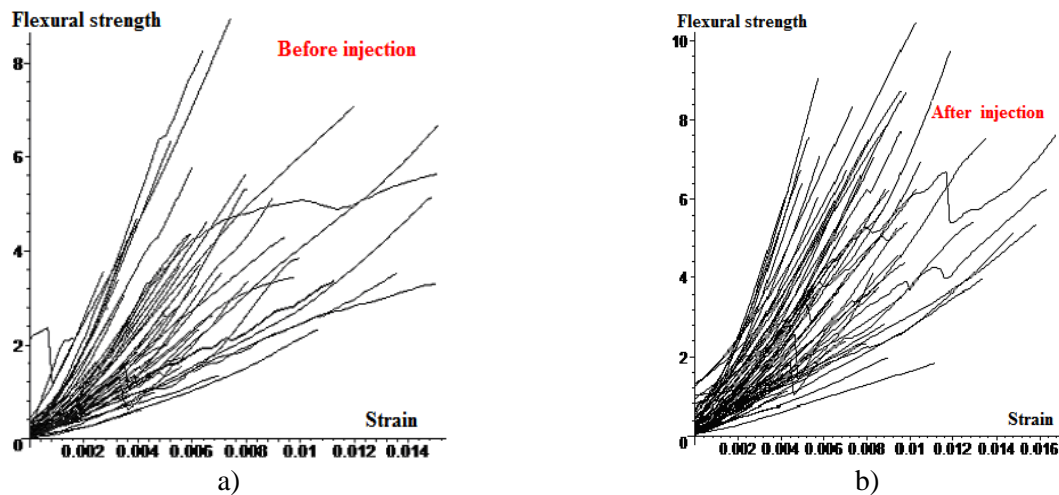


Fig 3. Strain diagram calcareous rock before (a) and after injection (b).

The results of study show that both injection polymer materials (polyester and epoxy mortar) present excellent performance as restoration agents in calcareous stones when broken samples were joined by the polymer materials and subjected to three point bending test. Most of the samples tested after joining presented an increase of the limit load for fracture. In all cases, the crack and fracture of samples took place at positions adjacent to the polymer-bonded zone near to line of load application as shown by fig. 4 and fig. 5. The examination of the fractured samples after the three point bending test indicated that no cracks developed and propagate along the polymer-joining plane. Only in few samples cracks developed crossing the joined plane under small angle.



Fig. 4. Polymer-joined samples broken by three point bending test

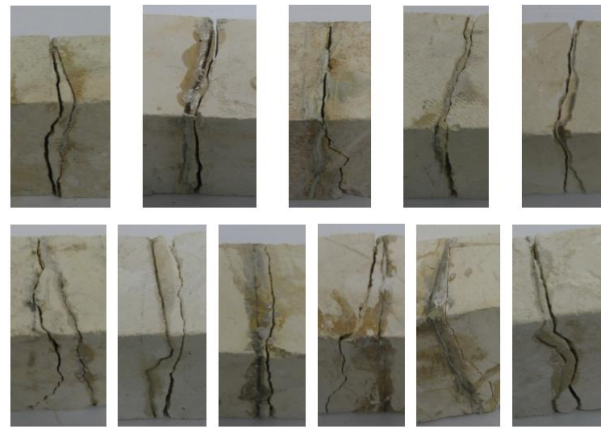


Fig. 5. Ragged line of fracture samples with low density.

This result showed satisfactory adhesive properties of polyester and epoxy resins in a rough calcareous rock surface and consequently the possibility of application as injection materials for reconstruction the strength of pre-Spanish damaged buildings and monuments of the Mayan culture and colonial buildings of the main square of San Francisco de Campeche city.

Fracture toughness For determination the fracture toughness K_{IC} the three point bending loading test was used on the prismatic specimens according to GOST 29167-1 [10]. Crack like stress concentrators of 2 mm width and 10 mm depth were inflicted on one the rectangular sides of the calcareous rock samples. The fracture toughness K_{IC} was determined according to equation 4:

$$K_{IC} = \frac{3FL}{2bh\sqrt{h}} \lambda f(\lambda), \tag{4}$$

$$f(\lambda) = 1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,84\lambda^4,$$

where the crack depth ratio $\lambda = L/h$ was taken equal 1/6 for all samples series.

The values of crack growth resistance determined using previous equation are given in the table 4.

Table 4

Values of fracture toughness K_{IC} for calcareous rock samples

№ of sample	Fracture toughness $MPa\sqrt{m}$	№ of sample	Fracture toughness $MPa\sqrt{m}$	№ of sample	№ of sample
1.1 c	0.103	8.2 c	0.756	17.1 c	0.635
1.4 c	0.403	12.3 c	0.297	17.2 c	0.455
2.1 c	0.482	12.5 c	0.327	18.1 c	0.172
2.2 c	0.584	13.1 c	0.267	21.1 c	0.437
2.3 c	0.58	13.2 c	0.662	22.1 c	0.444
5.1 c	0.882	13.4 c	0.455	22.3 c	0.624
6.5 c	0.421	15.2 c	0.233	22.4 c	0.754
6.6 c	0.571	15.4 c	0.274	23.3 c	0.641
7.1 c	0.728	16.3 c	0.319		
7.2 c	0.539				

The experimental results showed that the samples of series 2, 5, 6, 7, 8, 17, 21, 22, 23 presented higher fracture toughness compared to other samples series and the K_{IC} values were in the range from 0.45 to $0.85 MPa\sqrt{m}$.

For the above-mentioned samples series the fracture took place exactly in the plane of load application. On the other hand, samples of the series 1 and 18 presented low level of fracture toughness from 0.1 to $0.2 MPa\sqrt{m}$ and the fracture took place outside the plane of load application as shown by Fig. 6. This behaviour is associated with low and high depth internal cracks and porous zones formed by material stratification. However, it could be suggested that the limestone is not sensitive to damage such

as small notches or cleaved ribs of samples grains. Overall, the obtained expected results correlate well with research work about limestone behaviour.



Fig. 6. Three point bending test of samples joined with epoxy mortar.

bending strength of the material.

- Polyester and epoxy resins show high adhesion characteristics. Repeated testing showed that after injecting polymer material new crack was distributed outside injection surface for all series of material. This means that investigated injection materials in fully degree can restored the strength of the damaged calcareous stones.

- It is recommend the use of these polymer systems (poliester resin and epoxy mortar) for the recovery of load capacity and durability of damaged buildings manufactured with calcareous stones.

1. González-Sánchez J., Corvo F. & Acuña-González N. (eds.) Corrosion and degradation of infrastructure in Yucatan Peninsula // Environmental Degradation of Infrastructure and Cultural Heritage in Coastal Tropical Climate, Campeche, Transworld Research Network, – 2009. – P.1-34. 2. Panasyuk V.V., Sylovanyuk V.P., Marukha V.I. Strength of structure elements damaged by cracks and healed using injection technologies. // Phys Chem Mech Mater № 6. – 2005. – p. 60–64. 3. Marukha V.I., Serednitskiy Y.A., Gnip I.P., Sylovanyuk V.P. Development of injection technologies and design of mobile equipment for diagnostics and serviceability restoration of concrete or reinforced concrete structures operating under stress-corrosive conditions // Sci Innov, № 3. – 2007. – p. 55–62. 4. Sylovanyuk V.P., Marukha V.I., Genega B.Y., Ivantiskhin N.A. Fracture mechanics as the base of densification injection technology in rehabilitation of long-term objects // Mekhanika i fizika ruynuvannya budivel'nikh materialiv i konstrukciy (Mechanics and physics of fracture for building materials and structures), № 5. Kamenyar, L'viv, – 2002. – p. 373–382. 5. Marukha V.I., Panasyuk V.V., Sylovanyuk V.P. Injection technologies of damaged long-term operation structures renewal // Fracture mechanics and strength of materials: Reference book / Editor-in-Chief V.V. Panasyuk. V. 12. – Lviv: PH "Spolom", 2009. – 262 p. 6. Marukha A., Genega B., Serednitskiy Y., Zaplatins'kiy M. Concrete structure protection against stress corrosion using polyurethane injection compositions // Phys Chem Mech Mater № 5. – 2006. – p. 834–840. 7. Marukha V.I., Genega B.Y. Consolidation technologies for strengthening and repairing re inforced concrete structure // Diagnostics, durability, and rehabilitation of bridges and building structures). № 4. Kamenyar, L'viv, – 2001. – p. 158–161. 8. D 790–03. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. 9. USSR Standard GOST 10180-90 (1990) Concretes: methods for strength determination using control specimens. 10. USSR Standard GOST 29167-91 (1991) Concretes: methods for determining fracture toughness under static loading. 11. Allen R.T.L., Edwards S.C., Shaw J.D.N. The repair of concrete structures. II Edition. SRC Press. – 1993. – 212 p.

Acknowledgements: Authors would like to thanks the Program for Academics Improvement of the Public Education Secretariat, Mexican Government (SEP-PROMEP), for the postdoctoral scholarship given to Dr. Roman Iukhym.

Authors also thank to Professor José Antonio Anaya S., Director of the Engineering and Exact Sciences Faculty of the Anahuac Mayab University for the permission to use all the facilities of the Materials Preparation and Characterization laboratory. A special thanks to Ing. Jazmin Sabido, Lecturer of the same Institution, for all her technical support and guidance during the experimental tests.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2016

УДК: 656.072

П.Ф. Горбачев, Е.В. Любый, Акбар Джан Полад*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет***К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЁМКОСТИ ВЫСШИХ ТРАНСПОРТНЫХ РАЙОНОВ
ПО ПРИБЫТИЮ И ОТПРАВЛЕНИЮ ПАССАЖИРОВ**

В статье рассматривается подход к определению емкостей высших транспортных районов по отправлению и прибытию пассажиров, который учитывает величину транзитных пассажирских потоков, следующих через высшие транспортные районы. Предложенный подход построен на использовании теоретических основ функций расселения населения в городах. Использование данного подхода позволяет с достаточной степенью точности получить модель транспортного спроса на перемещение городского населения пассажирским транспортом.

Ключевые слова: функция расселения населения, высший транспортный район, емкость по отправлению и прибытию пассажиров, городской пассажирский транспорт, транзитный пассажиропоток.

П.Ф. Горбачев, Е.В. Любый, Акбар Джан Полад**ЩОДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІСТКОСТІ ВИЩИХ ТРАНСПОРТНИХ РАЙОНІВ З
ПРИБУТТЯ ТА ВІДПРАВЛЕННЯ ПАСАЖИРІВ**

У статті розглядається підхід щодо визначення місткостей вищих транспортних районів з відправлення та прибуття пасажирів, який враховує величину транзитних пасажирських потоків, що прямують через вищі транспортні райони. Запропонований підхід побудований на використанні теоретичних основ функцій розселення населення в містах. Використання даного підходу дозволяє з достатнім ступенем точності отримати модель транспортного попиту на переміщення міського населення пасажирським транспортом.

Ключові слова: функція розселення населення, вищий транспортний район, місткість з відправлення та прибуття пасажирів, міський пасажирський транспорт, транзитний пасажиропотік.

P.F. Horbachov, E.V. Liubyi, Akbar Jan Polad**DEFINITION OF THE CAPACITY OF MAIN ZONES ON THE DEPARTURE AND ARRIVAL
OF PASSENGERS**

The article deals with an approach to the definition of the capacity of main zones on the departure and arrival of passengers, which takes into account the value of transit passenger flows through the following of main zones. The proposed approach is based on the use of theoretical bases of population settlement functions in cities. The developed approach has several disadvantages: firstly, the need for proper, high-quality, skilled division of the territory of the of main zones, which is an example of Kabul city rather difficult to make due to the significant size of the object of research; secondly, the need for accurate and objective information on the number and locations of items passengers' gravity.

Keywords: function of population distribution, the main zones, the capacity of departure and arrival passengers, urban passenger transport, transit passengers flow.

Постановка проблемы. Моделирование потребностей населения в передвижениях является наиболее ответственной задачей из всех этапов решения проблемы повышения эффективности функционирования городского пассажирского транспорта (ГПТ). Это обуславливается сложным двумерным характером модели, для которой в настоящее время не существует четких критериев качества, а также ее высокой значимостью для надежности результатов решения задачи определения потребностей населения в передвижениях [1, 2]. Чаще всего потребности населения в передвижениях представляются в виде квадратной матрицы пассажирских корреспонденций (МПК). Под пассажирской корреспонденцией понимают «доставку пассажиров к месту назначения» [3]. Следует понимать, что корреспонденции, которые собраны в МПК, имеют несколько иной характер – в каждой ячейке матрицы содержится количество потенциальных передвижений из района i в район j [4]. Получение объективной и точной МПК для рассматриваемого периода и объекта исследования является главной задачей этапа моделирования потребностей населения в передвижениях. Поэтому разработка новых подходов формирования МПК, которые с достаточной степенью точности отражали бы реальную картину перевозочного процесса пассажиров в городах, является актуальным вопросом для науки и практики.

Анализ последних исследований и публикаций. В научной и практической литературе выделяют два основных, но кардинально разных подхода к формированию МПК. Первый заключается в проведении натурных обследований передвижений пассажиров [2, 4-6]. Преимуществом использования такого подхода является получение максимально достоверных результатов обследования. Основными же недостатками этого подхода являются достаточно

высокая трудоемкость и ограниченность сегмента, для которого поступает информация, чаще всего это данные о потребностях населения в трудовых передвижениях. Необходимо отметить, что проведение таких обследований в настоящее время является маловероятным, в связи с ограниченными возможностями законодательной базы страны. Это связано с наличием административного ресурса, характерного для плановой экономики.

Второй подход формирования МПК заключается в использовании различных гравитационных моделей расселения [7, 8] или энтропийных моделей [9 - 12], в основу которых положены гипотезы о схожести транспортной системы города с термодинамическими процессами. Использование такого подхода имеет значительно меньшую трудоемкость формирования МПК, но, в свою очередь, не позволяет получить достаточно точных результатов. Разница между теоретическими и реальными значениями при прогнозировании объема корреспонденций может превышать 200 % [2, 4, 13]

Очевидным преимуществом гравитационных моделей является простота их реализации, а одним из главных недостатков – не учитывают индивидуальные предпочтения населения при осуществлении передвижений.

Преимуществами энтропийных моделей является то, что в них вместо средних величин характеристик передвижения вводятся условия об априорных предпочтениях формирования транспортных пар районов и, которые формируют более близкие варианты (по вероятности распределения корреспонденций) к реальной транспортной системе, которая формируется с учетом предпочтений пассажиров. Недостатком же таких моделей, как и для всех синтетических, является низкая точность расчетов.

Другой важный класс синтетических моделей составляют различные модификации модели промежуточных возможностей Стоуффера [14]. В модель Стоуффера заложено предположение, что объем корреспонденции между двумя центрами определяется не столько расстоянием между ними, сколько количеством и емкостью альтернативных центров прибытия на пути, который соединяет центры, т. е. количеством альтернативных возможностей посещения.

Основное отличие моделей гравитационного типа и моделей промежуточных возможностей состоит в том, что гравитационные модели основаны на расчете транспортной доступности центров прибытия, которые рассматриваются преимущественно изолированно от альтернативных центров, а модели промежуточных возможностей учитывают взаимное расположение альтернативных возможностей прибытия и не используют показатель транспортной доступности.

Описанные синтетические модели касаются только этапа распределения корреспонденций между парами транспортных районов (ТР). Выделенные недостатки подтолкнули к попытке перехода от синтетических методик формирования МПК к использованию моделей дискретного выбора для распределения корреспонденций между парами ТР [15]. Но возможности моделей дискретного выбора для решения подобного вопроса подвергаются серьезной критике в работе [16]. Автор этой работы утверждает, что MNL модель, которая часто используется в транспортном планировании, с ее типичной экспоненциальной функцией оценки, не соответствует человеческому поведению при малых затратах, поскольку вероятность положительной оценки малых затрат минимальна. Приведенная в работе функция EVA, предназначенная для оценки матриц корреспонденций, базируется на дифференцированном определении причин передвижений и устраняет этот недостаток MNL модели [4]. Предложенные автором зависимости имеют априорный характер и предназначены только для повышения гибкости инструментов транспортного планирования. Они не лишены основных недостатков всех описанных выше подходов для моделирования МПК, а именно использование транспортных факторов как таковых, что основным образом определяют выбор пары «источник – цель» и отсутствие непосредственной оценки результатов моделирования.

Следует понимать, что при формировании МПК основной альтернативой натурным наблюдениям являются синтетические модели формирования матриц корреспонденций. Но их корректное использование возможно только в том случае, когда существуют предпосылки оценки их качества. Характерной чертой существующих методов получения матрицы корреспонденций является то, что они основаны на поисках закономерностей в выборе пары «жилье – работа», существование которых основано на законе больших чисел и соблюдение которого возможно только для крупных и крупнейших городов. Кроме того, реализация этих методов требует серьезных трудовых и материальных затрат, что является важным препятствием на пути их реализации [2].

Необходимо отметить, что процесс моделирования МПК имеет сложный и трудоемкий характер. Основные подходы к формированию МПК, а именно формирование матрицы корреспонденций на основе проведения натуральных наблюдений и моделирования матрицы с использованием синтетических моделей, имеют ряд значительных недостатков. Для первой группы это потребность в значительных затратах трудовых и временных ресурсов на их реализацию, а для второй – значительные разбежности между реальными и расчетными значениями корреспонденций.

Принято считать, что полученные с помощью натуральных наблюдений МПК являются реальным отображением потребностей населения в передвижениях на период проведения обследования. Но результаты обследований значительно теряют свою актуальность на момент реализации управленческих решений, которые производятся с помощью натурной МПК, поскольку характеризуются значительным промежутком времени между началом обследования и получением результатов. Из этого следует, что для получения МПК, которая отображала бы период реализации управленческих решений, необходимым является использование синтетических моделей формирования МПК, реальная проверка которых возможна только при наличии специальных методов оценки точности матриц [4].

Необходимо понимать, что в настоящее время учеными и специалистами в области транспортного планирования не ставится задача получения точного значения корреспонденции в матрице, поскольку проверить расхождение расчетной и фактической МПК невозможно, из-за отсутствия последней. Это можно подтвердить цитатой из Инструкции по определению пропускной способности дорог Вашингтонского Национального исследовательского совета: «Цель оценивания состоит не в определении точной матрицы корреспонденций, а в нахождении таковой, которая достаточно близка к ней и соответствует данным интенсивности движения» [17].

Вопросам разработки моделей восстановления матриц корреспонденций наибольшее внимание уделяют зарубежные ученые, в исследованиях преимущественно встречаются робастные модели оценки точности матриц корреспонденций [18].

На постсоветском пространстве исследования в области восстановления матриц корреспонденций проводились преимущественно для маршрутов общественного транспорта [19].

В настоящее время методы восстановления матриц корреспонденций, в основном, используются для решения только локальных задач при исследованиях интенсивностей транспортных потоков на улично-дорожной сети. При исследованиях функционирования системы ГПТ они практически не используются. В основном, при решении подобных вопросов используются синтетические модели, основанные на гипотезах относительно закономерностей формирования корреспонденций. Среди таких моделей наиболее распространенными являются гравитационная и энтропийная модель.

Более перспективным представляется другой оценочный подход, который базируется на непосредственном учете случайного характера фактического состояния потребностей населения в передвижениях. Поиск именно такого состояния матрицы весьма сложен. При этом следует также учитывать и тот факт, что проверить его на подлинность также невозможно при отсутствии фактической матрицы, а это условие выполняется всегда, иначе нет смысла в расчете корреспонденций. В этих условиях, при принятии решений относительно вариантов развития маршрутной сети города, следует использовать один вариант МПК, а границы интервала возможных значений матрицы при заданных емкостях ТР. Такая концепция позволяет получить достоверные интервальные оценки показателей функционирования ГПТ, которые используются в качестве критериев эффективности маршрутной системы [4].

В рамках этой концепции границы интервала возможных значений ГПТ определяются экстремальными вариантами матрицы, минимизирующими и максимизирующими основной показатель, характеризующий ее состояние. С использованием этого подхода также можно проводить дополнительную оценку эффективности функционирования ГПТ на основе отдельных вариантов МПК внутри этого интервала, но для этого необходима разработка методики их получения [6]. Возможным вариантом таких методик является использование известных синтетических методов моделирования потребностей населения в передвижениях [2]. Для реализации такого подхода необходимо определить основную характеристику состояний МПК, оказывающую наиболее существенное влияние на показатели качества функционирования ГПТ и позволяющую оценивать различия между разными вариантами матрицы.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что основные методы моделирования МПК базируются на использовании общегородских территориальных

характеристик для получения емкостей ТР и последующем распределении этих емкостей между корреспонденциями на основе априорных гипотез, основанных на большом количестве участников транспортного процесса. Одним из основных недостатков наиболее распространенных синтетических моделей является отсутствие единых методик расчета корреспонденций и неспособность имеющихся методик обеспечить соответствие расчетных МПК начальным емкостям ТР. Такой недостаток исключает возможность оценки точности расчетной МПК.

Постановка задачи. Целью данного исследования является разработка подхода к определению емкостей по отправлению и прибытию пассажиров территориальных объектов (зон), которые будут использованы для моделирования МПК г. Кабул. Необходимо отметить, что формирование точной и объективной модели транспортного спроса на передвижения населения г. Кабул пассажирским транспортом является сложным и многоэтапным процессом, основными из которых являются: формирование высших (укрупненных) транспортных районов (ВТР) и определение их емкостей по отправлению и прибытию пассажиров; выделение ТР из ВТР и расчет их характеристик; расчет пассажирских корреспонденций на основании гравитационной модели.

Под ВТР следует понимать территориальную единицу, которая объединяет в себе несколько ТР. Площадь г. Кабул имеет значительные размеры, более 300 км², что существенно увеличивает масштаб и трудоемкость проведения обследования пассажиропотоков на участках маршрутной сети ГПТ, потому формирование и расчет характеристик ВТР для разработки модели спроса на передвижения населения г. Кабул пассажирским транспортом является необходимым и даже обязательным этапом [3]. На примере г. Кабул в качестве основных критериев выделения ТР из ВТР могут быть использованы: плотность населения, тип застройки, плотность мест приложения труда, количество занятого населения и др. Также необходимо принимать во внимание возможности программных продуктов по транспортному планированию.

Изложение основного материала. Одной из проблем формирования МПК является получение точной и объективной информации для моделирования емкостей ВТР по отправлению и прибытию пассажиров. Выделяя на первом этапе моделирования МПК ВТР появляется возможность уменьшения затрат различных ресурсов на проведение обследования пассажиропотоков. Этого можно добиться за счет минимизации количества мест проведения наблюдений, а не за счет исключения из обследования некоторого числа магистральных улиц, по которым проходят трассы маршрутов ГПТ, т.е., за счет минимизации количества транспортных связей при моделировании ВТР. Также следует отметить, что для выделения границ ВТР целесообразно использовать рекомендации [20-25]. Завершающей стадией моделирования ВТР является определение их емкостей по отправлению и прибытию пассажиров из (в) них. В рамках данного исследования предлагается определять емкости ВТР по отправлению и прибытию на основании функции расселения населения относительно территории города [26, 27], а также результатов натурного исследования пассажиропотоков.

Следует отметить, что одной из основных проблем при использовании представленного подхода к расчету емкостей ВТР по отправлению и прибытию пассажиров, является определение размеров транзитного пассажиропотока. В настоящее время уже существуют подходы, способы и методики определения транзитных потоков в различных транспортных системах, но они, в своем большинстве, применяются для решения задач связанных с эффективностью организации движения транспортных потоков. Их применение на примере пассажирских потоков является весьма трудоемким и дорогостоящим, поскольку появляется необходимость приобретения дополнительной техники и привлечения еще большего количества учетчиков. Все это существенно влияет на качество и точность получаемой информации.

В рамках данного исследования, транзитным пассажиропотоком ВТР называется количество пассажиров, которые реализуют свои потребности за счет передвижения от пункта опрвления до пункта назначения, используя транспорт, с обязательным пересечением границ ВТР, за определенный промежуток времени. Для того чтобы разобраться в сущности самого понятия транзитного пассажиропотока, необходимо проанализировать причины его появления. Итак, транзитные пассажиропотоки могут появиться вследствие следующих основных причин: отсутствие прямой транспортной связи, по которой пассажир мог бы добраться от места отправления к месту назначения, не пересекая при этом границ определенного ВТР; необходимости пассажира в передвижении к месту приложения труда или жительства, добраться к которым возможно лишь только при пересечении границ определенного ВТР.

Итак, предположим, что для города Кабул известна функция расселения населения, при этом кривая имеет вид закона распределения Эрланга с параметром формы равным 4 [26, 27] (рис. 1).

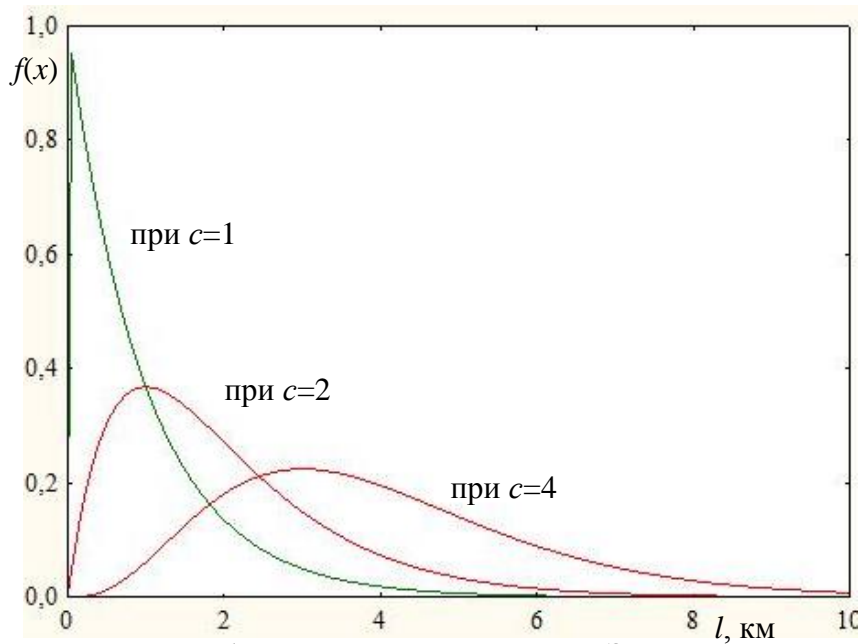


Рис. 1. Плотность распределения Эрланга

Функция распределения Эрланга определяется как [28]

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \sum_{i=0}^{c-1} \frac{(\lambda x)^i}{i!}, \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{1}{b}$, b - параметр масштаба (среднее значение); x - значение случайной величины; c - параметр формы (целое положительное число).

В свою очередь, плотность распределения Эрланга составляет [28]

$$f(x) = \frac{\lambda(\lambda x)^{c-1}}{(c-1)!} e^{-\lambda x}. \quad (2)$$

Также предположим, что по результатам обследования известны величины пассажирских потоков, входящих в ВТР и выходящих из них. Входы и выходы должны быть представлены так, чтобы в один общий вход или выход объединялись отдельные входы-выходы, транзит по которым через ВТР невозможен, а количество общих входов-выходов в ВТР было четным. Тогда каждая пара общих входов-выходов представляет собой направление транзитных перемещений через ВТР (рис. 2).

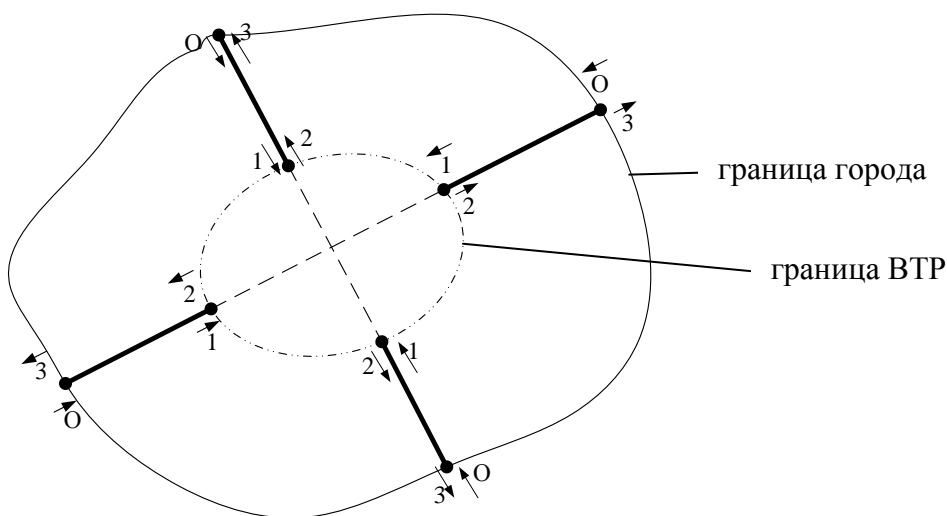


Рис. 2. Графическая интерпретация определения транзитных потоков

Условные обозначения: 1, 2 – отдельные входы-выходы в (из) ВТР; О – общий вход-выход в (из) ВТР; 3 – выход, транзит через который невозможен; — направление движения пассажиропотока.

При этом каждая пара общих входов-выходов порождает два направления «вход – выход», для которых на основе функции расселения населения существует возможность определить вероятность транзита как

$$1 - P_3, \quad (3)$$

где P_3 - вероятность окончания поездки в ВТР.

Вероятность того, что пассажиры закончат поездку в ВТР определяется следующим образом

$$P_3 = \int_{l_1}^{l_2} f(l) dl, \quad (4)$$

где l_1, l_2 - расстояние от выхода, транзит через который невозможен до точки входа и выхода в (из) ВТР (рис. 3), км.

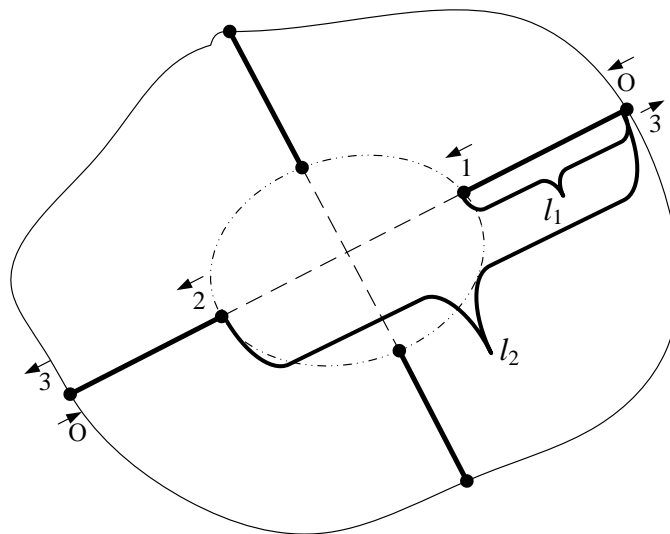


Рис. 3. Определение расстояний l_1, l_2

Графическая интерпретация определения вероятности окончания поездки в ВТР приведена на рис. 4.

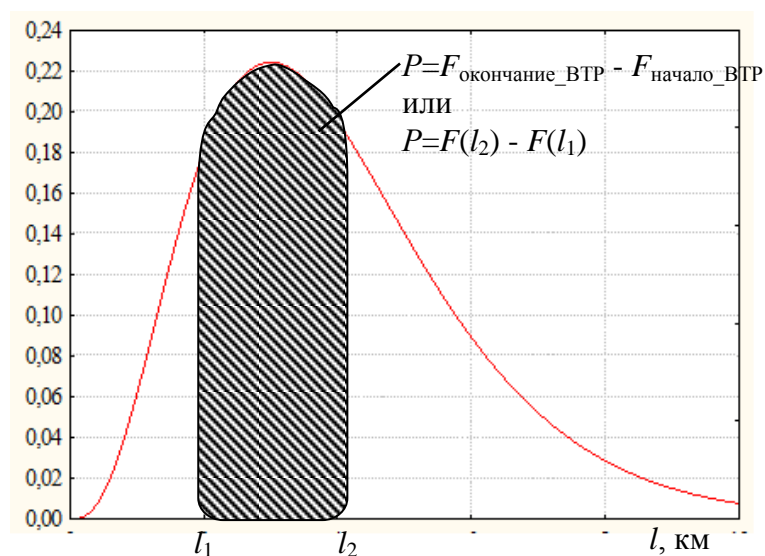


Рис. 4. Графическая интерпретация определения вероятности окончания поездки в ВТР

Следует заметить, что количество пассажиров, следующих транзитом, не входят в будущие емкости ВТР по отправлению и прибытию.

Емкость ВТР по прибытию является суммой всех пассажиров, которые заканчивают поездку в нем

$$A_{\text{втр}} = \sum_k^{2 \cdot n_{\text{овв}}} F_{\text{вх}_k} \cdot P_{3_k} + A_{\text{вм}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{вх}_k}$ - входящий поток по k -му направлению, пасс.; $A_{\text{вм}}$ - количество пассажиров, которые начинают и заканчивают поездку в данном ВТР, пасс.; $n_{\text{овв}}$ - количество общих входов – выходов для ВТР; 2 – количество направлений.

В свою очередь, количество пассажиров, которые начинают и заканчивают поездку в данном ВТР определяется следующим образом

$$A_{\text{вн}} = \sum_{k=1}^n F_{\text{исх}_k} \cdot P_{\text{втр}_k}, \quad (6)$$

где $F_{\text{исх}_k}$ - суммарный исходящий поток по k -му направлению, пасс.; $P_{\text{втр}_k}$ - вероятность того, что поездка, начавшаяся в данном ВТР, в нем же и закончится.

В общем случае вероятность того, что поездка, начавшаяся в ВТР, в нем же и закончится, определяется как

$$P_{\text{втр}} = \int_0^{l_2-l_1} f(l) dl, \quad (7)$$

где $l_2 - l_1$ - протяженность ВТР по направлению, км.

При этом

$$A_{\text{вн}} = D_{\text{вн}}, \quad (8)$$

а емкость ВТР по отправлению будет рассчитываться следующим образом

$$D_{\text{втр}} = \sum_k^{2 \cdot n_{\text{овв}}} F_{\text{исх}_k} - F_{\text{вх}_k} \cdot (1 - P_{3_k}) + D_{\text{вн}}. \quad (9)$$

Следует отметить, что количества ВТР недостаточно для расчета МПК, так как необходимо более детальное описание спроса на передвижения населения ГПГ. В связи с этим данные о количествах отправляющихся (прибывающих) пассажиров из (в) ВТР необходимо локально распределить между выделенными ТР ВТР.

Выводы. Разработанный подход позволяет определить емкости ВТР по отправлению и прибытию пассажиров с учетом величины транзитного пассажиропотока. Однако данный подход имеет ряд недостатков: во-первых, необходимость правильного, качественного, квалифицированного разделения территории города на ВТР, что на примере г. Кабул сделать достаточно затруднительно в связи со значительными размерами объекта исследования; во-вторых, необходимость точной и объективной информации о количестве и местах дислокации пунктов тяготения пассажиров (места приложения труда и места проживания).

Список использованных источников:

1. Горбачов П.Ф. Сучасні наукові підходи до організації роботи маршрутного пасажирського транспорту в містах : монографія / П.Ф. Горбачов. – Харків: ХНАДУ, 2009. – 196 с.
2. Горбачов П.Ф. Моделивання попиту на перевезення населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : монографія / П.Ф. Горбачов, Є.В. Любий. – Харків : ХНАДУ, 2014. – 134 с.
3. Пасажирські автомобільні перевезення. Терміни та визначення : Державний стандарт України (ДСТУ 2610-94) / Держстандарт України, 1994. – 28 с.
4. Горбачов П. Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.01 / Петро Федорович Горбачов. - Х., 2009. – 370 с.
5. Горбачев П. Ф. Совершенствование схем маршрутов автобусов в крупнейших городах : дис. ... канд. техн. наук / Горбачев Петр Федорович. - Харьков. 1993. - 164 с.
6. Россолов О. В. Удосконалення інтервальної концепції визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в великих містах [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 «Транспортні системи» / О. В. Россолов. - Х., 2012. - 20 с.
7. Брайловский Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. - М. : Транспорт, 1978. - 125 с., Самойлов Д. С. Исследование методов расчета пассажиропотоков на городском транспорте. - В кн. : Инженерные проблемы градостроительства и прикладная геометрия в архитектурно-строительном проектировании : Сб. трудов МИСИ. - М, 1977. - 149. - С. 3-12.
8. Брайловский Н. О. Проблемы повышения эффективности функционирования транспортных сетей городов : дис. ... доктора техн. наук : спец. 05.22.10 / Брайловский Н. О. - М, 1981. - 327 с.
9. Булычева Н. В. Расчет пассажиропотоков и оптимизация

параметров маршрутных схем. - В кн. : Математические методы в управлении городскими транспортными системами / Н. В. Булычева, В. П. Федоров. - Л. : Институт социально-экономических проблем, 1979. - С. 65-90.

10. Демирчян С. К. Разработка и исследование моделей транспортных систем с ограниченной пропускной способностью : дис. ... канд. техн. наук / Демирчян С. К. - М., - 1985. - 129 с.

11. Лившиц В. В. Системная концепция города и математическое моделирование адаптационного поведения городского населения / Лившиц В. В. - В кн. : Использование прикладного системного анализа в проектировании и управлении развитием городов. М. : Стройиздат, 1974. - С. 120-147.

12. Федоров В. П. Математическая модель расчета пассажиропотоков в маршрутной сети города / Федоров В. П. - В кн. : Город и пассажир. Градостроительные проблемы развития пассажирского транспорта : Тезисы докладов к III Ленинградской научной конференции, Л. : Стройиздат, 1975. - С. 63-70.

13. Грановский Б. И. Моделирование пассажирских потоков в транспортных системах : Автомобильный и городской транспорт (Итоги науки и техники). Грановский Б. И. - М. : ВИНТИ, 1986. - 67 - 105 с.

14. Stouffer S. A. Intervening opportunities: a theory relating mobility and distance / S. A. Stouffer // *American Sociological Review*. 1940. V. 5. P. 845-867.

15. Ortuzar J. D. Modelling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. - Third Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2006. - P. 499.

16. Лозе Д. Моделирование транспортного предложения и спроса на транспорт для пассажирского и служебного транспорта, обзор теории моделирования / Д. Лозе // Сборник докладов 7-й междунар. конф. "Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах". - СПб : СПб гос. архит. - строит. ун-т. 2006. - С. 170-186.

17. Highway Capacity Manual 2000 : Transportation Research Board, National Research Council. - Washington, D.C., USA, 2000. - 1134 p.

18. Михайлов А. Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов : монография / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. - Новосибирск: Наука, 2004. - 267 с.

19. Автоматизация управления транспортными системами / под ред. А. А. Воронова. - М. : Наука, 1984. - 272 с.

20. Митаишвили Р. Л. Система показателей хозяйственной деятельности на пассажирском автомобильном транспорте / Р. Л. Митаишвили. - М. : Транспорт, 1987. - 87 с.

21. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов. - М.: Транспорт, 1990. - 240 с.

22. Глик Ф.Г. Пособие П2-99 к СНБ 3.03.02.-97 «Обследование транспортных потоков и прогнозирование сети городских улиц и дорог» / Ф.Г. Глик, С.А. Брандин, И.С. Борисик. - Минархстрой РБ: Минск, 1999. - 57с.

23. Горбачев П.Ф. Основы теории транспортных систем / П.Ф. Горбачев, И.А. Дмитриев. - Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2002. - 202 с.

24. Ройко Ю.Я. Щодо визначення основних принципів транспортного районування [Електронний ресурс] / Цифровий репозиторій ХНУМХ ім. А.М. Бекетова. - Режим доступу : \WWW/ URL: <http://http://eprints.kname.edu.ua/29545/1/34.pdf>. - Назва з екрану.

25. Трофименко Ю.В. Транспортное планирование: Формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю.В. Трофименко, М.Р. Якимов. - М.: Логос, 2013. - 464 с.

26. Свічинський С.В. Формування функцій розселення міського населення для визначення потреб у перевезеннях громадським транспортом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / С.В. Свічинський. - ХНАДУ – Х., 2015. - 20 с.

27. Цибулка Я. Качество пассажирских перевозок в городах / Цибулка Я. - М. : Транспорт, 1987. - 239 с.

28. Хастингс Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок : Пер. с англ. - М. : Статистика, 1980. - 95 с.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2016.

УДК 621.316

І.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, І.О. Бандура*Луцький національний технічний університет***ОСОБЛИВОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМ ГЕНЕРУВАННЯМ**

Запропоновано новий метод визначення економічно доцільних рівнів компенсації реактивної потужності, що дозволяє враховувати двосторонні перетікання потужності в мережах з розосередженими джерелами енергії.

Ключові слова: компенсація реактивних навантажень; розосереджені джерела енергії; економічні еквіваленти реактивної потужності; вхідна реактивна потужність.

И.В. Грицюк, Ю.В. Грицюк, И.А. Бандура**ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАССРЕДОТОЧЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ**

Предложен новый метод определения экономически целесообразных уровней компенсации реактивной мощности, что позволяет учитывать двусторонние перетекания мощности в сетях с рассредоточенными источниками энергии.

Ключевые слова: компенсация реактивных нагрузок; рассредоточенные источники энергии; экономические эквиваленты реактивной мощности; входная реактивная мощность.

I. Hrytsiuk, Yu. Hrytsiuk, I. Bandura**FEATURES COMPENSATION OF REACTIVE LOADS IN ELECTRICAL NETWORKS OF DISTRIBUTED GENERATION**

A new method for determining the economically viable level of reactive power compensation, which takes into account the bilateral flow of power networks of dispersed energy sources.

Keywords: compensation of reactive loads; dispersed energy sources; economic equivalent of reactive power; input reactive power.

Постановка проблеми. Утворення нових ринкових відносин між суб'єктами ринку електричної енергії та потреба державного економічного регулювання цих відносин за напрямками енергозбереження, з метою підвищення якості електроенергії та надійності електропостачання, зумовили появу відповідних нормативних умов регулювання перетікань реактивної енергії.

Однак, швидка зміна умов функціонування розподільних електричних мереж не завжди дозволяє ефективно розв'язувати існуючі задачі з допомогою наявної галузевої нормативної документації. Насичення електричних мереж розподіленими джерелами електроенергії (РДЕ), більшість з яких конструктивно орієнтовані на споживання реактивної потужності, потребує перегляду існуючих підходів щодо розв'язання задачі оптимального керування реактивною потужністю та її компенсації.

Енергопостачальні компанії, отримуючи плату за транспортування реактивної енергії від споживачів, не розраховуються при цьому з транспортними та енергогенерувальними компаніями за вироблення та транспортування реактивної енергії до меж їх балансової належності. На цій підставі жоден з суб'єктів ринку не зацікавлений у компенсації реактивної потужності в електромережах споживачів.

Разом з тим, всі суб'єкти оптового ринку об'єктивно зацікавлені у зниженні технологічних витрат електроенергії за рахунок компенсації реактивних навантажень (КРН) в електричних мережах. Рівень зниження витрат, очевидно, залежить не тільки від параметрів мереж, потужностей навантажень, рівнів напруги, але й від наявного рівня КРН в електромережах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В основу відомого методу розрахунку оптимальних рівнів КРН [1, 2] покладені комплексний і системний підходи, принципи граничних затрат і поетапності розрахунків КРН. У методі застосовуються додаткові фактори для обґрунтування рівнів КРН і зниження потужності трансформаторів і мереж або віддалення строків їх реконструкції за рахунок додаткової компенсації. Для цього використовуються запропоновані в [2] методи коригування економічної і балансової задач КРН.

Задача дослідження й обґрунтування рівнів КРН в електричних мережах енергопостачальних компаній (ЕК) є достатньо новою, оскільки раніше це не відповідало вимогам системного підходу щодо розрахунків КРН [3, 4]. З впровадженням ринкових відносин між суб'єктами оптового ринку

електроенергії України і споживачами, а особливо після введення в дію нової методики розрахунку плати за перетікання реактивної енергії між ЕК і їх споживачами [4], інтерес до даної проблеми посилюється.

Постановка завдань. Зважаючи на недоліки існуючих методів визначення оптимальних рівнів КРН, доцільно розробити новий метод оптимізації рівнів КРП в електромережах з РДЕ, який дозволить враховувати сукупні видатків енергопостачальної компанії на обслуговування перетікань реактивної потужності у межах балансової належності. Це забезпечує більш адекватні результати, оскільки дозволяє враховувати наявність зворотних перетікань активної та реактивної потужності за рахунок функціонування РДЕ та їх вплив на рівні напруг.

Викладення основного матеріалу. Для визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності у вузлах електромережі з огляду на забезпечення максимального економічного ефекту у вигляді зменшення витрат ЕК на обслуговування перетікань реактивної потужності розроблено математичну модель:

$$B = \sum_{i \in N} [Q_i (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

де B – витрати на впровадження КРН; Q_i – реактивна потужність споживання (генерування) у i -му вузлі електричної мережі (ЕМ); v_0 – укрупнена питома вартість засобів КРН; D_i – економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП) в i -му вузлі ЕМ; ρ_0 – ціна електроенергії у межах балансової належності ЕК; t – проміжок часу протягом якого визначаються витрати; ψ_i – оптимальне значення вхідної реактивної потужності в i -му вузлі ЕМ.

Залежно від сутності задачі оптимізації КРН та складу незалежних параметрів (множини вузлів, де планується встановлення компенсуючих установок (КУ)), цільову функцію необхідно коригувати. Так, для розв'язання задачі оптимізації рівнів компенсації реактивних навантажень споживачів цільова функція набуде вигляду:

$$B = \sum_{i \in N_{СП}} [Q_{Hi} (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ} \cup N_{ТП}} D_i Q_i \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (2)$$

для оптимізації рівнів КРП у межах балансової належності енергопостачальної компанії:

$$B = \sum_{i \in N_{ТП}} [Q_{TPI} (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ} \cup N_{СП}} D_i Q_i \rho_0 t \rightarrow \min, \quad (3)$$

для комплексної задачі визначення оптимального рівня компенсації реактивних навантажень ЕМ засобами споживачів та ЕК:

$$B = \sum_{i \in N_{СП} \cup N_{ТП}} [Q_i (v_0 + (D_i \rho_0 t - v_0) \psi_i)] + \sum_{i \in N_{РДЕ}} D_i Q_{РДЕi} \rho_0 t \rightarrow \min. \quad (4)$$

де $N_{СП}$, $N_{РДЕ}$, $N_{ТП}$ – відповідно, кількість споживачів ЕМ, розосереджених джерел електроенергії, приєднаних до них, та компенсуючих установок ЕК.

Враховуючи простоту та наочність цільової функції (1), сформульовано принцип формування оптимального рівня компенсації реактивної потужності в ЕМ за економічним критерієм: для забезпечення мінімуму витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності зменшувати вхідну реактивну потужність за рахунок компенсації реактивної потужності доцільно лише у вузлах ЕМ, для яких $D_i \rho_0 t - v_0 > 0$, або враховуючи, що $v_0 > 0$:

$$RENT_i = \frac{D_i \rho_0 t}{v_0} > 1, \quad (5)$$

де $RENT_i$ – за певних умов чисельно дорівнює рентабельності капіталовкладень у розміщення засобів компенсації реактивної потужності у i -му вузлі. Вище абсолютне значення $RENT_i$ свідчить про більші потенційні можливості даного вузла щодо зменшення витрат на обслуговування перетікань реактивної потужності в ЕМ.

Враховуючи дискретний характер незалежних змінних (встановлених потужностей КУ) та спосіб визначення доцільності встановлення компенсуючої установки у певному вузлі для розв'язання задачі визначення оптимального рівня оснащення ЕМ засобами КРН пропонується

використати ітераційний метод дискретної оптимізації, а саме метод оптимізованого перебору варіантів.

З урахуванням специфіки застосування методу оптимізації задача визначення економічно доцільного рівня компенсації реактивної потужності в ЕМ може бути сформульована таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} B = \sum_{i \in N} [Q_i (V_0 + (D_i \rho_0 t - V_0) \psi_i)] \rightarrow \min; \\ D_i = \sum_{j \in M_i} (-\text{Im}(\dot{T}_{ji}) k_{\phi Qj}^2); \\ \sum_{i \in N} Q_i \psi_i = Q_{\Sigma}; \\ Q_{KYi} = Q_i (1 - \psi_i) \geq 0; \\ Q_{ei} = Q_i \psi_i \leq Q_i \\ U_{\max} \geq U_i \geq U_{\min}, i \in N; \\ I_{\text{доп}} \geq I_j, j \in M; \\ Q_{\max} \geq Q_i \geq Q_{\min}, i \in N, \end{array} \right. \quad (6)$$

де Q_{KYi} – потужність компенсувальних установок в і-му вузлі ЕМ; $Q_{e,i}$ – вхідна реактивна потужність в і-тому вузлі ЕМ; U_{\max} , U_{\min} – відповідно, верхня і нижня межі допустимих напруг в ЕМ; I_j – фактичне струмове навантаження для j-го елемента мережі; $I_{\text{доп}j}$ – допустиме струмове навантаження для j-го елемента мережі; Q_{\max} , Q_{\min} – відповідно, верхня і нижня межі допустимих реактивних потужностей.

На прикладах електричних схем різної складності досліджено залежності ЕЕРП від потужностей споживання, генерування РДЕ та генерування КУ. Визначено оптимальні рівні компенсації реактивної потужності, необхідні для коригування режимів роботи розподільних електричних мереж з РДЕ за напругою та реактивною потужністю, і показано, що наближення до оптимальних режимів пов'язане зі зменшенням ЕЕРП для вузлів споживання та генерування реактивної потужності.

Дослідження залежності розрахункових значень ЕЕРП від режимів роботи розподільних електричних мереж виконувались на прикладі схеми ЕМ 10 кВ вузлової підстанції 110/10 кВ (рис. 1). До вказаної підстанції приєднано 5 фідерів, 3 з яких забезпечують видачу сумарної потужності 1443 кВА, сумарна довжина ліній становить 29,87 км.

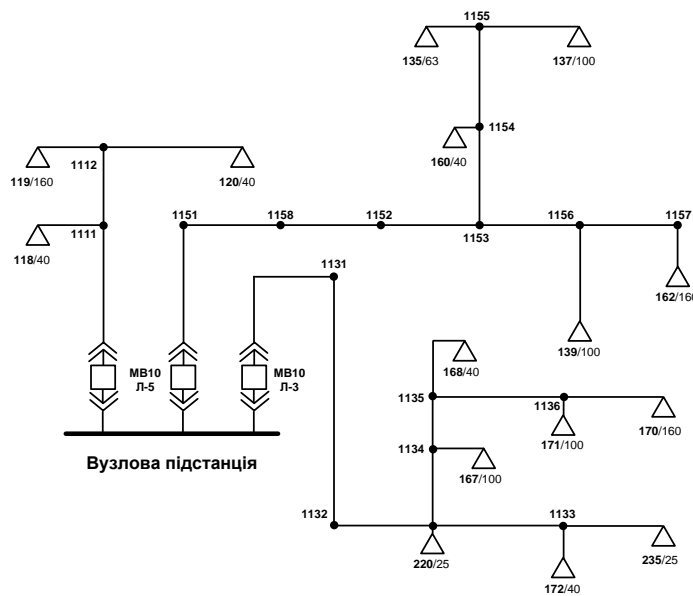


Рис. 1. Фрагмент схеми ЕМ 10 кВ вузлової підстанції 110/10 кВ

Аналіз залежності ЕЕРП використано на прикладі фідера Л-3, сумарна встановлена потужність трансформаторних підстанцій якого становить 490 кВА, загальна протяжність ліній 9,29 км. Результати розрахунку ЕЕРП подано на рис. 2.

Як видно з рис. 2 економічні еквіваленти реактивної потужності залежать від режиму і збільшуються за зростання перетікань активної та реактивної потужності електромережами. Так, у режимі мінімальних навантажень, коли перетоки реактивної потужності у ЕМ практично відсутні, компенсація реактивної потужності є недоцільною. У режимах середніх і максимальних навантажень значення ЕЕРП різко зростають.

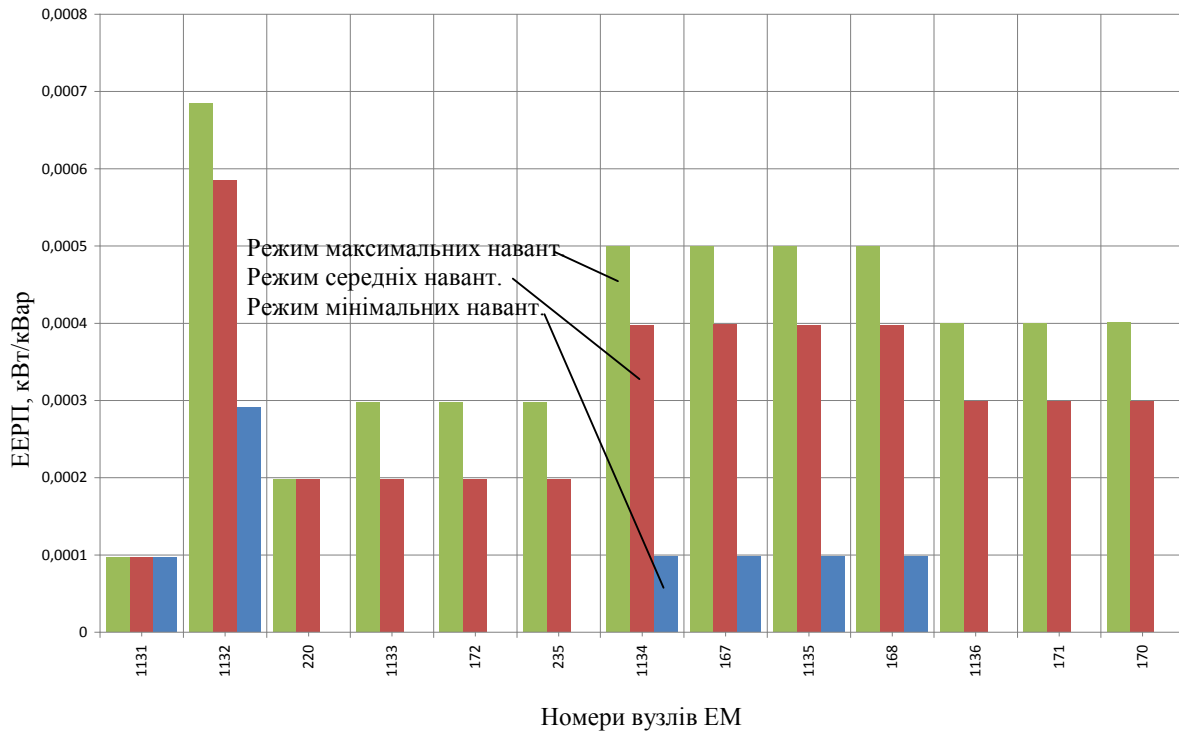


Рис. 2. Розрахункові значення ЕЕРП у режимах мінімальних, середніх та максимальних навантажень ЕМ

Для дослідження впливу розосередженого генерування на режими роботи ЕМ та розрахунку необхідного рівня компенсації проведено обчислювальний експеримент на прикладі ЕМ (рис.3): зімітовано встановлення вітової електростанції (ВЕС) потужністю 30 кВт з асинхронним генератором та повною компенсацією реактивної потужності. Для встановлення РДЕ вибрано найбільш електрично віддалений вузол ЕМ. На підставі модифікованої розрахункової схеми електричної мережі виконано аналіз чутливості ЕЕРП до зміни режиму ЕМ з РДЕ. Результати подано на рис. 3.

З діаграми (рис. 3) видно, що встановлення РДЕ у розподільній електричній мережі призводить до зростання ЕЕРП, що пояснюється зміною напрямку та графіків перетікань реактивної потужності. Особливо це проявляється у режимі мінімальних навантажень. Результати порівняння ЕЕРП для ЕМ за відсутності розосередженого генерування та з РДЕ подано на рис. 4.

Як видно з аналізу результатів, що значення ЕЕРП для вузлів споживання залежать від розміщення цих вузлів по відношенню до РДЕ. Наприклад, для ТП-167 у режимі ЕМ без РДЕ значення ЕЕРП перевищує аналогічне у режимі з розосередженим генеруванням, що підключене до ТП-170. Тобто поява розосередженого генерування у схемі зменшила вплив реактивного споживання ТП-167 на втрати в ЕМ, зменшивши спад напруги на шляху перетікання реактивної потужності до її споживачів.

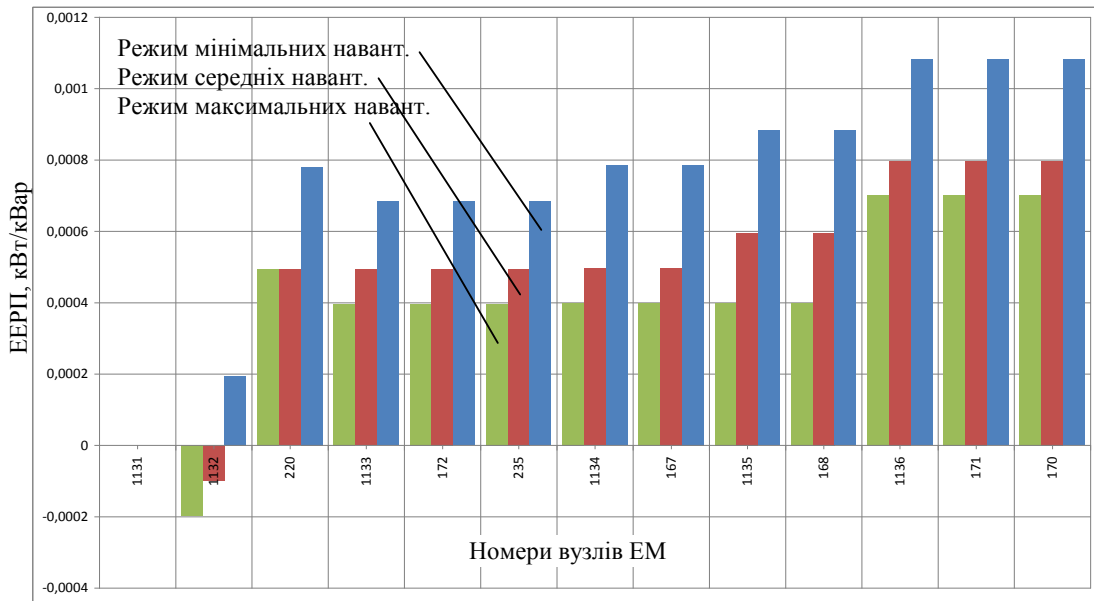


Рис. 3. Розрахункові значення ЕЕРП у різних режимах споживання електромереж з РДЕ

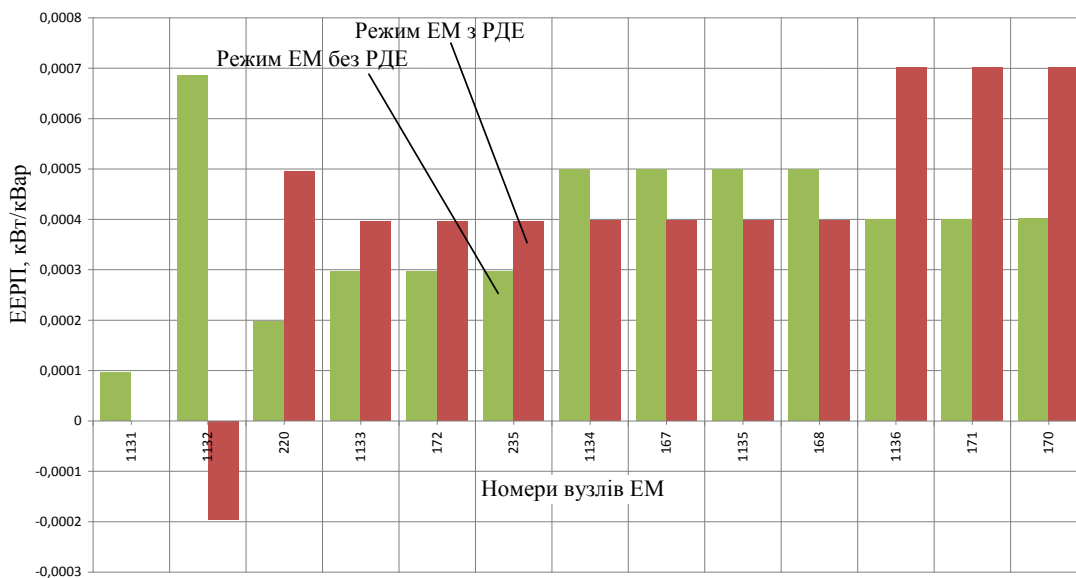


Рис. 4. Розрахункові значення ЕЕРП для ЕМ з РДЕ та без розосередженого генерування

Висновки.

1. На підставі математичної моделі сумарних видатків ЕК на обслуговування перетікань реактивної потужності в ЕМ запропоновано ряд цільових функцій, які дозволяють формалізувати окремі локальні задачі оптимізації КРП зі збереженням пріоритетності забезпечення загальносистемного ефекту.

2. Запропоновано метод оптимізації рівнів КРП в електромережах з РДЕ, що базується на розробленій математичній моделі сукупних видатків енергопостачальної компанії на обслуговування перетікань реактивної потужності у межах балансової належності та побудований на принципах дискретної оптимізації. За рахунок цього метод забезпечує більш адекватні результати, оскільки дозволяє враховувати: можливість зворотних перетікань активної та реактивної потужності у магістралях ЕМ за рахунок функціонування РДЕ неспівмірної потужності; вплив перерозподілу реактивної потужності в ЕМ на рівні напруг в них; зростання

нерівномірності графіків реактивних перетікань окремих ЛЕП та трансформаторів за рахунок запровадження заходів з КРП.

3. Досліджено вплив реактивних потужностей КУ та РДЕ, що функціонують у локальних електричних системах, на значення ЕЕРП окремих споживачів, що дозволяє оцінити реальний регулювальний ефект, а також роль і задачі окремих джерел в процесі оптимального керування режимами ЕМ по реактивній потужності.

Список використаних джерел:

1. Рогальський Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) та їх використання [Текст] / Б. С. Рогальський, О. М. Нанак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 126–129.
2. 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. Нанак // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2004. – № 2. – С. 2–9.
3. Рогальський, Б. С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. [навчальний посібник] / Б. С. Рогальський. – Вінниця. – Універсум–Вінниця. – 2006. – С. 236 .
4. Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживачами (основного споживача та субспоживача) [Електронний ресурс] / Наказ Мінпаливенерго України 05.01.2006р. №1. – Режим доступу : [http : //dnop.com.ua/dnaop/act9926.htm](http://dnop.com.ua/dnaop/act9926.htm).

Стаття надійшла до редакції 16.12.2016.

УДК 621.316

Ю.В. Грицюк, І.В. Грицюк, І.О. Бандура*Луцький національний технічний університет***ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ПАРАМЕТРИ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

В роботі засобами імітаційного моделювання здійснено оцінку взаємного впливу різномісних розосереджених джерел енергії та розподільних електричних мереж. Виявлено позитивний вплив від функціонування цих джерел на величину втрат та рівень напруги.

Ключові слова: розосереджені джерела енергії, локальна електрична система, гідроелектростанція, сонячна електростанція.

Ю.В. Грицюк, І.В. Грицюк, І.А. Бандура**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

В работе средствами имитационного моделирования проведена оценка взаимного влияния разномісних рассредоточенных источников энергии и распределительных электрических сетей. Выявлено положительное влияние от функционирования этих источников на величину потерь и уровень напряжения.

Ключевые слова: рассредоточенные источники энергии, локальная электрическая система, гидроэлектростанция, солнечная электростанция.

Yu. Hrytsiuk, I. Hrytsiuk, I. Bandura**SIMULATION OF INFLUENCE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN MODE SETTINGS POWER DISTRIBUTION NETWORKS**

The paper by means of simulation modeling the estimation of the mutual influence of different types of distributed energy sources and distribution electrical grids. The positive impact on the functioning of these sources by the amount of losses and voltage level.

Keywords: dispersed energy sources, the local electrical system, power plant, solar

Постановка проблеми. В останні роки світові тенденції, спрямовані на підвищення енергозбереження і раціонального використання природних ресурсів, призвели до інтеграції відновлювальних джерел енергії в наявні розподільні електричні мережі у вигляді розосереджених джерел енергії (РДЕ). Причому частка останніх в енергобалансі енергосистем зростає, і в деяких електричних мережах вже сьогодні досягає 20–30% і більше. До РДЕ, що працюють безпосередньо в мережах 10–6–0,4 кВ, відносяться як традиційні джерела невеликої потужності, так і альтернативні. Таким чином, розподільна електрична мережа поступово перетворюється в мережу з характерними особливостями локальної електричної системи (ЛЕС), яка отримує живлення як від власних РДЕ, так і від централізованого джерела – електроенергетичної системи.

Разом з тим, розподільні електромережі енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, виходячи з чого розбудова в них розосереджених джерел електроенергії породжує нові проблеми та задачі. Основними з технічної точки зору тут є задачі підтримання балансу активної і реактивної потужностей в ЛЕС та оптимізації розосередженого генерування активної та реактивної енергії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання дослідження взаємного впливу РДЕ та розподільних електромереж розглянуте в ряді наукових праць [1 – 3]. Результатом попередніх досліджень є формування математичних моделей, що описують вплив РДЕ та централізованого генерування на формування поточкорозподілу потужності електроенергетичних систем.

Постановка завдань. Дослідження характерних режимів роботи розподільних електричних мереж сумісно з різномісними РДЕ на основі імітаційних розрахунків.

Викладення основного матеріалу. Залежно від типу розосереджених джерел електроенергії (РДЕ), їх вплив на режими роботи електромереж є різним. Для фотовольтаїчних установок характерними є значні встановлені потужності (від сотень кіловат до десятків мегават для розподільних електромереж), що у поєднанні з істотною залежністю генерування від випадкового впливу навколишнього середовища, створює принципово нові умови функціонування розподільних електричних мереж (ЕМ). Крім того, застосування потужних інверторів може спричиняти спотворення форми кривої напруги ЕМ та появу вищих гармонік.

У випадку використання для перетворення енергії синхронних генераторів, технологічною необхідністю є генерування реактивної потужності. Тобто, крім активної потужності, що є предметом договорів на постачання електроенергії, на користування електричними мережами, на функціонування в межах енергетичного ринку України, такі РДЕ генерують і реактивну потужність. Виходячи з цього, синхронні генератори (СГ) працюють з коефіцієнтом потужності ($\cos\varphi = 0,8-0,85$). Залежно від співвідношення такого генерування та суміжного споживання їх вплив може бути позитивним або негативним. Останній проявляється у зростанні струмів у лініях електропередачі (ЛЕП) та трансформаторах, а також підвищення рівня втрат електроенергії в ЕМ. Однак, у обох випадках локальне генерування реактивної потужності РДЕ сприяє підвищенню рівнів напруги у вузлах ЕМ, що є позитивним моментом для забезпечення якості електропостачання електрично-віддалених споживачів. Крім того, цей аспект треба враховувати, визначаючи економічні еквіваленти реактивної потужності в ЕМ та необхідні рівні компенсації реактивної потужності.

Важливою перевагою РДЕ з асинхронними генераторами є мінімальний вплив на режими розподільних електромереж, що зумовлено практично повною компенсацією реактивного споживання у межах балансової приналежності. Виходячи з цього, коефіцієнти потужності на шинах таких джерел є достатньо високими ($\cos\varphi = 0,98-1$).

Для підтвердження наведеного вище, в роботі було виконано ряд натурно-обчислювальних експериментів для аналізу впливу генерування реактивної потужності РДЕ на режими роботи розподільних електромереж і баланс реактивної потужності в них. В якості прикладу наведено результати вимірювань та обчислень для електричної мережі 10 кВ Ф-45 підстанції «Михайлівка», в яку віддають електроенергію РДЕ Слобода-Бушанського комплексу – гідроелектростанція (ГЕС) встановленою потужністю 250 кВт та сонячна електростанція (СЕС) встановленою потужністю 500 кВт (рис. 1).

Слобода-Бушанська ГЕС оснащена асинхронними генераторами і, відповідно, практично не видає реактивну потужність в мережу 10 кВ Ф-45. Основні результати, що характеризують її вплив на втрати електроенергії в електричній мережі, подані у табл. 1. З них видно, що генерування ГЕС позитивно впливає на поточкорозподіл в ЕМ, зменшуючи втрати електроенергії в ЛЕП на 40%. Вся електроенергія, яка генерується Слобода-Бушанською ГЕС споживається у межах електричної мережі 10 кВ Ф-45 і не передається до розподільних мереж 110 кВ.

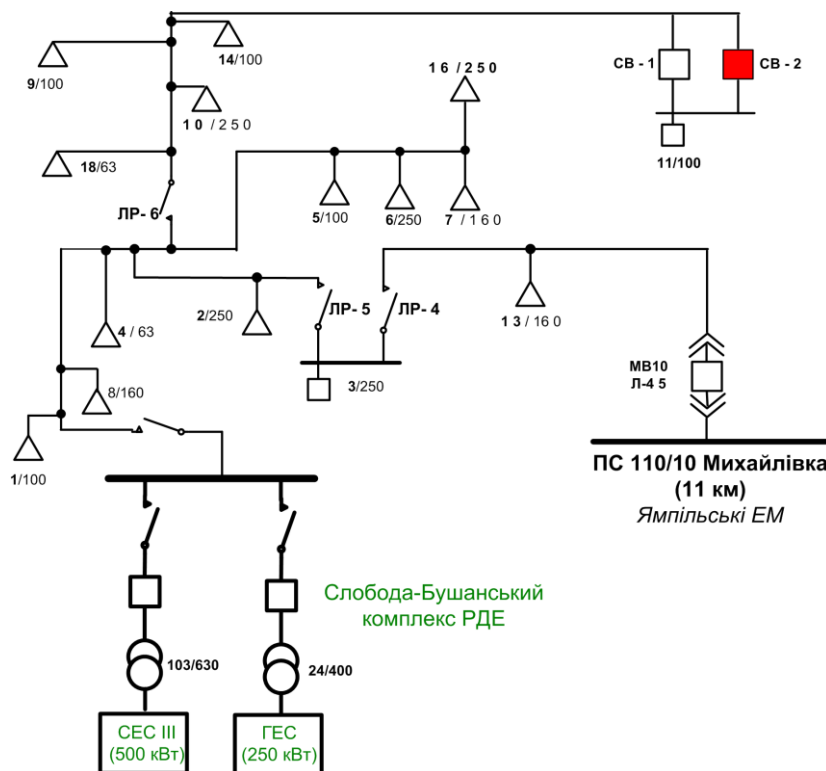


Рис. 1. Схема приєднання Слобода-Бушанського комплексу РДЕ до електричної мережі

Результати розрахунку характерних режимів роботи ЕМ 10 кВ Ф-45 показують позитивний ефект Слобода-Бушанської ГЕС: для всіх режимів спостерігається зменшення втрат потужності за рахунок розвантаження окремих ЛЕП магістралі фідера Ф-45. Наприклад, у режимі максимальних навантажень, струм головної ділянки Ф-45 за рахунок роботи ГЕС зменшується на 26%, а на окремих ділянках ЛЕП – до 50 %. Крім того, спостерігаються зміни в режимі напруг (рис. 2) – електромережа набуває жорсткості за напругою, що зумовлено вищезазначеними причинами. Ця обставина має враховуватися на етапі математичного моделювання критерію оптимальності задач компенсації реактивної потужності.

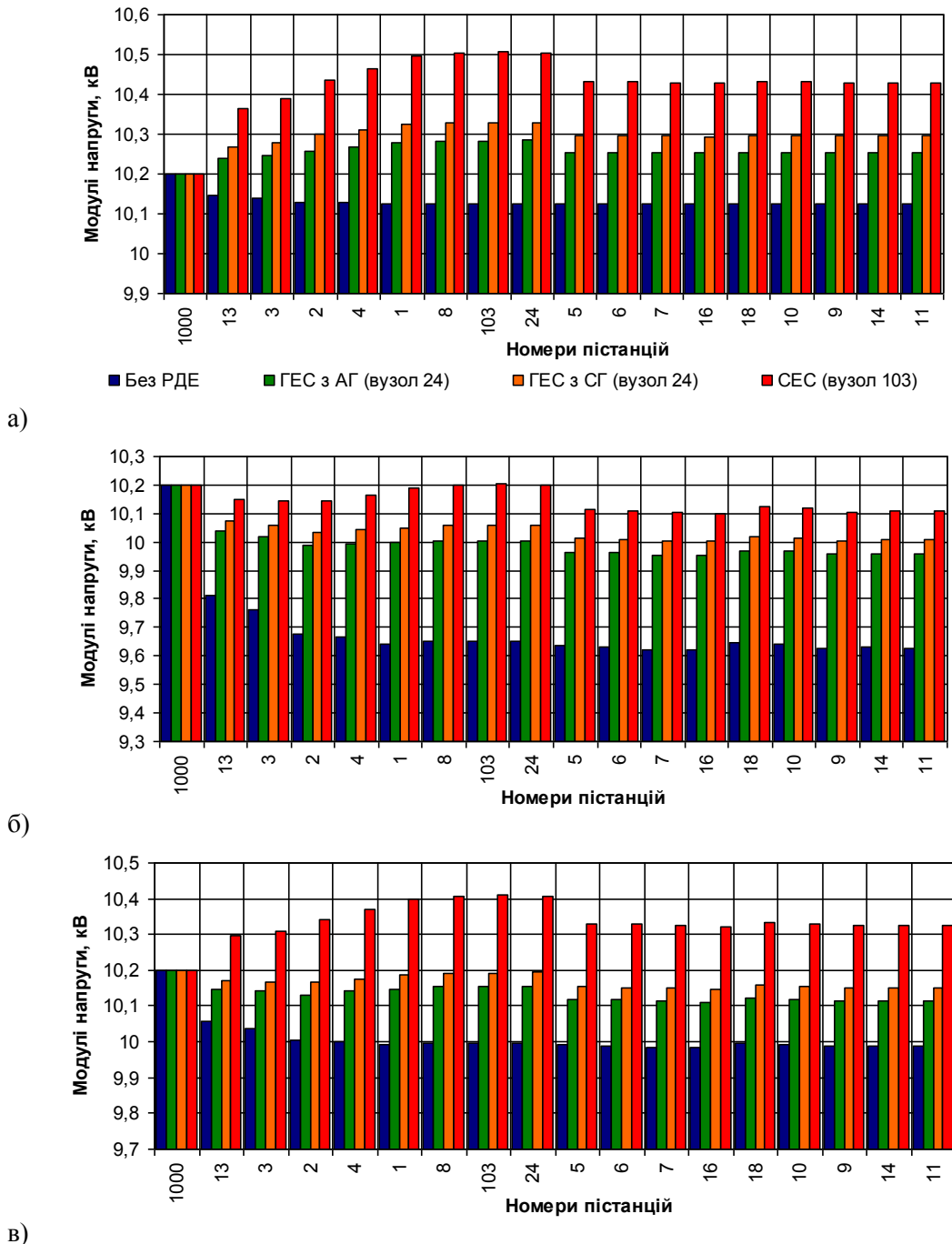


Рис. 2. Розподіл напруги по вузлах електромережі з РДЕ у режимах мінімальних (а), максимальних (б) та середніх (в) навантажень

Для дослідження впливу реактивної потужності даної ГЕС на режими роботи ЕМ було зімітовано встановлення на ній двох синхронних генераторів аналогічної активної потужності з $\cos\phi = 0.85$. Після цього, розраховано три характерних режими роботи мережі (з урахуванням генерування реактивної потужності малою ГЕС): режим максимальних навантажень, режим

середніх навантажень з визначенням втрат електроенергії, а також мінімальних навантажень (рис. 2).

Таблиця 1

Результати розрахунку втрат електроенергії в електричній мережі 10 кВ Ф-45 з РДЕ (асинхронні генератори)

Вид розрахунку	Надходження електроенергії з системи, кВт·год	Втрати в ЛЕП, кВт·год/%	Втрати в трансформаторах, кВт·год/%			Сумарні втрати, кВт·год/%
			Сумарні	Холостого ходу	Навант.	
Без врахування РДЕ	167154,8	6381,8	7572,0	7168,4	403,5	13953,8
		3,8	4,5	4,3	0,2	8,3
З врахуванням ГЕС	669,6	3794,8	7624,0	7168,4	455,6	11418,8
		2,3	4,6	4,3	0,3	6,8
Оцінка впливу ГЕС	-166485,2	-2587,0	52,0	-	52,1	-2535,0
	-99,6 %	-40,5 %	0,7 %	-	12,9 %	-18,2 %

Основні результати, що характеризують вплив генерування реактивної потужності малою ГЕС на втрати електроенергії в електричній мережі, подані у табл. 2.

З результатів розрахунків видно, що за рахунок генерування ГЕС з синхронними генераторами споживачі мережі 10 кВ Ф-45 фактично не споживають електроенергію від централізованого електропостачання. Таким чином, в окремих режимах електромережі за рахунок дії РДЕ може змінюватися основне джерело живлення, що має враховуватися під час формування ЕЕРП та постановки задачі групової компенсації реактивної потужності в ЕМ. Незначний надлишок електроенергії ГЕС видається на шини живильної підстанції, споживаючись у електромережах інших фідерів підстанції 110/10 «Михайлівка». Таким чином, за рахунок РДЕ забезпечується розвантаження розподільних мереж 110 кВ та зменшення втрат електроенергії в них.

Таблиця 2

Результати розрахунку втрат електроенергії у ЕМ 10 кВ Ф-45 з малою ГЕС (синхронні генератори)

Вид розрахунку	Надходження електроенергії з системи, кВт·год	Втрати в ЛЕП, кВт·год/%	Втрати в трансформаторах, кВт·год/%			Сумарні втрати, кВт·год/%
			Сумарні	Холостого ходу	Навант.	
Без врахування ГЕС	167154,8	6381,8	7572,0	7168,4	403,5	13953,8
		3,8	4,5	4,3	0,2	8,3
З врахуванням ГЕС	-5654,4	1414,1	7499,9	7168,4	331,4	8914,0
		0,8	4,5	4,3	0,2	5,3
Оцінка впливу ГЕС	-172809,2	-4967,7	-72,1	-	-72,1	-5039,8
	-103,4 %	-77,8 %	-1,0 %	-	-17,9 %	-36,1 %

Генерування СЕС відрізняється незначною реактивною складовою та істотною, для даної електромережі, активною потужністю. В режимах максимального генерування сонячна електростанція повністю забезпечує споживачів ЕМ Ф-45, а надлишок електроенергії видається на шини ПС «Михайлівка» та споживається у суміжних фідерах.

Результати, що характеризують вплив РДЕ на втрати електроенергії в електричній мережі, подані у табл. 3. З них видно, що за рахунок зміни напрямку перетікання активної потужності в головній ділянці спостерігаються додаткові втрати електроенергії. Крім того неспівпадіння напрямків перетоків активних та реактивних потужностей призводить до додаткового завантаження ЛЕП без підвищення рівнів напруг, що супроводжується підвищенням втрат електроенергії. Внаслідок зазначеного втрати електроенергії в ЛЕП зростають на 95 %, у мережі в цілому на 42 %.

Позитивним моментом є вплив СЕС на рівні напруги в ЕМ (рис. 2). Так, для режиму максимальних навантажень, для якого питання регулювання напруги є найбільш критичним забезпечується мінімальне відхилення по всій мережі від напруги на шинах живильної підстанції. Однак у режимі мінімальних навантажень, на який переважно припадає максимум генерування СЕС (денний мінімум навантаження) спостерігається перевищення граничних рівнів напруги на шинах РДЕ. Це потребує застосування додаткових заходів з регулювання напруги, в тому числі за рахунок компенсації реактивної потужності.

Таблиця 3

Результати розрахунку втрат електроенергії у ЕМ 10 кВ Ф-45 з СЕС

Вид розрахунку	Поступлення електроенергії з системи, кВт·год	Втрати в ЛЕП, кВт·год/%	Втрати в трансформаторах, кВт·год/%			Сумарні втрати, кВт·год/%
			Сумарні	Холостого ходу	Навант.	
Без врахування РДЕ	167154,8	6381,8	7572,0	7168,4	403,5	13953,8
		3,8	4,5	4,3	0,2	8,3
З врахуванням СЕС	-282868,8	12448,2	7472,9	7168,4	304,4	19921,1
		7,4	4,5	4,3	0,2	11,9
Оцінка впливу СЕС	-450023,6	6066,4	-99,1	-	-99,1	5967,3
	-269,2 %	95,1 %	-1,3 %	-	-24,6 %	42,8 %

Висновки.

1. З аналізу результатів можна стверджувати, що робота РДЕ позитивно впливає на режими електричної мережі 10 кВ, до якої вони приєднані. У режимах, близьких до мінімальних навантажень, такі джерела істотно впливають на режим напруг. Це робить неприпустимим використання припущення щодо номінальних напруг в ЕМ на стадії визначення критеріїв оптимальності в задачах КРП, що є поширеним у експлуатаційній практиці розподільних електромереж.

2. За рахунок дії РДЕ в окремих режимах електромережі може ситуаційно змінюватися основне джерело живлення, що має враховуватися під час формування задачі групової компенсації реактивної потужності в ЕМ.

3. Неврахування розосередженого генерування у процесі моделювання КРП, коефіцієнтів чутливості втрат та напруги до зміни реактивних перетікань (які використовуються для визначення місць приєднання КУ та формування оптимальних керувальних впливів), може призводити до зниження ефективності компенсації реактивної потужності в електромережах.

Список використаних джерел.

1. Лежнюк, П. Д. Оптимізація режимів електричних мереж з малими ГЕС в умовах адресного електропостачання [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, О. А. Ковальчук // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск : Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. – 2010. – С. 31–34. – ISSN 0204–3599.
2. Лежнюк, П. Д. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах [Текст] / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук, В. О. Хоменко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – №1. – С. 104–108.
3. Кулик, В. В. Ідентифікація коефіцієнта форми графіка групового навантаження для визначення втрат електроенергії в розподільних мережах [Текст] / В. В. Кулик, Д. С. Писляров // Вісник Призовського державного технічного університету. – 2008. – Вип. № 18. – С. 92–95.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2016.

УДК 621.7

Н.М. Гулієва, В.О. Степанюк

ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ

В даній роботі розглянемо яким чином формується імпульсна плазма, досвід введення технології, а також схеми: імпульсного плазмотрона, імпульсно-плазмової установки, де плазмотрон і індуктивність закріпленні на фрезерному верстаті.

Ключові слова: імпульсна плазма, детонаційні хвилі, плазмотрон, ударно стислий шар(УСШ).

Рис. 3. Форм. 4. Літ. 7.

Н.М. Гулієва, В.А. Степанюк

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

В данной работе рассмотрим каким образом формируется импульсная плазма, опыт введения технологии, а также схемы: импульсного плазмотрона, импульсно-плазменной установки (где плазмотрон и индуктивность закреплены на фрезерном станке).

Ключевые слова: импульсная плазма, детонационные волны, плазмотрон, Ударно сжатый слой (УСС).

N.M. Huliieva, V.O. Stepaniuk

EQUIPMENT AND TECHNOLOGY OF PULSED-PLASMA SURFACE TREATMENT

In this paper, we consider how pulsed plasma is formed, the experience of the introduction of technology and Schemes: pulsed plasma torch, plasma pulse unit (where the plasma torch and inductance to consolidate Milling machines).

Keywords: pulsed plasma detonation wave plasma torch, shock compressed layer (SCL).

Формування імпульсної плазми. З метою ефективного формування потужних плазмових струменів використовували нестационарні детонаційні режими горіння горючих газових сумішей.

Енергетичні параметри продуктів нестационарного детонаційного горіння (імпульсного плазмового струменя) визначаються рішенням відомої двовимірної нестационарної задачі поширення детонаційної хвилі (ДХ) в електричному полі між двома коаксіальними електродами. Для здійснення чисельного рішення це завдання було спрощено, і середні значення температури, швидкості, тиску і щільності продуктів по згорянню осі електродів визначалися без обліку зміни їх по перетину.

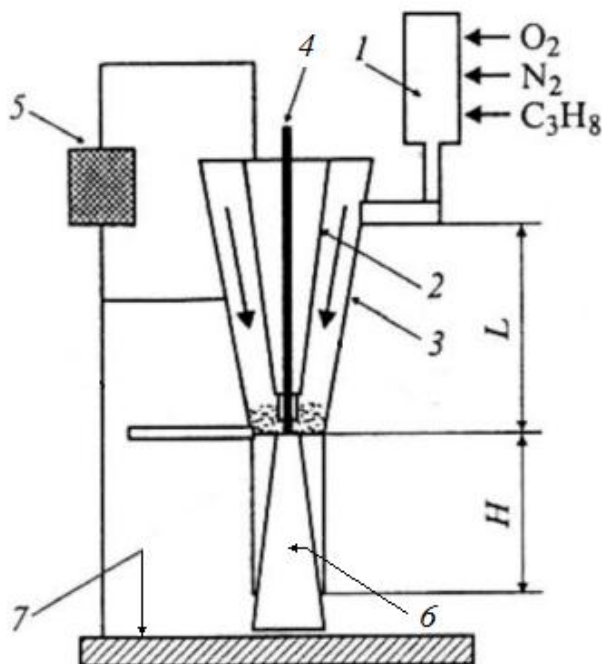


Рис. 1. Схема імпульсного плазмотрона

Результатом рішення є програма для розрахунку камери згорання імпульсного плазмотрона (рис. 1.), який складається з детонаційної камери 1, де здійснюється формування горючої газової

суміші і ініціювання детонаційного її згоряння; центрального електрода-анода 2; конічного електрода – катода 3; витраченого електрода 4; джерела живлення 5.

При ініціюванні детонації іонізовані продукти згоряння надходять з детонаційної камери 1 в між електродний зазор і замикають електричний ланцюг. Утворюється електропровідний шар продуктів згоряння, який під впливом газодинамічної і електромагнітної сил прискорюється. По осі центрального електрода 2 закріплений металевий витратний стрижень 4, кінець якого при нагріванні випаровується і забезпечує введення в плазмовий струмінь легуючих елементів.

При викиді імпульсного плазмового струменя 6 з плазмотрона, вона замикає електричний ланцюг між електродом-анодом і поверхнею виробу – катодом 7. У результаті проходження по цьому струменю електричного току, плазма нагрівається за рахунок Джоулевого тепловиділення:

$$Q = \sigma E^2 \quad (1)$$

Розраховані по теоретичним формулам енергетичні характеристики плазмових струменів на виході з плазмотрона мають лінійну залежність від напруженості електричного поля і довжини між електродного зазору, при довжині між електродного зазору $L = 200$ мм і напруженості електричного поля 400 кВ/м плазмовий струмінь може мати температуру 15000 К, а швидкість 5 км/с.

Проводилось експериментальне визначення характеристик плазмового струменя на промисловому плазмотроні з довжиною між електродного 200 мм зазору. За результатами спектрального аналізу плазмового струменя визначена усереднена за часом існування температура плазмового струменя. Температура плазми визначалася по відносній інтенсивності ліній заліза. За інтегральністю по часу спектри випромінювання плазми показують, що її температура на виході з плазмотрона становить 15000-20000 К.

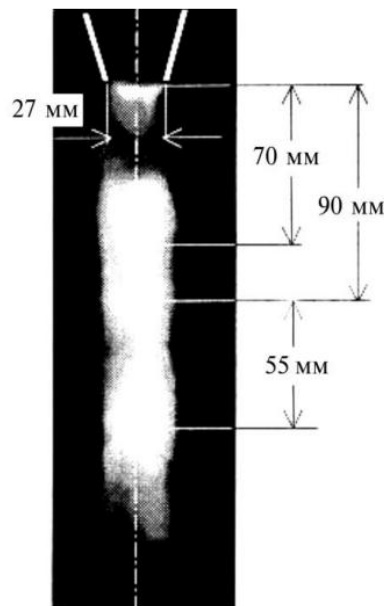


Рис. 2. Фото-розгортка плазмового струменя

Вивчення швидкісних фото розгорток плазмових струменів дозволяє помітити в них наявність стрибків ущільнення і періодичної структури, рис. 2. Заміри початкового діаметра струменя (діаметра сопла генератора) і відстані до першого стрибка ущільнення дозволяють розрахувати швидкість струменя. Оцінку швидкості струменя V Проводимо по формулі :

$$L_w = 1,3d_a \sqrt{M-1} \quad (2)$$

Запишемо (2) у вигляді:

$$V = \sqrt{\frac{L_w}{1,3d_a} + 1} \cdot a_0 \quad (3)$$

де $d_a = 0,027 M$ – діаметр сопла плазмотрона; $M = V/a_0$ – число Маха; $L_w = 90$ мм – довжина хвилі періодичної структури, зображення якої отримано за допомогою швидкісної фотозйомки (рис 2). Швидкість звуку a_0 визначимо за формулою:

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT} \quad (4)$$

де в нашому випадку: $\gamma = 1,3$ постійна адиабати, $R = 300$ Дж / (КГК) газова постійна, $T = 15000$ К – температура струменя. Підставивши (4) в (3), отримаємо $V_2 = 6,7$ км/с, що узгоджується з теоретично отриманими даними.

Представлена на рис. 2 структура плазмового струменя характерна для надзвукового закінчення струменів в режимі недорозширення і узгоджується з вибуховим характером роботи плазмотрона, при якому можливе значне перевищення тиску в камері в порівнянні з навколишнім середовищем. Картина взаємодії плазмового струменя з перешкодою характеризується наявністю плазмового струменя і області ударно-стиснутого шару (УСШ).

Після пробою УСШ електричний струм буде текти по плазмовому струмені від центрального електрода в плазмотрон до поверхні виробу. Щільність електричного струму в плазмовому струмені становить $J = (1 \dots 7) 10^3$ А/см², температура $T = 15000 \dots 30000$ К. Тепловий потік в виріб залежить від щільності електричного струму і змінюється в діапазоні $q = (0,1 \dots 5) \cdot 10^6$ Вт/см². Оцінку теплових потоків проводили на основі теоретичного аналізу нестационарного рівняння теплопровідності за товщини загартованих шарів сталей мартенситного класу.

Управління часом впливу плазмового імпульсу і його енергетичними характеристиками здійснювалося зміною: ємності C конденсаторів, напруги $U_{зар}$ на обкладинках конденсаторної батареї, L індуктивності в ланцюзі розряду, відстані до поверхні виробу H і зміною розміру активної плями взаємодії плазмового струменя з поверхнею виробу.

Проводили експерименти по виміру тимчасової зміни електричного струму в між електродному зазорі, а також струму між центральним електродом і поверхнею виробу. Експерименти проводили з використанням поясів Роговського за відомою методикою. Аналіз часового розподілу струмів показує, що ударно стислий шар (УСШ), який утворюється при натіканні плазмового струменя на поверхню виробу має електричний опір набагато вище, ніж опір розрядного проміжку між коаксіальними електродами. Заміри показали, що пробій УСШ відбувається тільки через 1,2 мс. За цей час встигає пройти перезарядка конденсаторів і витрачається електрод 5 (див. рис. 1) буде катодом протягом 0,2 мс, а потім знову анодом протягом 0,4-0,6 мс.

Експериментальні роботи показали, що поверхня виробу відчуває в перший момент пружно-деформаційну взаємодія з ударною хвилею і імпульсною струменем плазми, потім при пробіі УСШ поверхня піддається впливу електричного струму. Амплітудне значення струму 5 кА. В результаті утворюється імпульсне магнітне поле напруженістю до 2000 Е. Надалі, протягом 3 ... 5 мс, на поверхню натікають продукти згоряння і ерозії електродів.

Досвід впровадження технології. Експериментальні роботи показали, що максимальна мікротвердість поверхневого шару отримана при обробці плазмою містить пари вольфраму або молібдену, а також при надлишку в плазмі азоту і вуглецю. Крім перерахованих вище технологічних рів на значення мікротвердості впливають так само кількість впливу плазмових імпульсів. Збільшення числа імпульсів призводить до збільшення товщини зміцненого шару і його рівномірності.

Відомо, що високі експлуатаційні властивості сплавів, що застосовуються для виготовлення інструменту, забезпечуються за рахунок легування їх вольфрамом, молібденом і ванадієм. Зміст хрому в сплавах становить 3 ... 4,5 %.

Штампи для гарячого деформування деталей машин виготовляють зі сплавів, які містять 2 ... 6% W (типу 4ХНВ, 4Х5В2ФС); 6 ... 9% W (типу 3Х2У8Ф); і сплавів, які містять 12-18 % W. Елементом, ефективно поліпшує властивості сплавів, є молібден. Молібден покращує в'язкість, не знижуючи теплостійкості, підвищує стійкість розжарювання. Молібденові сплави (5 ... 6 % Мо) дуже чутливі до зменшення вуглецю, тому при поверхневому легування сплавів, нарівні з використанням витрачається молібденового електрода, як плазмо утворюючого газу необхідно використовувати суміш з коефіцієнтом надлишку пального газу.

Імпульсно-плазмову обробку виробів з швидкорізальних сплавів Р9М5, Р9М4К8Ф, Р10-К5Ф5, Р12Ф5М, Р12Ф2К8М3, необхідно здійснювати без оплавлення поверхні. при такому режимі обробки працездатність інструменту зростає в 3 ... 5 разів . Так, при лазерно-імпульсній обробці

підвищення твердості поверхні і зносостійкості інструменту зі швидкорізальної сталі відбувається тільки в тому випадку, коли питома потужність імпульсів знаходиться в межах $1 < W_p < 5 \times 10^5$ Вт/см², а час впливу $t = 5 \times 10^{-3}$ с. Ці режими обробки забезпечують граничну температуру поверхні, близьку до температури плавлення.

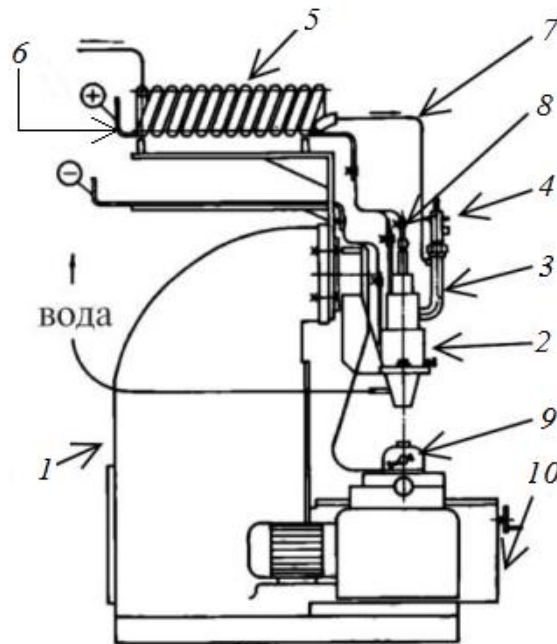


Рис. 3. Схема імпульсно-плазмової установки, де плазмотрон та індуктивність закріплені на фрезерному станку

Імпульсно-плазмове зміцнення інструменту на ВАТ "Череповецькій сталепрокатний завод" здійснюється на модернізованому фрезерному верстаті (рис. 3). Замість вертикального шпинделя верстата 1 закріплений імпульсний плазмотрон 2. У плазмотрон вбудована детонаційна гармата 3 з камерою 4 для змішування газу і ініціювання детонації. Електричний струм до плазмотрона надходить через індуктивність 5 по мідній шині 6. Охолодження плазмотрона індуктивності здійснюється водою, яка підходить до плазмотрона через індуктивність по трубопроводу 7. Легуючі елементи вводяться за осі плазмотрона у вигляді стрижня 8 і через камеру 4 у вигляді газу. Інструмент закріплюється в пристосування 9, його переміщення здійснюється приводом верстата 10.

Зміцнення піддавався металорізальний інструмент, а також матриці і пуансони штампів холодного і гарячого деформування металу. Перед зміцненням виробу проходили стандартну термічну і механічну обробку. Імпульсно-плазмову обробку застосовували в якості кінцевої операції. Зміцнення піддавали тільки поверхні ріжучих кромek інструменту. Продуктивність зміцнення становила до 0,5 м² поверхні в годину, що при перерахунку на реальний інструмент складає до 100 пуансонів на годину. Перед зміцненням поверхня інструменту не потребувала чистки або будь-якої іншої підготовчої операції.

На відміну від металорізального інструменту з швидкорізальних сталей, інструмент для штампування допускає оплавлення поверхні. Технологічні режими обробки для різного виду пуансонів, матриць, штампів підбиралися з мінімальною щільністю потужності, достатньої для нагріву поверхні до оплавлення. Такий режим забезпечував легування розплавленої поверхні виробу елементами складовими плазмового струменя. При зміцненні використовували електрод, що витрачається з вольфраму, плазмо утворюючий газ містив надлишок пропану. Обробка здійснювалася з триразовим впливом імпульсної плазми на зміцнюючу поверхню. Для зміцнення металорізального інструменту: мітчиків, плашок, протяжок підбиралася щільність потужності мала для оплавлення і затуплення різальних крайок. використовували споживаний електрод з молібдену, плазмо утворюючий газ містив надлишок пропану і азоту. Обробка фрез, свердел, різців і т.д. проводилася з використанням електрода з титану. Обробка здійснювалася з 5 ... 10 – кратним впливом імпульсів плазми на зміцнюючу поверхню.

Технологія і технологічне обладнання для імпульсно-плазмового зміцнення інструменту використовують в умовах метисного виробництва і масового виробництва металургійної продукції

на ВАТ "Череповецькій сталепрокатний завод". Досвід промислової експлуатації показав, що працездатність інструменту підвищилася в 2 ... 4 рази.

Висновок. Пропонована імпульсно-плазмова технологія відноситься до ресурсозберігаючих, що обумовлено низькою витратою легуючих елементів і електричної енергії в поєднанні з високою продуктивністю (до 0,5 м²/год). Технологія дозволяє обробляти (нагрівати) тільки робочі (ріжучі) поверхні інструменту, що вирішує проблеми підвищення зносостійкості без зміни структурного стану матеріалу всього виробу.

Обробка поверхні інструменту імпульсною плазмою, яка містить легуючі елементи, супроводжується впливом: деформаційних до $P = 150$ атм., електромагнітним до $H = 2000$ Е, термічних $Q = 5-106$ Вт /см². Це прискорює масо переніс елементів з плазми в глиб зміцненої поверхні. Промислове впровадження імпульсно-плазмової технології підтверджує її ефективність. Працездатність інструменту після зміцнення підвищилася в 2 ... 4 рази.

1. Golubets V.M., Lukina G.M., Shvets V.V. Peculiarities and properties of amorphous impulse plasma coatings // "Physicochemical Mechanics of Materials" / – 1992. – vol. 28. – №5. – P. 56–60.
2. C. Cordier-Robert, J. Crampon, and J. Foot. Surface alloying of iron by laser melting: microstructure and mechanical properties. Surface Engineering. – 1998, Vol. 14, №. 5. – P. 381-385.
3. Tyurin Y.N., Pogrebnyak A.D. Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposition // Surface and Coatings Technology. – 1999.– №111.– P. 269–275.
4. Лещинский Л.К., Смотугин С.С., Пирч И.И. Плазменное поверхностное упрочнение. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.
5. Guliiava N. The filtration efficiency of porous permeable materials of saponite – titanium system composite. / Nataliia Guliiava // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – No 4. – P. 97–99.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2016.

УДК 534.11

¹Гуменюк Ю.О., ²Герасимчук Г.А., ¹Човнюк Ю.В.¹Національний університет біоресурсів і природокористування України²Луцький національний технічний університет**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ РЕЗОНАНСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ ВІБРАЦІЇ**

Наведена наукова концепція для обґрунтованого аналізу резонансних властивостей ґрунтів сільськогосподарського призначення при вібрації.

Ключові слова: концепція, обґрунтування, аналіз, резонанси, властивості, ґрунт сільськогосподарського призначення, взаємодія, вібрація.

Гуменюк Ю.О., Герасимчук Г.А., Човнюк Ю.В.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ВИБРАЦИИ

Приведена научная концепция для обоснованного анализа резонансных свойств почв сельскохозяйственного назначения при вибрации.

Ключевые слова: концепция, обоснование, анализ, резонансы, свойства, почва сельскохозяйственного назначения, взаимодействие, вибрация.

Humenyuk YU., Herasymchuk H., Chovnyuk YU.

CONCEPTUAL BASES OF THE RESONANCE PROPERTIES OF SOIL FOR AGRICULTURAL PURPOSES DURING VIBRATION

The article presents scientific concept for a reasoned analysis of the resonance properties of soil for agricultural purposes during vibration.

Key words: concept, justification, analysis, resonances, properties, soil interaction, vibration.

Постановка проблеми. У останні роки у зв'язку з розвитком фізичної акустики, акустоелектроніки й дефектоскопії, методів вібраційної сейсмозв'язки й глибинного зондування земної кори, сейсмології та теорії розрахунку фундаментів споруд великий інтерес у нашій країні й за кордоном викликають задачі про коливання пружних середовищ, викликаних віброуючими джерелами, розміщеними як на границі, так і всередині середовища. У аналізі резонансних властивостей (власних частот коливань) ґрунтів сільськогосподарського призначення при обробці останніх робочими органами машин вібраційної дії можна використати досвід і результати досліджень вказаних вище наукових напрямків та дисциплін.

Накопичені на даний момент часу результати у розв'язуванні граничних задач динамічної теорії пружності досить численні. Детально вивчені закони розповсюдження пружних хвиль у складних середовищах, виявлені нові типи поверхневих й каналових хвиль, розвинуті методи потенціалу й граничних інтегральних рівнянь, які дозволяють розглядати дифракцію хвиль на внутрішніх і поверхневих неоднорідностях.

Важливе місце серед цих задач займають проблеми, пов'язані з дослідженням хвильових полів у пружному напівпросторі зі змінними за глибиною властивостями – швидкостями розповсюдження хвиль та щільністю. Така модель називається стратифікованим напівпростором, її частинним випадком є шаруватий напівпростір, у котрому зміни властивостей відбуваються стрибкоподібно. (До речі, ґрунти сільськогосподарського призначення (ГСП) належать саме до таких середовищ). Дослідженню законів розповсюдження хвиль у таких середовищах присвячена монографія [1], у якій основна увага приділяється променевому методу, а джерело коливань, як правило, не розглядається. Наявність джерела суттєво ускладнює як математичну постановку задачі, так і її розв'язок. Її дослідження у повній мірі неможливе без глибокого математичного аналізу крайових задач і без залучення ЕОМ.

Так, у випадку поверхневого джерела для розв'язку даного класу задач необхідно:

- 1) побудувати матрицю фундаментальних рішень для неоднорідного напівпростору;
- 2) для правильного формулювання умов випромінювання провести повний аналіз дисперсійних властивостей середовища;
- 3) з інтегральних рівнянь отримати невідомі контактні напруження;

4) розробити й реалізувати на ЕОМ ефективні алгоритми розрахунку хвильових полів у ближній та дальній зонах, а також енергії, що переноситься хвилями різних типів [2].

Для однозначного вирішення вихідної крайової задачі необхідно обрати контури інтегрування й гілки радикалів, які входять у інтегральне представлення розв'язку, так, щоб забезпечувалось виконання умов випромінювання. Неоднозначність виникає також за наявності кутових точок на границі області контакту. У цьому випадку необхідно попередньо визначити припустимий вид особливості напружень у околі кутових точок.

Аналіз публікацій за темою дослідження. Автори [2] протягом ряду років займалися розробкою теорії і розвитком прикладних методів розв'язку задач про збудження й розповсюдження хвиль, викликаних джерелами у стратифікованих середовищах [3 - 21]. Розвинута коректна математична теорія крайових задач й створений комплекс прикладних методів їх розв'язку, реалізований у програмах на ЕОМ, котрий дозволяє дати відповідь на цілу низку важливих питань щодо збуджуваних хвильових полів, зокрема про типи хвиль у середовищі, їх амплітудно-частотні характеристики й енергії, які переносяться, про взаємодію хвиль з об'єктами, які знаходяться на поверхні середовища. Проводиться також детальне кількісне вивчення енергетичних характеристик пружних хвиль й аналізується енергетичний баланс стратифікованого напівпростору. Проте дослідженню резонансних властивостей ГСП при дії вібрації приділялось, на думку авторів, недостатньо уваги.

Мета роботи полягає у встановленні основних резонансних властивостей та їх параметрів для ГСП при вібрації методами, розвиненими у [1 - 21].

Виклад основного змісту дослідження.

1. *Резонансні властивості ГСП скінченної товщини.*

Розглянемо модельну задачу для хвильового рівняння і на її прикладі продемонструємо загальну схему побудови розв'язку за допомогою перетворення Фур'є й з урахуванням принципів випромінювання [2]. Хвильова картина у акустичному середовищі (ГСП) визначається рівнянням [22]:

$$\Delta v = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – швидкість звуку у ГСП, E – модуль пружності (Юнга), ρ – щільність ГСП.

Нехай на поверхні ГСП, який займає смугу товщини h : $-\infty \leq x \leq \infty, -h \leq z \leq 0$ розміщене джерело гармонічних коливань (вібратор):

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right|_{z=0} = \operatorname{Re}[q(x)e^{-i\omega t}], \quad i^2 = -1, \quad x \in [-a; a]; \\ q \equiv 0, \quad x \notin [-a; a]; \\ v|_{z=-h} = 0, \quad -\infty \leq x \leq \infty. \end{cases} \quad (2)$$

Колівання припускають усталеними: $v(x, z, t) = \operatorname{Re}[u(x, z)e^{-i\omega t}]$. Комплексна амплітуда u задовольняє рівняння Гельмгольца:

$$\Delta u + k^2 u = 0, \quad k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (3)$$

де Δ – оператор Лапласа, де ω – кругова частота коливань, де k – хвильовий вектор (квадрат його модуля дорівнює $\frac{\omega^2}{c^2}$).

Тоді граничні умови для $u(x, z)$ приймають вид:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=0} = q, \quad u|_{z=-h} = 0, \quad \text{при } -\infty \leq x \leq \infty. \quad (4)$$

Розв'язок задачі (3) і (4) має вигляд [2]:

$$u(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\alpha, z) Q(\alpha) e^{-i\alpha x} d\alpha \quad (5)$$

де

$$Q(\alpha) = \int_{-\alpha}^{+\alpha} q(\xi) Q(\alpha) e^{-i\alpha\xi} d\xi, \quad K(\alpha, z) = \frac{\operatorname{sh}\{\gamma(z+h)\}}{\gamma \operatorname{ch}\{\gamma, h\}}, \quad (6)$$

$$\gamma = \gamma(\alpha) = \sqrt{\alpha^2 - k^2}, \quad \operatorname{Re} \gamma \geq 0, \quad \operatorname{Im} \gamma \leq 0. \quad (7)$$

Тут $U(\alpha, z) = K(\alpha, z) Q(\alpha)$ – функція, яка не має точок гілкування, але має лічену множину полюсів, які є нулями знаменника:

$$\zeta_l = \pm \sqrt{k^2 - \alpha_l^2}, \quad \alpha_l = \left(\frac{\pi}{2} + \pi l\right)/h, \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

При $k > \frac{\pi}{2h}$ скінчене число ζ_l розміщене на дійсній осі, інші – чисто уявні.

Таким чином, резонансні частоти прошарку ГСП глибиною h визначаються зі співвідношення:

$$\omega_n = \left(\frac{\pi}{2} + \pi n\right) \frac{c}{h} = \frac{(\frac{\pi}{2} + \pi n) \sqrt{E}}{h \sqrt{\rho}}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Лінійні частоти (резонансні) для того ж прошарку ГСП глибиною h визначаються наступним чином:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{(\frac{\pi}{2} + \pi n) \sqrt{E}}{2\pi h \sqrt{\rho}}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

У таблиці 1 наведені значення ω_n , 1/с й f_n , Гц для різних n, c, h .

Таблиця 1.

Резонансні частоти (ω_n й f_n) ГСП для різних $h, m, n, c, m/c$

n	c, м/с	h, м			
		0,05	0,10	0,15	0,20
1.	10	(942,5)/150*	(471,3)/75	(314)/50	(236)/37,5
	20	(1885)/300	(942,5)/150	(628)/100	(471)/75
	30	(2827,5)/450	(1414)/225	(942,5)/150	(707)/112,5
2.	10	(1571)/250	(785)/125	(524)/83,3	(393)/62,5
	20	(3142)/500	(1571)/250	(1047)/167	(1571)/125
	30	(4713)/750	(2356)/375	(1571)/250	(1178)/187,5
3.	10	(2199)/350	(1100)/175	(733)/117	(550)/87,5
	20	(4398)/700	(2199)/350	(1466)/233,3	(1100)/175
	30	(6597)/1050	(3299)/525	(2199)/350	(1650)/262,5
4.	10	(2827)/450	(1413,5)/225	(942,5)/150	(707)/112,5
	20	(5655)/900	(2827,5)/450	(1885)/300	(1414)/225
	30	(8481)/1350	(4241)/675	(2827,5)/450	(2121)/337,5
5.	10	(3456)/550	(1728)/275	(1152)/183,3	(864)/137,5
	20	(6912)/1100	(3456)/550	(2304)/366,7	(1728)/275
	30	(10368)/1650	(5184)/825	(3456)/550	(2592)/412,5

*Примітка. Верхнє число (чисельник) відповідає ω , 1/с; нижнє число (знаменник) відповідає f , Гц.

У таблиці 2 подані резонансні частоти ГСП (ω_0, f_0) для різних h, m й $c, m/c$ при $n = 0$ (найменші моди).

Таблиця 2.

Резонансні частоти ГСП ω_0 , 1/с, f_0 , Гц для різних h, m й $c, m/c$ при $n = 0$

c, м/с	h, м				
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
10	(314)/50	(157)/25	(104,7)/16,7	(78,5)/12,5	(62,8)/10
15	(471)/75	(235,5)/37,5	(157)/25	(117,8)/18,8	(94,2)/15
20	(628)/100	(314)/50	(209,3)/33,3	(157)/25	(125,7)/20
25	(385)/125	(392,5)/62,5	(261,7)/41,7	(196,3)/31,3	(157)/25
30	(942)/150	(471)/75	(314)/50	(235,5)/37,5	(188,5)/30
35	(1099)/175	(549,5)/87,5	(366,3)/58,3	(274,8)/43,8	(220)/35
40	(1256)/200	(628,4)/100	(419,1)/66,7	(314)/50,0	(251,3)/40

Таким чином, для найнижчої моди $n=0$ коливань ГСП при $c = (10 \dots 40)$, м/с, $h = (0,05 \dots 0,25)$, м маємо: $\omega_0 = (62,8 \dots 1256,7)$, 1/с, $f_0 = (10 \dots 200)$, Гц.

2. Резонансні властивості системи «ГСП – сейсмічний вібратор» для різних моделей основи (грунту).

А. Модель основи ґрунту Вінклера.

Розглянемо коливання системи «ГСП – сейсмічний вібратор» й визначимо його (ґрунту) резонансні частоти за моделлю основи Вінклера (рис.1).

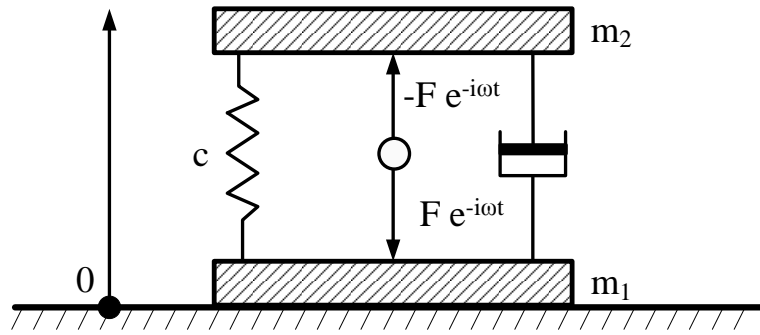


Рис.1 . Система «ГСП – сейсмічний вібратор»

Сейсмічний вібратор моделюється плитою з масою m_1 , який лежить без тертя на поверхні пружного середовища (ГСП) й зв'язаною з масою m_2 пружними і демпфіруючими зв'язками (рис.1).

На обидві маси діє навантаження $F e^{-i\omega t}$, $i^2 = -1$. Вертикальні коливання плити w_1 і з'єднаної з нею маси w_2 описуються рівнянням:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{w}_1 - k(\dot{w}_2 - \dot{w}_1) - c(w_2 - w_1) = F - Q \\ m_2 \ddot{w}_2 - k(\dot{w}_2 - \dot{w}_1) - c(w_2 - w_1) = -F \end{cases} \quad (11)$$

Тут $(\dot{w}) \equiv \frac{dw}{dt}$, $\ddot{w} \equiv \frac{d^2w}{dt^2}$, t – час, c – жорсткість пружного зв'язку, k – коефіцієнт тертя демпфіруючого зв'язку, F – сила, прикладено до плити, $-Q = -\iint_{\Omega} q_3 dx dy$ – реакція пружного середовища (ГСП) на занурення у нього плити, Ω – область контакту: $(x, y) \in \Omega$, $q_3 = K_{\text{пост}} w_1$, $K_{\text{пост}}$ – коефіцієнт постілі (Вінклера основи - ГСП), $\frac{H}{m^3}$.

Будемо вважати, що вібратор працює в усталеному гармонічному режимі з круговою частотою ω . Під w_1, w_2, F, Q – у подальшому будемо розуміти комплексні амплітуди відповідних величин. Вважаючи, що площа штамп (маси m_1), який контактує з ГСП, складає S з (11) можна отримати (враховуючи, що $\frac{d^n}{dt^n} \rightarrow (-i\omega)^n$):

$$\begin{cases} (-m_1 \omega^2 - i\omega k + c + K_{\text{пост}} S) w_1 + (i\omega k + c) w_2 = F \\ (i\omega k - c) w_1 + (-m_2 \omega^2 - i\omega k + c) w_2 = -F \end{cases}, \quad (12)$$

$$\text{Звідси: } w_1 = -\frac{\omega^2 m_2}{\Delta(\omega)}; w_2 = -\frac{(K_{\text{пост}} S - \omega^2 m_1)}{\Delta(\omega)} \quad (13)$$

$$\Delta(\omega) = \omega^2 m_2 (i\omega k - c) + (K_{\text{пост}} S - \omega^2 m_1) (\omega^2 m_2 - i\omega k + c) \quad (14)$$

Зрозуміло, що умова:

$$\Delta(\omega) = 0 \quad (14^*)$$

є умовою резонансу розглядуваної системи.

Якби була відсутньою реакція ГСП ($Q \equiv 0$), тоді поліном $\Delta(\omega)$, як поліном четвертого ступеня відносно ω , мав би чотири корені. За наявності $Q \neq 0$ (а, можливо, й $Q = Q(\omega)$) питання про кількість резонансів та їх розміщення у комплексній площині ω вимагає спеціальних аналітичних та чисельних досліджень (у подальшому, для спрощення задачі, вважаємо, що $K_{\text{пост}}$ не залежить від ω). Особливий інтерес представляють тут дійсні корені, котрим відповідають незатухаючі коливання системи з даною частотою.

Прирівнюючи нулю дійсну та уявну частини $\Delta(\omega)$ з (14), отримаємо 4 можливих частоти коливань розглядуваної системи ($\Omega_{1,2,3,4}$):

$$1) \quad \Omega_1 = 0 \text{ (можливе при } \omega \equiv 0 \text{ – статичний випадок, або } k = 0); \quad (15)$$

$$2) \quad \Omega_2 = \left\{ \frac{K_{\text{пост}} S}{m_1 + m_2} \right\}^{1/2}; \quad (16)$$

$$3) \quad \Omega_3 = \left\{ -\frac{1}{2} A_1 + \left[\frac{1}{4} A_1^2 + A_2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \text{ де: } A_1 = \frac{m_1 c + m_2 c - K_{\text{пост}} S m_2}{m_1} \quad (17)$$

$$A_2 = \frac{K_{\text{пост}} S c}{m_1 m_2};$$

$$4) \Omega_3 = +i \left\{ \frac{1}{2} A_1 + \left[\frac{1}{4} A_1^2 + A_2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

Коливання у системі відбуваються з частотами Ω_2, Ω_3 , а при $\Omega = \omega = \Omega_4$ виникає аперіодичних (затухаючий) у часі t процес.

Б. Модель основи (грунту) Пастернака.

У цьому варіанті моделі ГСП:

$$q_3 = K_{\text{пост}} w_1 + K_1 \frac{dw_1}{dt}, [K_1] = \frac{Hc}{M^3}, \quad (19)$$

де другий доданок у формулі (19) враховує швидкість руху штампу m_1 у ГСП. Тоді у виразі (14) слід здійснювати заміну:

$$K_{\text{пост}} S \Rightarrow K_{\text{пост}} S - i\omega K_1 S. \quad (20)$$

Отже, замість (14) у даному випадку матимемо:

$$\Delta^*(\omega) = \omega^2 m_2 (i\omega k - c) + (K_{\text{пост}} S - i\omega K_1 S - \omega^2 m_1)(\omega^2 m_2 - i\omega k + c). \quad (21)$$

Прирівнюючи нулю дійсну та уявну частини $\Delta^*(\omega)$ (21), отримаємо 4 можливих частоти коливань розглядуваної системи ($\Omega_{1,2,3,4}^*$):

$$1) \Omega_1^* = 0 \text{ (статичний випадок);} \quad (22)$$

$$2) \Omega_2^* = \left\{ \frac{k K_{\text{пост}} S + K_1 S c}{k(m_1 + m_2) - K_1 S m_2} \right\}^{1/2}, \text{ при цьому } \Omega_2^* \rightarrow \infty \quad (23)$$

(при $k(m_1 + m_2) \geq K_1 S m_2$)

$$3) \Omega_3^* = \left\{ -\frac{1}{2} A_1^* + \left[\frac{1}{4} (A_1^*)^2 + A_2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2},$$

де

$$A_1^* = \frac{m_1 c + m_2 c - K_{\text{пост}} S m_2 + K_1 S k}{m_1 m_2}, (A_2) \text{ див (17)} \quad (24)$$

$$4) \Omega_4^* = +i \left\{ \frac{1}{2} A_1^* + \left[\frac{1}{4} (A_1^*)^2 + A_2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad (25)$$

Коливання у системі відбуваються з частотами Ω_2^*, Ω_3^* , а при $\Omega^* = \omega = \Omega_4^*$ виникає аперіодичних (затухаючий) у часі t процес.

В. Скінченновимірна модель ГСП (ефект приєднаної маси ґрунту).

Розглянемо вертикальні коливання штампу w під дією навантаження F . Використовуючи [2], можна отримати після зрозумілих спрощень (рис. 2,а) наступну математичну модель коливань штампу на ГСП:

$$-m\omega^2 w = F - Q, \quad Q = w P_z, \quad (26)$$

де $(-P_z) = -\iint_{\Omega} q_3 d\Omega$ – реакція середовища на одиничні переміщення штампу,

$$w = \frac{F}{\tilde{\Delta}(\omega)}, \quad \tilde{\Delta}(\omega) = P_z(\omega) - m\omega^2. \quad (27)$$

(Тут Ω – область контакту штампу з ГСП).

Нехай $F = \text{const}$, переміщення штампу w цілком визначаються залежністю P_z від ω . Зокрема, якщо для всіх ω_R : $\tilde{\Delta}(\omega_R) = 0$, тоді при $\omega \rightarrow \omega_R w \rightarrow \infty$ – частота ω_R є резонансною.

Розглянемо для порівняння скінченновимірну модель ГСП. Замінюємо «реакцію середовища» (ГСП) на реакцію «приєднаної маси» (ГСП) M , зв'язаної зі штампом пружними та демпфіруючими зв'язками (рис. 2 б).

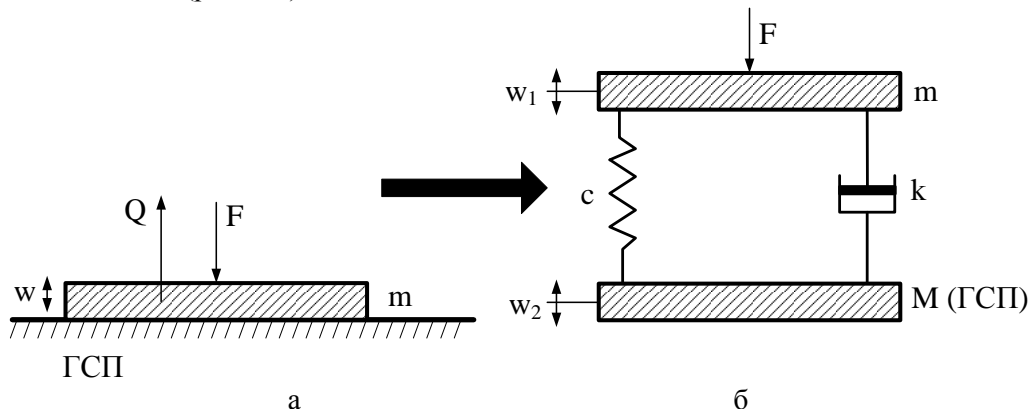


Рис. 2. Скінченновимірна модель взаємодії ГСП зі штампом

Координати центрів мас w_1, w_2 задовольняють системі

$$\begin{cases} m\ddot{w}_1 = F - c(w_1 - w_2) - k(\dot{w}_1 - \dot{w}_2), \\ M\ddot{w}_2 = c(w_1 - w_2) + k(\dot{w}_1 - \dot{w}_2), \end{cases} \quad (28)$$

з котрої для усталених гармонічних коливань маємо:

$$\begin{cases} w_1 = F \frac{(\beta - \omega^2 M)}{\tilde{\Delta}(\omega)}, \beta = c - i\omega k; \\ w_2 = F \frac{\beta}{\tilde{\Delta}(\omega)}, \tilde{\Delta}(\omega) = \omega^2 [\omega^2 m M - \beta(m + M)]. \end{cases} \quad (29)$$

З $\tilde{\Delta}(\omega_R) = 0$ випливає:

$$\omega_R = \sqrt{\beta \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{m} \right)}. \quad (30)$$

Порівнюючи (27) та (29), отримаємо, що у прийнятому наближенні реакція середовища P_z дається виразом:

$$\tilde{P}_z = -\frac{\beta \omega^2 M}{\beta - \omega^2 M}. \quad (31)$$

Зрозуміло, \tilde{P}_z не може описувати реакцію середовища (ГСП) в усьому діапазоні частот, якщо не припустити, що β й M залежать від ω . Іншими словами, параметри моделі c, k, M повинні підбиратись для кожної конкретної частоти ω , модель «налаштовують» на дану частоту, і користуватись цією моделлю (ГСП) можна тільки у деякому околі даної частоти. Зокрема, у зоні квазістатисти ($\omega < 1,57$) P_z – дійсна величина, тому $k = 0$.

На частотах власних коливань прошарку ГСП, де $P_z = 0$, повинні перетворюватись у нуль або зв'язки k, c , або приєднана маса M .

З (30) випливає, що ω_R зменшується із збільшенням маси штамп m або приєднаної маси ГСП M й зростає зі збільшенням жорсткості c .

Введемо поняття питомого (на одиницю площі штамп) коефіцієнта пружності ГСП - $\chi, \frac{H}{m^2}$. Тоді, нехтуючи в'язкими властивостями ГСП ($k \rightarrow 0$), можна ω_R подати наступним чином:

$$\omega_R^2 = \frac{\chi S}{m} \left(1 + \frac{m}{M} \right), \quad (32)$$

де S – площа поверхні штамп m (поверхні контакту m з ГСП).

Звідси знаходимо формулу для ω_R :

$$\omega_R = \sqrt{\frac{\chi S}{m} \left(1 + \frac{m}{M} \right)^{1/2}}, \quad (33)$$

Тоді

$$\Omega_R = \frac{\omega_R}{\sqrt{\frac{\chi S}{m}}} = \left(1 + \frac{m}{M} \right)^{1/2}. \quad (34)$$

Таким чином, враховуючи властивості ГСП за допомогою коефіцієнту χ , можна констатувати, що ω_R зростає при збільшенні χ, S – штампу і залежить від $\frac{m}{M}$ (рис. 3).

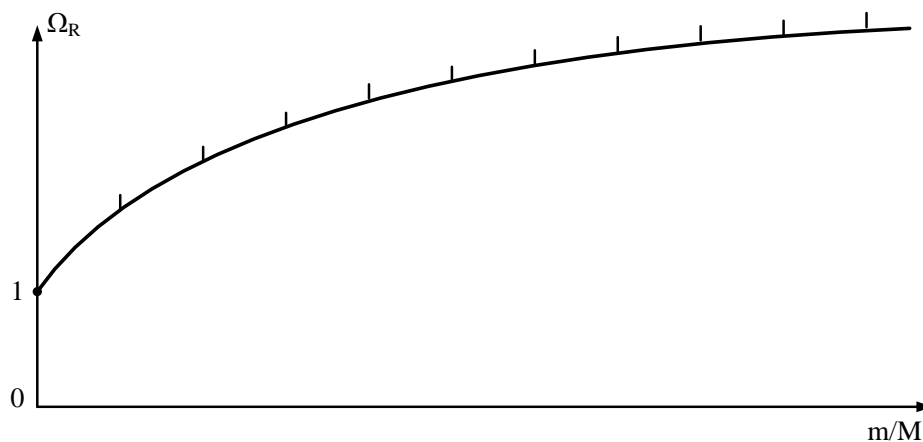


Рис. 3. Залежність Ω_R від $\frac{m}{M}$

Якщо позначити:

$$\sqrt{\frac{\chi S}{m}} = \omega_0, \quad (35)$$

тоді залежність ω_R від $\frac{m}{M}$ набуває вигляду (рис. 4).

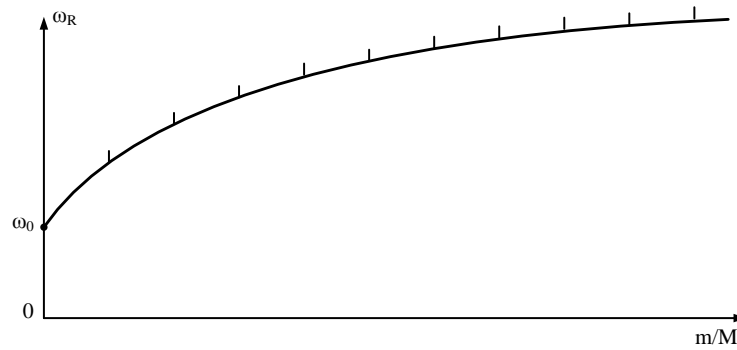


Рис. 4. Залежність ω_R від $\frac{m}{M}$

Аналітично залежність, зображену на рис. 4, можна подати у вигляді:

$$\omega_R = \omega_0 \left(1 + \frac{m}{M}\right)^{1/2}. \quad (36)$$

Як випливає з (36), $\omega_R \rightarrow \omega_0$ при $\frac{m}{M} \rightarrow 0$, тобто при $\frac{m}{M} \ll 1$. У таблиці 3 подані значення $\frac{\omega_R - \omega_0}{\omega_0} = \delta$ для різних відношень $\frac{m}{M}$. Зазначимо, що:

$$\delta = \left(1 + \frac{m}{M}\right)^{1/2} - 1. \quad (37)$$

Параметр δ характеризує наскільки ω_R відмінна від ω_0 за інших однакових умов (для різних $\frac{m}{M}$).

Таблиця 3.

Залежність δ від $\frac{m}{M}$ ($\frac{m}{M} < 1$)

m/M	δ
0,1	0,0488
0,2	0,0954
0,3	0,1402
0,4	0,1832
0,5	0,2247
0,15	0,0724
0,25	0,1180
0,35	0,1619
0,45	0,2042
$1/\infty = 0$	0

Аналіз результатів таблиці 3 свідчить про те, що при $\frac{m}{M} = (0,1 \dots 0,5)$ значення ω_R відрізняється (у сторону збільшення) від $\omega_0 = \sqrt{\frac{\chi S}{m}}$ на (4,88 ... 22,47)%. Отже, частота ω_0 , яка залежить від геометричних характеристик штампу (S), його маси (m) та питомого коефіцієнта пружності (χ) ГСП може слугувати досить точною (при інженерних розрахунках) оцінкою ω_R прошарку ГСП. (Відхилення тим менші, чим менше $\frac{m}{M}$). Зазвичай, $\frac{m}{M} > 1$ і M складає (20 ... 40)% m . У таблиці 4 подані значення δ для випадку $\frac{m}{M} > 1$.

Таблиця 4.

Залежність δ від $\frac{m}{M}$ ($\frac{m}{M} > 1$)

m/M	δ
20	3,5826
10	2,3166
3	1
2	0,7321
1	0,4142
0,8	0,3416
0,6	0,2649

Так, при $\frac{m}{M} = 5$ ($M = 0,2m$) $\delta = 1,4495$; при $\frac{m}{M} = 2,5$ ($M = 0,4m$) $\delta = 0,8708$.
 Отже, при $\frac{m}{M} > 1\omega_R$ суттєво відрізняється від ω_0 , а саме від 358% до 26,5% ($\frac{m}{M} = 20 \dots 0,6$).
 Таким чином, у цьому випадку ω_0 не може слугувати для кількісної оцінки ω_R .
 На рис.5 подана залежність δ від $\frac{m}{M}$.

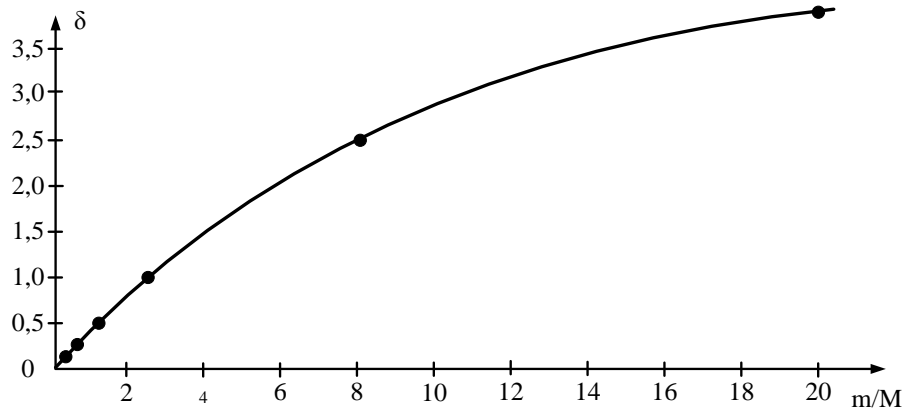


Рис. 5. Залежність δ від $\frac{m}{M}$

Висновки

1. Визначені аналітично й чисельно резонансні частоти коливання ґрунтів сільськогосподарського призначення (ГСП) для різних товщин (H) їх прошарків та для різних значень пружних та фізико-механічних властивостей.
2. Знайдені аналітичним шляхом резонансні частоти ГСП для різних моделей ґрунту (Вінклера, Пастернака та скінченновимірної з «приєднаною масою» ГСП).
3. Отримані результати можуть у подальшому слугувати для визначення резонансних частот коливань ГСП, викликаних робочими органами сільськогосподарських машин вібраційної дії та для уточнення і вдосконалення інженерних методів розрахунку і проектування таких машин.

Література:

1. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах./ Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 320 с.
2. Бабешко В.А. Динамика неоднородных линейно-упругих сред./ В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Ж.Ф. Зинченко. – М.: Наука Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 344 с.
3. Бабешко В.А. К теории динамических контактных задач. /В.А. Бабешко// ДАН СССР. – 1971. – Т.201, №3.
4. Бабешко В.А. Асимптотические свойства решений некоторых двумерных интегральных уравнений. /В.А. Бабешко// ДАН СССР. – 1972. – Т.206, №5.
5. Бабешко В.А. О единственности решения интегральных уравнений динамических контактных задач. /В.А. Бабешко// ДАН СССР. – 1973. – Т.210, №6.
6. Бабешко В.А. Новый эффективный метод решения динамических контактных задач. /В.А. Бабешко// ДАН СССР. – 1974. – Т.217, №4.
7. Бабешко В.А. Метод факторизации в статических и динамических задачах теории упругости. /В.А. Бабешко// Докторская диссертация. – М.: ИПМ АН СССР, 1974.
8. Бабешко В.А. Новый метод в теории в пространственных динамических контактных задач. /В.А. Бабешко// ДАН СССР. – 1978. – Т.242, №1.
9. Бабешко В.А. Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. /В.А. Бабешко. – М.: Наука, 1984. – 400 с.
10. Бабешко В.А. К проблеме динамически контактных задач в произвольных областях. /В.А. Бабешко Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова// Известия АН СССР. МТТ. – 1978. - №3.
11. Бабешко В.А. Об особенностях в угловых точках пространственных штампов в контактных задачах. /В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова //ДАН СССР. – 1981. – Т.257, №2.
12. Бабешко В.А. Установившиеся колебания массивных объектов на поверхности упругой среды./В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, Ж.Ф. Зинченко. – Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т, 1981. Деп. в ВИНТИ 22.01.82, №290–82 - 250 с.

13. Бабешко В.А. О резонансных свойствах системы штампы-упругий слой./ В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова. – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 1985. Деп. в ВИНТИ 04.12.85, №8329–В - 138 с.
14. Бабешко В.А. Выделение особенностей в угловых точках пространственных штампов в контактных задачах./В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова. – Ростов-на-Дону: Ростовский гос. ун-т, 1980. Деп. в ВИНТИ 22.12.80, №5410–80-315 с.
15. Ворович И.И. Неклассические смешанные задачи теории упругости. /И.И. Ворович, В.М. Александров, В.А. Бабешко. – М.: Наука, 1974. –280 с.
16. Ворович И.И. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей. /И.И. Ворович, В.А. Бабешко. – М.: Наука, 1979. –420 с.
17. Глушков Е.В. Распределение энергии поверхностного источника в неоднородном полупространстве. /Е.В. Глушков //ПММ. – 1983. – Т.47, №1.
18. Глушков Е.В. Плоская задача о колебании штампа на слое. /Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова //Изв. СКНЦ ВШ – 1979. – №1.
19. Бабешко В.А. Резонансные явления в многослойном полупространстве. /В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова, Ж.Ф. Зинченко //ДАН СССР. – 1986. – Т.286, №4.
20. Бабешко В.А. Анализ волновых полей, возбуждаемых в упругом стратифицированном полупространстве, поверхностными источниками. /В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова //Акустический журнал. – 1986. – Т.32, Вып. 3.
21. Бабешко В.А. Методы построения матрицы Грина стратифицированного упругого полупространства /В.А. Бабешко, Е.В. Глушков, Н.В. Глушкова //ЖВМ и МФ. – 1987. – Т.27, №1.
22. Котляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики. /Н.С. Котляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 638 с.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2016.

Л.М. Дацюк, С.Ф. Юхимчук, Т.Л. Дацюк
Луцький національний технічний університет
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПОНУВАННЯ КОЛІСНИХ ЛІСОВИХ
ХАРВЕСТЕРІВ

Подано аналіз технічних характеристик колісних лісових харвестерів провідних світових фірм-виробників і апроксимовано залежності взаємозв'язку їх параметрів. Обґрунтовано параметри загального компоновання харвестерів для роботи у лісових умовах експлуатації, а також сформовано експлуатаційні вимоги до них.

Ключові слова: лісовий харвестер, компоновання, харвестер, ліс, технологічний процес, сортимент

Л.Н. Дацюк, С.Ф. Юхимчук, Т.Л. Дацюк
ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНОВКИ КОЛЕСНЫХ ЛЕСНЫХ ХАРВЕСТЕРОВ

Подан анализ технических характеристик колесных лесных харвестеров ведущих мировых фирм-производителей и аппроксимированы зависимости взаимосвязи их параметров. Обоснованно параметры общей компоновки харвестеров для работы в лесных условиях эксплуатации, а также сформированы эксплуатационные требования к ним.

Ключевые слова: лесной харвестер, компоновки, Харвестер, лес, технологический процесс, сортимент

L. Datsiuk, S. Yuhymchuk, T. Datsiuk
THE SUBSTANTIATION OF OPTIONS OF REASONABLY WHEELED FOREST
HARVESTER

The analyzed of technical descriptions is given wheeled forest harvester of leading world firms-producers and dependences of intercommunication of their parameters are approximated. The substantiation of options general of reasonably harvester for work in forest external environments, and also operating requirements are formed to them.

The harvester is used in the first stage of timber harvesting. It provides tree felling, cutting branches and bucking barrel cut-to-length required length, the formation of the assortment of timber.

At the stage of conceptual layout selection options projected forest machine it is advisable to carry out on the basis of weight and geometric analogies.

To perform this task, it is advisable on the basis of the technical data sheets of harvesters, to be a supporting table on which to build the relationship between the weight and the geometric parameters of similar machines. Built according to table graphic dependences are approximated functions or linear expressions will allow with sufficient accuracy to determine the parameters of harvesters.

On the basis of the research dependences characterizing the mode of operation of the harvester: the length of the moving distance of movement of the harvester; the length of cut of the volume of the trunk; duration pruning of the volume of the trunk. Dependencies are installed for different configurations of harvesters.

Unstable production and natural conditions are forced to adopt new methods and ways to respond appropriately and to ensure the implementation of timber harvesting in difficult conditions. Therefore, harvester with a combined wheeled chassis in combination with other mechanisms are promising vehicles to create so-called combined technologies.

Keywords: forest harvesters, layout, havester, timber, process, assortment

Постановка проблеми. Важливим завданням лісових підприємств України є забезпечення безперервного і невиснажливого використання лісових ресурсів та задоволення потреб народного господарства у деревині за умови розширеного відтворення і поліпшення породного складу та якості лісів, а також підвищення їх продуктивності. Поряд із комплексом лісівничих заходів, одним із визначальних чинників вирішення цієї складної і надзвичайно актуальної проблеми є широке запровадження прогресивних екологоощадних технологічних процесів з використанням сучасних систем лісових машин [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З літературного огляду встановлено проблеми, які впливають на ефективність ведення лісогосподарських і лісозаготівельних робіт [3, 5-7]: відсутність або дуже низька густина лісових доріг; традиційну стовбурну технологію витісняє сортиментна; на застосування технологічних процесів лісозаготівлі із застосуванням харвестерів впливає їх компоновання. Тому дослідження, пов'язані із аналізом параметрів компоновання колісних лісових харвестерів для застосування їх у технологічному процесі лісозаготівлі є актуальними.

Мета дослідження є встановлення на підставі аналізу технічних характеристик однотипних машин раціональних параметрів харвестера, здатного працювати у складних лісових умовах.

Результати дослідження. Обґрунтування параметрів компоновання харвестерів [4-6], аналіз умов експлуатації, особливості конструкції, технічні характеристики та класифікація (рис. 1) уже

існуючих харвестерів провідних світових фірм-виробників: Швеції, Фінляндії, США, Словаччини, Словенії, Німеччини, Чехії, Польщі, Білорусі та України системно проаналізовано. В процесі аналізу з'ясовано, що базою понад 50% розглянутих машин є модифіковані колісні трактори потужністю 60-200 кВт. Харвестери оснащені гідроманіпуляторами з вантажним моментом 300-1300 кН·м; виліт стріли коливається в межах 6-10 м і обумовлюється технологічними особливостями роботи машини та довжиною сортиментів.

Харвестер використовується на першій стадії заготівлі деревини. Він забезпечує звалювання (зрізування) дерева, обрізування гілок і розкрязування стовбура на сортименти потрібної довжини, формування (пакування) сортиментного лісоматеріалу. Зараз на ринку переважають однозахоплювальні харвестери: головка кріпиться до гідроманіпулятора. Кожен харвестер оснащено системою вимірювання та управління, що базується на сучасному комп'ютері, який стежить, щоб дерево розпилювалося на потрібні довжини, а також може визначати об'єми заготівлі. Усю інформацію в режимі реального часу можна відправляти на підприємство. Завдяки вартісній та розділювальній оцінці, GPS і т.п. можна отримати повну інформацію про продуктивність харвестера та його місцезнаходження. Відмінними особливостями харвестерів є достатній запас потужності, хороша прохідність і стійкість, відмінний огляд з кабіни оператора, висока міцність та витривалість.

Сьогодні у світі домінують дві тенденції у створенні лісових машин: енергетичним модулем для них використовується наявна модель сільськогосподарського чи промислового трактора або розробляється конструкція спеціальної машини, пристосованої до конкретних умов роботи в лісі. Перший напрям відрізняється нижчою собівартістю створених лісових машин, але й вищими витратами на їх експлуатацію. Спеціально спроектовані лісові машини є надійнішими і економічнішими в експлуатації, хоч їх початкова вартість є вищою.

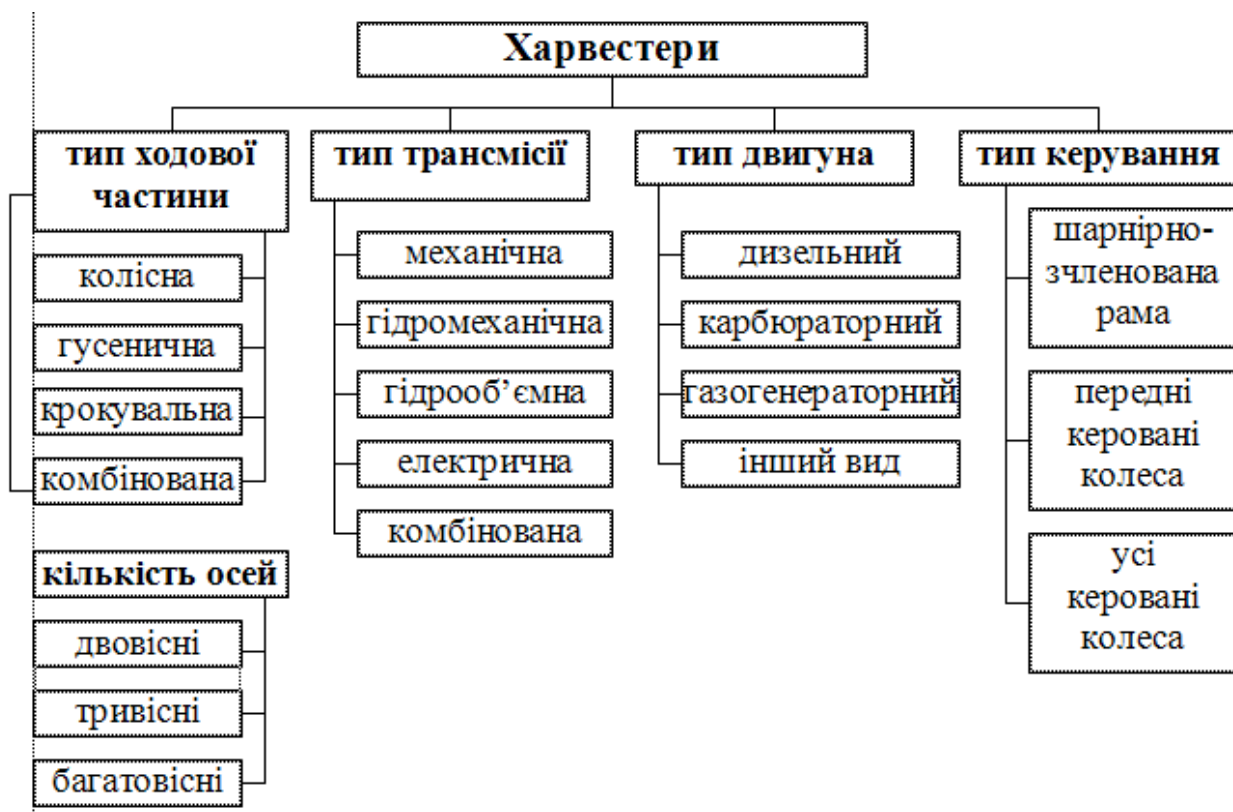


Рис. 1 - Класифікація харвестерів

Для оцінки експлуатаційних властивостей машин-аналогів та прийняття відповідних рішень щодо проектованої машини проводять розрахунок окремих відносних показників, зокрема питомої потужності $N_{i\epsilon\delta}$, максимальної тягової сили $D_{0\max}$, максимального динамічного фактора $D_{0\max}$ тощо.

На стадії ескізного компоновання вибір параметрів проектованої лісової машини доцільно здійснювати на підставі вагових і геометричних аналогій [7, 8]. З використанням запропонованого

методу побудовано кореляційні залежності між головними енергетичними, геометричними і ваговими параметрами лісових машин. Для однотипних за конструкцією і призначенням машин спостерігаються досить чіткі залежності між власною масою машин та їх геометричними та енергетичними параметрами.

Для виконання цього завдання доцільно на підставі таблиць із технічними параметрами харвестерів, скласти допоміжну таблицю, за якою побудувати залежності між ваговими та геометричними параметрами однотипних машин. Побудовані за даними таблиць графічні залежності апроксимуються степеневими або лінійними виразами, які дозволять із достатньою точністю визначати геометричні параметри харвестерів.

Дослідження вирубки вибіркової хвойної посадки комбайном John Deere 770D (рис. 2), показало таку структуру робочих операцій: обрізування гілок – 36%, переходи – 11%, перерви – 11%, спилування – 6%. Відмінності можуть з'явитися в структурі робочих операцій за рахунок відмінності технологій і умов, в яких машина працює.

Взаємним встановленням кореляційних залежностей між тривалістю окремих робочих операцій і дендрометричними величинами, виявлено статистично важливу залежність між часом зрізування і часом обрізування гілок дерева до його об'єму.

Для встановлення максимального об'єму стовбурів, які може зрізати харвестер відповідного класу і комплектації:

$$Q_{\text{до}} = \frac{l \cdot \pi \cdot d_{\text{max}}^2}{4} \quad (1)$$

де l – довжина (середньостатистична) зрізаних дерев; d_{max} – максимальний діаметр стовбура.

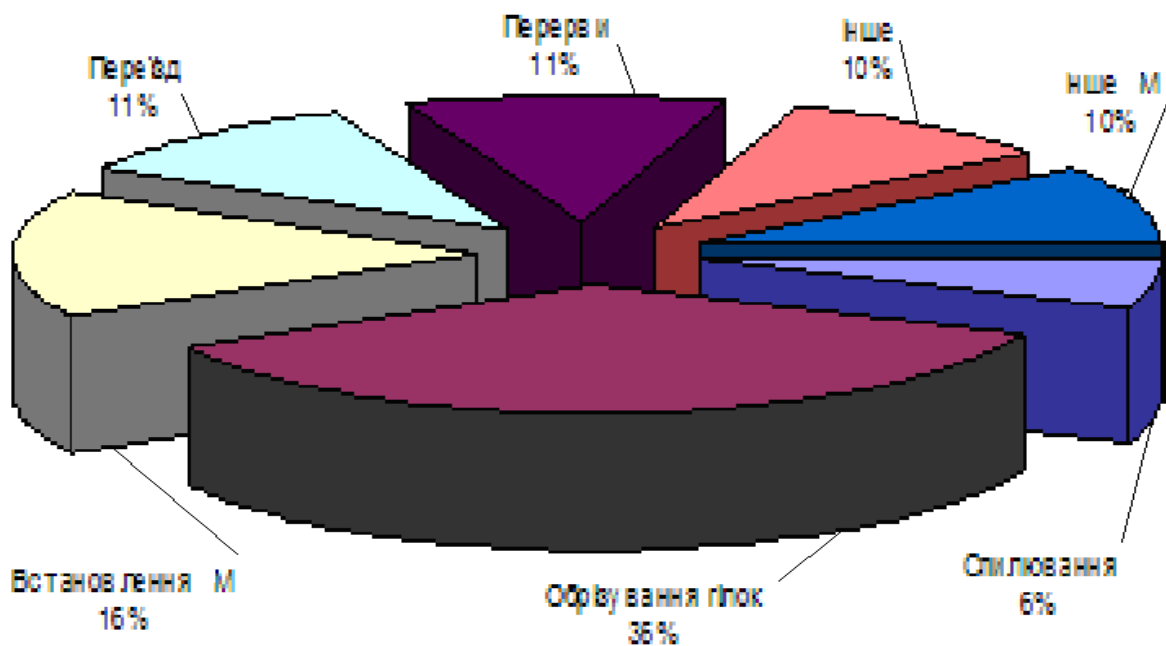


Рис. 2 - Структура робочих операцій харвестера: підготовка – 16%, перехіди – 11%, перерви – 11%, інше в сумі – 20%, спилування – 6%, обрізування гілок – 36%

З графіка (рис. 3) видно, що значення коефіцієнта кореляції коливається на рівні $R = 0,8861$, що свідчить про тісну залежність. На діапазон значень в значній мірі впливає об'єм стовбура. Коефіцієнт детермінації коливається на рівні $R_2 = 0,79$, з чого випливає, що 79% залежного значення (тобто час спилування) є під впливом незалежного значення (тобто об'єм стовбура). Діапазон значень має логічну послідовність, це означає, що зі збільшенням об'єму збільшується значення часу спилування. Між часом обрізування гілок і об'ємом стовбурів існує певна залежність, що відчутна для значення коефіцієнта кореляції $R = 0,6886$. Вона трохи нижча, що

пов'язано насамперед з тим, що зі зростанням об'єму стовбурів, зростає проблема з обрізуванням їх гілок та обробкою.

Річна продуктивність харвестера розраховується за формулою:

$$\dot{I}_{\delta} = \dot{I}_{\zeta i} \cdot \ddot{A}_{\delta} \cdot k_{\zeta i} \cdot k_m \cdot k_p \quad (2)$$

де $\dot{I}_{\zeta i}$ – змінна продуктивність машини, $\text{л}^3/\zeta\text{г}$; \ddot{A}_{δ} – кількість робочих днів у році; $k_{\zeta i}$ – коефіцієнт змінності; k_m – коефіцієнт технічної готовності; k_p – коефіцієнт, який враховує резерв справних машин.

Змінна продуктивність розраховується за формулою:

$$\dot{I}_{\zeta i} = \frac{(t_{\zeta i} \cdot t_{i\zeta} \cdot t_{i\delta a}) \cdot Q_{\text{нб}}}{t_{\delta}} \quad (3)$$

де $t_{\zeta i}$ – тривалість зміни ($t_{\zeta i} = 480$ хв.); $t_{i\zeta}$ – час підготівельно-заклучних робіт; $t_{i\delta a}$ – час організаційних та технологічних простоїв; $Q_{\text{нб}}$ – об'єм зрізаного стовбура, л^3 ; t_{δ} – тривалість циклу, хв.

Нестабільні виробничі та природні умови змушують застосовувати нові методи і способи, як ефективно реагувати і забезпечувати реалізацію заготівлі деревини в складних умовах. Тому харвестери з комбінованим колісним шасі в комбінації з іншими механізмами є перспективними машинами для створення так званих комбінованих технологій.

Робочі операції з обрізування гілок дерева завжди будуть займати найбільшу частку робочого часу зі всіх робочих операцій під час лісозаготівельних робіт, але порівняно з класичною моноручною технологією, вони, як і раніше, займають незначний відсоток. Частки інших робочих операцій будуть залежати від умов конкретних лісових посадок та інших чинників (технічний стан машини, оператор, економічний спосіб, тип заготівлі, інтенсивність втручання, пора року, погодні умови тощо), які впливають на виробничий процес.

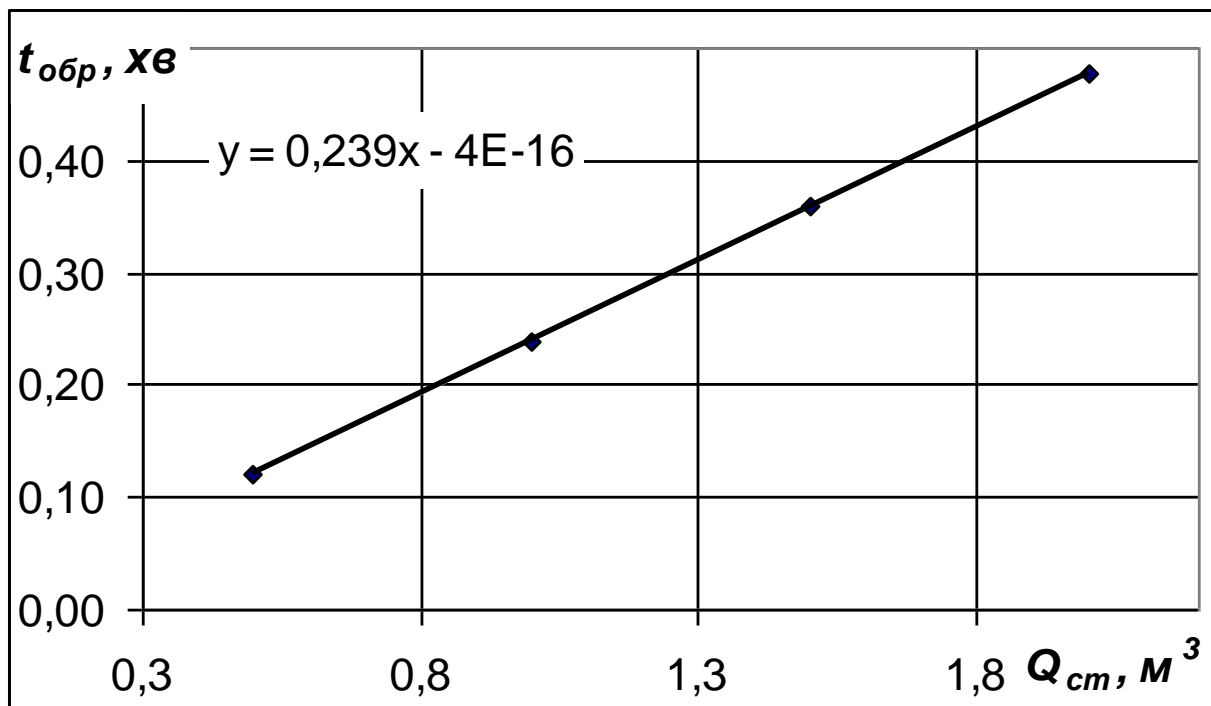


Рис. 3 - Залежність тривалості обрізування гілок крони харвестером від об'єму стовбура

Висновок. На підставі аналізу літературних та електронних джерел інформації подано технічні характеристики харвестерів провідних зарубіжних виробників, встановлено типи, класифікацію та вимоги до них, а також вибрано методику розрахунку геометричних і вагових характеристик. Це дозволило виконати розрахунки і обґрунтувати основні параметри харвестерів з колісною формулою 4×4, 6×6, 8×8.

Завдяки розробленій комп'ютерній програмі, виконано обчислювальний експеримент. Аналізуючи результати отриманих даних запропоновано такі параметри для харвестерів:

з колісною формою 4×4: потужність двигуна $N_{e\max} = 100$ кВт, власна маса $m = 12$ т, тягова сила $P = 100$ кН, довжина $L = 5,0$ м, ширина $B = 2,62$ м, висота $H = 3,9$ м, дорожній просвіт (кліренс) $h = 0,61$ м;

колісною формою 6×6: потужність двигуна $N_{e\max} = 160$ кВт, власна маса $m = 18$ т, тягова сила $P = 160$ кН, довжина $L = 8,5$ м, ширина $B = 3,0$ м, висота $H = 3,9$ м, дорожній просвіт (кліренс) $h = 0,60$ м;

з колісною формою 8×8: потужність двигуна $N_{e\max} = 200$ кВт, власна маса $m = 20$ т, тягова сила $P = 190$ кН, довжина $L = 8,5$ м, ширина $B = 3,0$ м, висота $H = 3,8$ м, дорожній просвіт (кліренс) $h = 0,65$ м;

Виконано аналіз структури робочих операцій харвестерів, встановлено залежності тривалості переїзду від відстані переїзду, тривалість зрізування від об'єму стовбура та тривалість обрізування гілок від об'єму стовбура для харвестерів різних комплектацій (4×4, 6×6, 8×8).

Для означених харвестерів встановлено залежності змінних та річних значень продуктивності від об'єму зрізаного стовбура залежно від їх параметрів.

Запропоновані параметри харвестера можуть бути використані для конструкторсько-технологічного обґрунтування під час розроблення перспективних моделей.

Література:

1. Анисимов Г.М. и др. Лесные машины. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 512 с.
2. Система машин в лесном хозяйстве: Учебник для вузов / В.Н. Винокуров, Н.В. Еремин; Под ред. В.Н. Винокурова. – М.: Издательский центр Академия, 2004. – 320 с.
3. І. М. Зима, Т. Т. Малюгін. Механізація лісгосподарських робіт.: Підручник. – 4-е вид., перероб. і доп. – Київ: Фірма "ІНКОС", 2006. – 488 с.
4. Жуков А.В. Теория лесных машин. – Мн.: БГТУ, 2001. – 640 с.
5. Білик Б.В. Проектування самохідних лісових машин. – К.: ІЗМН, 1998. – 140 с.
6. Білик Б.В., Адамовський М.Г. Проектування самохідних лісових машин: Вибір параметрів, компоновання і тяговий розрахунок. – Львів: ЗУКЦ, 2004. – 160 с.
7. Библюк Н.І., Стиранівський О.А., Борис М.М., Герис М.І. Аналіз динамічних процесів і обґрунтування параметрів загальної компоновки колісних тракторних агрегатів// Науковий вісник: Збірн. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 1994. – Вип. 1. – 39-42. с.
8. Орлов С.Ф. Теория и применение агрегатных машин на лесозаготовках. – М.: Гослесбумиздат, 1963. – 271 с.
9. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
10. Немцов В.П., Шестаков Б.А. Справочник механика лесозаготовительного предприятия. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 480 с.

Рецензент д.т.н., проф. М.П. Ярошевич.

Стаття надійшла до редакції 05.11.2016.

УДК: 62.67.53

Ю.В. Єгоров*Національний технічний університет України "КПІ імені Ігоря Сікорського"***ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКТОРА У ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛА НАГРІВУ У ПРОЦЕСІ FDM ДРУКУ**

Розглянуто технічну можливість використання індуктора у якості джерела нагріву у процесі FDM друку. Також розглянуто основні конструктивні проблеми що необхідно вирішити для успішного промислового використання. Дана приблизна оцінка потужності блоку живлення необхідного для успішного використання технології.

Ключові слова: 3d друк, індуктор, зварювальна дуга.

Ю.В. Егоров*Национальный технический университет Украины "КПИ имени Игоря Сикорского"***ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУКТОРА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА НАГРЕВА В ПРОЦЕССЕ FDM ПЕЧАТИ**

Рассмотрена техническая возможность использования индуктора в качестве источника нагрева в процессе FDM печати. Также рассмотрены основные конструктивные проблемы которые необходимо решить для успешного промышленного использования. Дана примерная оценка мощности блока питания необходимого для успешного использования технологии.

Ключевые слова: 3d печать, индуктор, сварочная дуга.

Y. Yehorov*National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute "***POSSIBILITY OF THE USING OF AN INDUCTOR AS A HEAT SOURCE DURING FDM PRINTING EVALUATION**

Considered technical possibility of using an inductor as a heating source in the FDM printing. Also, considered the basic structural problems that must be solved for the successful industrial use. Given crude estimate of the power supply output power required for a successful use of technology. Considered existing 3D printing technologies used for printing of metals and metal compounds. Considered methods of control equipment protection from high frequency noise induced by electromagnetic field of inductor. Identified mathematical problems decision of which is necessary to provide the stability of the printing process.

Key words: 3d printing, inductor, welding arc

Постановка проблеми. У рамках IV-ї науково технічної революції 3d друк набуває дедалі більшого розповсюдження. Існує багато технологій 3d друку, але на даний момент найбільш доступною є технологія пошарового наплавлення (Fused deposition modeling, FDM). Основними перевагами цієї технології є її простота та доступність. Однак FDM друк має ряд серйозних недоліків: відносно низьку деталізацію та обмежена сфера застосування. Оскільки для FDM друку використовують матеріали із температурою плавлення 200-300°C, такі як PLA, ABS, PVA-пластик, нейлон, фото полімери і т.д., основні сфери застосування цієї технології це дизайн, прототипування та виготовлення форм для лиття. Одна з важливих проблем, що стоїть перед конструкторами усього світу, це розробка технології FDM друку металом. Вирішення цієї проблеми дало б змогу значно знизити ціну кінцевих продуктів за рахунок відмови від лиття, а також вдосконалювати вже існуючі інженерні рішення у всіх машинобудівних галузях за рахунок використання геометричних форм, що зараз є недоступні через неможливість виготовлення деталей такої форми.

Наразі існує два типи FDM 3d друку металом. У першому випадку використовуються металомісткі речовини такі як металічні порошки, композитні наноматеріали і т.ін. основним недоліком такого підходу є складність таких матеріалів у виготовленні і їх ціна, що нівелює переваги самої технології FDM друку. Інший підхід використання дуги у якості джерела теплоти для розплавлення металевго дроту, по суті це модернізована технологія дугового наплавлення металів, що являє собою нанесення розплавленого металу на оплавлену металеву поверхню з наступною його кристалізацією для створення шару з заданими властивостями і геометричними параметрами. Наплавлення застосовують для відновлення зношених деталей, а також при виготовленні нових деталей з метою отримання поверхневих шарів, що володіють підвищеними твердістю, зносостійкістю, жароміцних, стійкістю до агресивного впливу кислот та ін... При більшості методів наплавлення, так само як і при зварюванні, утворюється рухлива зварювальний ванна. У головній частині ванни основний метал розплавляється і переміщується з електродним

металом, а в хвостовій частині відбуваються кристалізація розплаву металу. Наплавляти можна шари металу як однакові за складом, структурою та властивостями з металом деталі, так і такі, що значно відрізняються від основи. Метал, що наплавляється, вибирають з урахуванням експлуатаційних вимог і здатності до зварювання. Наплавлення може проводитися на плоскі, циліндричні, конічні, сферичні та інші форми поверхні в один або кілька шарів. Товщина шару наплавлення може змінюватися в широких межах - від часток міліметра до сантиметрів. При напавленні поверхневих шарів з заданими властивостями, як правило, хімічний склад напавленого металу істотно відрізняється від хімічного складу основного металу. Тому при напавленні повинен виконуватися ряд технологічних вимог. В першу чергу такою вимогою є мінімальне розведення спрямованого шару основним металом, розплавляється при накладенні валиків. Недоліки цього підходу це складність контролю процесу друку, наявність фізико-хімічних явищ пов'язаних із реагуванням перегрітого металу із навколишнім середовищем, що значно знижують якість кінцевого продукту та необхідність використання високопотужних джерел живлення для підтримання процесу горіння дуги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тематикою 3d друку займається ряд науковців, серед яких Christopher Barnatt, який у своїй роботі розглядає можливості та перспективи розвитку який у своїй роботі «3d printing» розглядає можливості та перспективи розвитку 3d друку, Brian Evans у своїй роботі «Practical 3D Printers» розглядає конструкційні особливості 3d принтерів для різних технологій 3d друку, Dag Lukkassen у своїй роботі «Advanced Materials and Structures and their Fabrication Processes» розглядає особливості різних матеріалів та способи виготовлення моделей з цих матеріалів. Недоліком цих робіт на думку автора є достатньо одноманітний підхід до проблеми 3d друку металом. У всіх цих роботах розглядається лише технології пошарового напавлення та спікання металевих порошків. Нажаль у них зовсім не розглянута можливість використання альтернативних джерел тепла.

Постановка завдань. В роботі поставлено мету - оцінити можливість використання індуктора у якості джерела нагріву металевих дроту у пристрої для FDM 3d друку; визначити напрями для подальших досліджень.

Викладення основного матеріалу. Індукційний нагрів металів заснований на двох фізичних законах: законі електромагнітної індукції Фарадея-Максвелла і законі Джоуля-Ленца. Металеві тіла (заготовки, деталі та ін.) Поміщають в змінне магнітне поле, яке збуджує в них вихрове електричне поле. ЕРС індукції визначається швидкістю зміни магнітного потоку. Під дією ЕРС індукції в тілах протікають вихрові (замкнуті усередині тіл) струми, що виділяють теплоту за законом Джоуля-Ленца. Ця ЕРС створює в металі змінний струм, тепла енергія, що виділяється даними струмами, є причиною нагрівання металу. Індукційний нагрів є прямим і безконтактним. Він дозволяє досягати температури, достатньої для плавлення тугоплавких металів і сплавів. Інтенсивний індукційний нагрів можливий лише в електромагнітних полях високої напруженості і частоти, які створюють спеціальними пристроями - індукторами. Індуктори живлять від мережі 50 Гц (установки промислової частоти) або від індивідуальних джерел живлення - генераторів і перетворювачів середньої і високої частоти. Найпростіший індуктор пристроїв непрямого індукційного нагріву низької частоти - ізольований провідник (витягнутий або згорнутий в спіраль), поміщений всередину металевих труби або накладений на її поверхню. При протіканні по провіднику-індуктора струму в трубі наводяться і гріють її вихрові струми. [2]. У випадку використання індуктора у якості джерела нагріву немає потреби розплавляти металу дроту, достатньо довести його до пластифікованого стану у котрому можлива екструзія через сопло екструдера. Це зумовлює ряд переваг перед методом дугового напавлення: відсутність розбрикування, відсутність перегрітого металу і, як наслідок, не такі суттєві структурні перетворення у напавленому металі.

Для того щоб дати оцінку можливості використання індуктора перш за все треба визначитися із його необхідною потужністю.

Приймаємо $f=4000$ Гц, $D_2=0,6$ мм, $a_2=30$ мм, $T_0=1200-1300^\circ\text{C}$

де

f - Робоча частота

D_2 -Діаметр дроту

a_2 - Довжина нагрітої частини дроту

T_0 - Температура нагріву, оскільки не потребується нагрівати дріт до температури плавлення, а лише до температури при якій метал переходить у пластифікований стан T_0 приймається $1200-1300^\circ\text{C}$.

Визначаємо глибину проникнення струму за емпіричною формулою [1]

ξ – глибина шару у якому виділяється головна частина індуктивної енергії визначається з умови

$$\zeta = \Delta_k, \text{ при } \frac{D_z}{\Delta_k} \geq 5 \tag{1}$$

$$\zeta = 0.2D_2, \text{ при } \frac{D}{\Delta_k} < 5 \tag{2}$$

$$\frac{D_2}{\Delta_k} = \frac{0.0006}{0.008} = 0.075 < 5 \tag{3}$$

$$\zeta = 0.2D_2 = 0.2 * 0.6 = 0.12 \text{ мм} \tag{3}$$

Приведений переріз

$$D'_2 = D_2 - \zeta = 0.6 - 0.12 = 0.48 \text{ мм} \tag{4}$$

Час нагріву

$$t_k = K * D'_2 = 2.7 * 0.48 = 1.2 \text{ с} \tag{5}$$

Де К- коефіцієнт що визначає інтенсивність тепловкладення. Значення К вказані у Табл.1.

Таблиця 1.

Значення коефіцієнту К

Деталь	ΔT	К при нагріві	
		звичайному	прискореному
Циліндр	100	6	2,5
	150	3,7	
Пластина	100	11,7	5,3
	150	6,9	

Середня корисна потужність індуктора

$$P_t = 840 * \frac{G}{t_k} = 840 * \frac{0.0002}{1.2} = 0.155 \text{ кВт}$$

де G- вага дроту довжиною a_2 . У відповідності до довідкових даних[4] $G=0,0002$ кг.

Залежність необхідної потужності індуктора від часу нагріву наведено на Рисунку.1

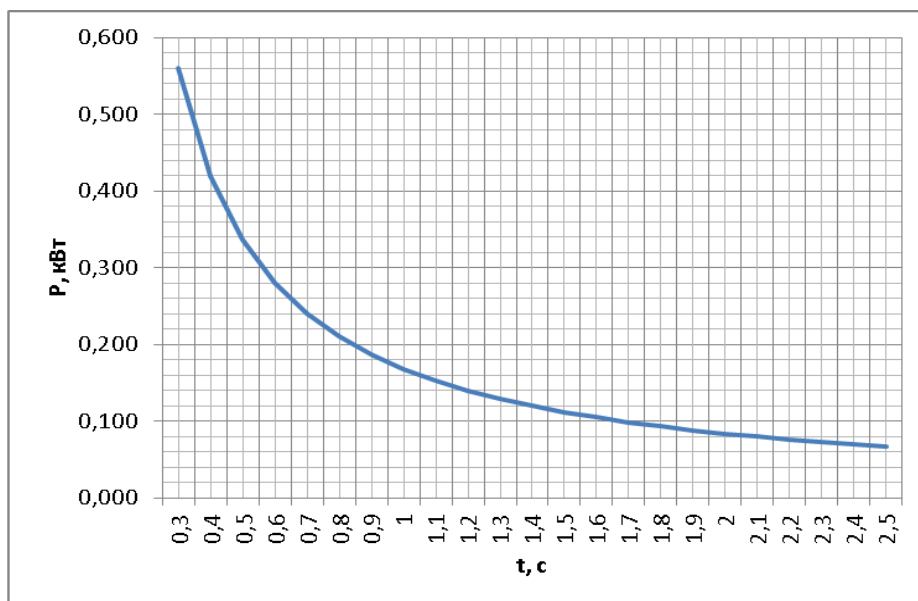


Рис1. – Залежність потужності індуктора від часу нагріву

Як видно із розрахунків процес потребує зовсім невеликої потужності порівняно із джерелом живлення що живить дуговий розряд.

Процесом друку керують за допомогою обладнанням, чутливого до перешкод що можуть спричинятися височастотним електромагнітним полем індуктора. При проектуванні пристроїв для захисту від перешкод необхідно виконати:

- Привести до нуля рівень різниці потенціалів між «нульовим» проводом живлення і заземленням;

- Забезпечити шунтування розв'язок між будь-якими колами заземлення;

- Виробляти радіальне, а не кільцеве підключення шлейфів з навантаженням в кінці лінії;

- Застосовувати екранований провід (наприклад, плетінка ПМЛ) для шлейфів і монтажу пристроїв. Екранування має бути підключене безперервно і з'єднане тільки з модулями приладу, до яких підключаються ці шлейфи. Так само підключається заземлення і самих модулів. Якщо кабель ПМЛ буде підключений в декількох точках, перешкоди тільки збільшаться. Більш того - плетінка ПМЛ сама стане джерелом перешкод. Правильно підключений кабель ПМЛ дасть можливість значно знизити перешкоди;

- Застосовувати екранований провід (за допомогою ПМЛ) для міжмодульних ліній зв'язку;

- Якщо в приладі або поруч з ним використовуються засоби радіозв'язку - відмовитися від використання в пристрої радіоканальної системи, а вибрати провідну, причому провід екранувати за допомогою ПМЛ, що широко застосовується для екранування проводів в різних пристроях.

- Необхідно застосувати екранування індуктора [3], та віддалення блоку керування та приводів переміщення каретки екструдера від індуктора, рекомендується використовувати привід екструдера штовхаючого типу. У разі близького розташування двигунів переміщення та подачі дроту до індуктора, може бути порушена стабільність роботи принтера і як результат може бути погіршена якість друку.

Конструкція екструдера має виключати наявність феромагнітних деталей, що можуть нагріватися магнітним полем індуктора, це може спричинити несправність екструдера, до того ж це зумовить додаткові втрати на нагрів цих деталей. Також енергія буде втрачатися на нагрів деталі що друкується. Оцінка цих втрат наразі не виявляється можливою оскільки залежить від конфігурації конкретної деталі. Розробка методики розрахунку цих втрат є іншою актуальною задачею, без вирішення якої важко правильно підібрати режим друку.

Особливу увагу слід приділити матеріалу сопла. Основні вимоги до сопла це робота при високих температурах (близько 1400 °С), матеріал має мати якомога меншу здатність до адгезії із розплавленим металом, щоб сопло не забивалося застиглим металом після закінчення друку. Цим вимогам відповідають корунди, шамотні глини та ін.

Висновки:

1. Використання індуктора у якості джерела нагріву металевого дроту у пристрої для FDM 3d друку має ряд очевидних переваг, але практична реалізація такого підходу ускладнена необхідністю електромагнітного захисту блоку керування та оператора.

2. Необхідна потужність індуктора нелінійно зростає із зменшенням часу нагріву, але для промислового використання цілком достатньо індуктора потужністю близько 200 Вт

3. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку розробки конструкційного виконання блоку екструдера, що міг би забезпечити стабільність процесу друку та методики оцінки втрат на нагрів деталі, що друкується магнітним полем індуктора.

Перелік посилань:

1. Слухоцкий А.Е., Ненков В.С., Павлов Н.А., Бамунер А.В. Установки индукционного нагрева / Под ред. Слухоцкого А.Е. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское издание, 1981. - 328 с.

2. Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. – 126 с.

3. Сидоренко В. Д. Применение индукционного нагрева в машино-строении. -Л.: Машиностроение, 1980. - 230 с.

- 6 Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. -М.: Энергия, 1977. - 343 с.

4. <http://stalkanatsilur.com.ua/ru/opisanie-provoloka-stalnaia/teoreticheskaja-massa-1000-m-provoloki>

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Чвортко Є.П., к.т.н., доцент кафедри Електрозварювальних установок Національного технічного університету України "КПІ імені Ігоря Сікорського";

Чорний А.В., к.т.н., заступник директора «ПатонСерт».

Стаття надійшла до редакції 17.11.2016.

УДК 621.67

¹Ковалёв И.А., ²Ратушный А.В., ³Семёнова Н.В.

Сумской Государственный Университет

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЛОПАСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА НИЗКОЙ БЫСТРОХОДНОСТИ НА ЕГО НАПОРНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В статье рассматривается возможность замены пространственной лопастной системы центробежного рабочего колеса низкой ($n_s = 65$) быстроходности цилиндрическими лопатями. Это будет способствовать росту напорности рабочего колеса и упрощению технологии его изготовления.

Ключевые слова: рост напорности, цилиндрические лопати, низкая быстроходность.

Ковальов І.А., Ратушний А.В., Семенова Н.В.

ВПЛИВ ФОРМИ ЛОПАТИ РОБОЧОГО КОЛЕСА ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА НИЗЬКОЇ ШВИДКОХІДНОСТІ НА ЙОГО НАПІРНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті розглядається можливість заміни просторової лопатевої системи відцентрового робочого колеса низькою ($n_s = 65$) швидкоходності циліндричними лопатями. Це сприятиме зростанню напірні робочого колеса і спрощення технології його виготовлення. Ключові слова: зростання напірні, циліндричні лопаті, низька швидкохідні.

Ключові слова: зростання напірност, циліндричні лопаті, низька швидкохідність.

I.A. Kovalyov, A.V. Ratushnyi, N.V. Semenova

INFLUENCE OF FORM OF BLADE OF DRIVING WHEEL OF CHEMPUMP OF SUBZERO HIGH-SPEEDNESS ON HIS PRESSURE AND POWER DESCRIPTIONS

Article is devoted to possibility of replacement of the spatial blade system of centrifugal driving wheel of subzero ($n_s = 65$) high-speedness cylindrical blades. It will provide the height of pressure of driving wheel and simplification of technology of his making.

Keywords: height of pressure cylindrical blades, subzero high-speedness.

1. Вступление

«Директива по определению требований, предъявляемых к проектированию изделий, потребляющих электроэнергию», принятая Европарламентом в 2005 году выдвигает требование сокращения потребления энергии в Европе к 2020 г на 40%. Для его исполнения Европейская ассоциация производителей насосов (Euroump) разработала «Программу для насосного оборудования» – Eсорump, в рамках которой было издано несколько технических руководств [1, 2, 3], одним из которых является руководство по анализу стоимости жизненного цикла насосных систем. Анализ стоимости жизненного цикла насосного агрегата [1,4] показывает, что основную долю составляет стоимость энергии, в то же время значительной составляющей в стоимости жизненного цикла является себестоимость насоса в целом как технической системы, и, соответственно, стоимость его подсистем.

2. Анализ литературы и постановка проблемы

Рабочее колесо является основным элементом насоса и в значительной мере определяет его конструкцию. Рабочие колеса можно классифицировать по коэффициенту быстроходности n_s , который характеризует КПД, форму проточной части, соотношение геометрических параметров (рис.1 а) и форму характеристик насосов (рис.1 б) [5].

Особенностью рабочих колес низкой быстроходности является то, что для них отношение b_2/D_2 является весьма малым.

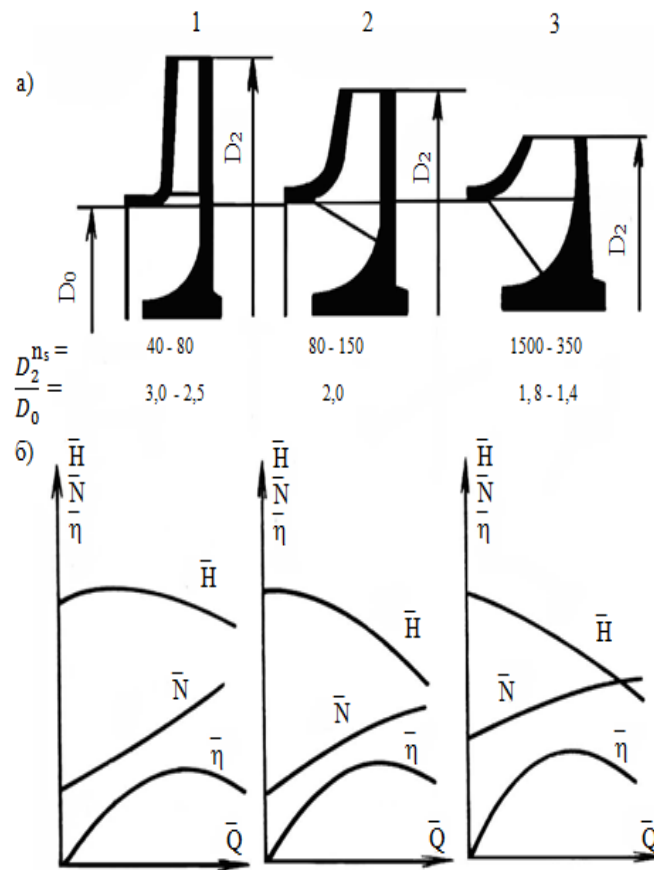


Рисунок 1. – Влияние n_s на форму проточной части рабочего колеса (а) и характеристики насоса (б)

Колёса получаются тонкие, отношение D_2/D_0 наоборот является значительным. В связи с этим можно предположить, что область расположения входной кромки и поворота потока в рабочем колесе низкой быстроходности оказывает значительно меньшее влияние на напорные и энергетические характеристики колеса и насоса в целом, чем у колёс более высокой быстроходности [6].

Учитывая вышесказанное, можно сформулировать научно-техническую проблему, заключающуюся в возможности применения в рабочих колёсах низкой быстроходности цилиндрических лопастей вместо пространственных, а также влияние такой замены на напорные и энергетические характеристики колеса.

Основным и наиболее массовым способом изготовления центробежных колёс, применяемых в насосостроении до настоящего времени является литьё. При этом литые колёса имеют большую массу и низкий уровень качества поверхности. Наибольшую сложность представляет получение лопасти пространственной формы [7].

Применение цилиндрических лопастей в рабочих колёсах низкой быстроходности позволит упростить процесс их изготовления и повысить технологичность в производстве [8,9]. При этом возможно применение для изготовления рабочих колёс лопастных машин метода точной объёмной штамповки, который характеризуется низкой трудоемкостью, высокими коэффициентами использования металла, и необрабатываемой поверхностью, а также показателями качества поверхности [7].

3. Цель и задачи исследования

Представленный анализ позволяет следующим образом сформулировать цель данной работы – оценка влияния применения лопастей цилиндрической формы центробежного рабочего колеса низкой быстроходности на его напорные и энергетические характеристики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующую задачу: выполнив численные исследования влияния формы лопастей колеса на его напорные и энергетические

характеристики, обосновать возможность использования цилиндрических лопастей в центробежных рабочих колесах низкой быстроходности.

4. Методика исследования

Численные исследования проводились на базе рабочего колеса промежуточной ступени насоса ЦНС 180-1900 со следующими параметрами: $z = 8$, $n_s = 65$, $Q = 180 \text{ м}^3/\text{ч}$, $n = 3000 \text{ об/мин}$ при $\bar{q} = 0,5; 0,7; 0,9; 1; 1,1; 1,2$. Использовался программный продукт ANSYS CFX университетской версии, в основу которого заложен метод численного решения фундаментальных законов гидромеханики [10,11]. Следует отметить, что ANSYS CFX неоднократно апробировался при решении задач насосостроения, расхождение результатов численного и физического моделирования не превышает 5 %, поэтому данный программный продукт пригоден для решения поставленной задачи исследования.

Моделирование турбулентного течения потока жидкости выполнялось с использованием уравнений Рейнольдса ($i, j = 1-3$):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \quad (1)$$

где $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3$ – осреднённые по времени значения скоростей;

$\bar{u}'_1, \bar{u}'_2, \bar{u}'_3$ – пульсационные составляющие скоростей.

Для замыкания уравнений Рейнольдса использовалась $k-\varepsilon$ моделей турбулентности. При использовании этой модели система уравнений движения жидкости дополняется двумя дифференциальными уравнениями, описывающими перенос соответственно кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации ε (2), (3).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon), \quad (3)$$

где $P_k = -\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ – член, выражающий генерацию энергии k .

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

Параметры ε и μ_t определяются следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \right)^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Для численного исследования с помощью генератора сеток ICEM CFD были построены неструктурированные сетки трёхмерной модели жидкости в рабочих колёсах. Для описания пограничного слоя вблизи твёрдых стенок было создано 8 слоёв призматических ячеек. Предварительно было выполнено исследование на сеточную независимость

После генерации сетки в препроцессоре задавались исходные данные. В качестве граничного условия на входе в расчетную область задавался массовый расход, на выходе – статическое давление. Для всех твёрдых стенок было задано условие равенства нулю скорости. Шероховатость стенок была принята $Ra 3,2$.

Величина переменной y^+ , которая характеризует сгущение сетки возле стенок, находилась в пределах $20 < y^+ < 100$ единиц, что соответствует рекомендациям, приведенным в руководстве пользователя [11].

5. Результаты численного исследования

Принимая за базовое колесо с пространственными лопастями, обозначим его как РК №1, колесо с цилиндрическими лопастями обозначим как РК №2. Исследования велись также для рабочего колеса с цилиндрическими лопастями, которые были выведены из зоны поворота потока в колесе (РК №3), а также с лопастями, удлинёнными и повернутыми на 20° против направления вращения (РК №4)

На рисунке 2 приведена трёхмерная модель жидкости в колесе с пространственными лопастями, подготовленная для расчёта в ANSYS CFX в соответствии с [11]. Модели для колес с цилиндрическими лопастями выполнялись аналогично. На рисунке 3 а-г представлены лопастные решетки рассматриваемых рабочих колёс схем РК №1 – РК №4 соответственно.

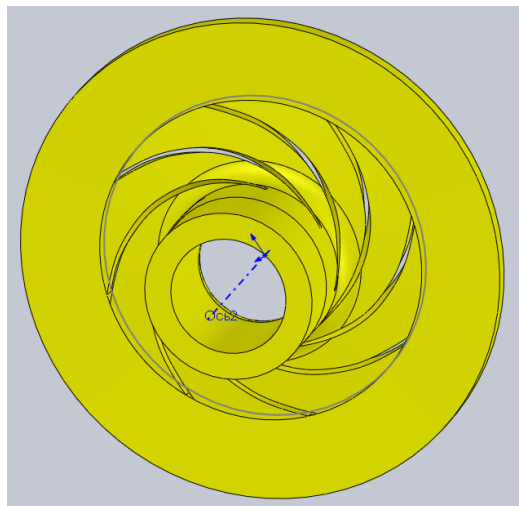


Рисунок 2. – Трёхмерная модель жидкости в рабочем колесе с пространственными лопастями

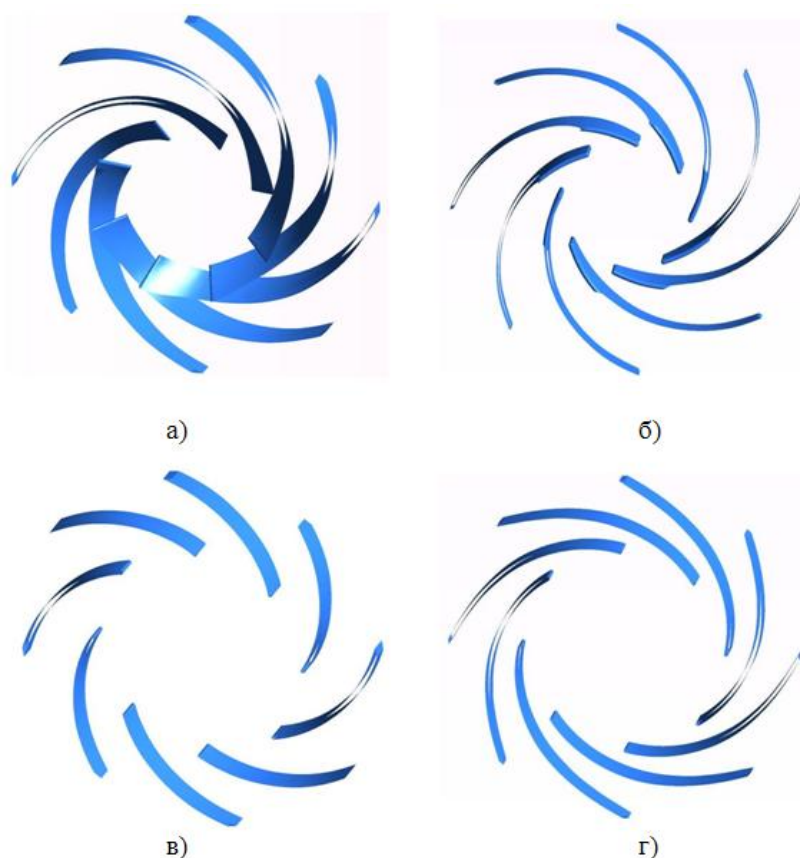


Рисунок 3. – Пространственная (а) и цилиндрические (б-г) лопастные решетки

Для оценки влияния изменения формы лопасти на характеристики рабочего колеса удобным является использование соотношения безразмерных коэффициентов напора (ψ), мощности (μ), подачи (φ) и КПД (η) к безразмерным коэффициентам этих параметров в точке максимального КПД ($\psi_0, \mu_0, \varphi_0, \eta_0$) эталонного колеса:

$$\psi = \frac{2gH}{u_2^2}; \quad \varphi = \frac{4Q}{\pi D_2^2 u_2}; \quad \mu = \frac{\varphi \psi}{\eta} = \frac{8N}{\rho \pi D_2^2 u_2^3 \eta}$$

Распределение относительных скоростей для схем РК №1 – РК №4 представлено на рис 4 а-г соответственно. Результаты расчетов представлены на рис. 5, изменения параметров H, N, η по отношению к базовому колесу при $\bar{Q} = 1$ представлены в табл. 1.

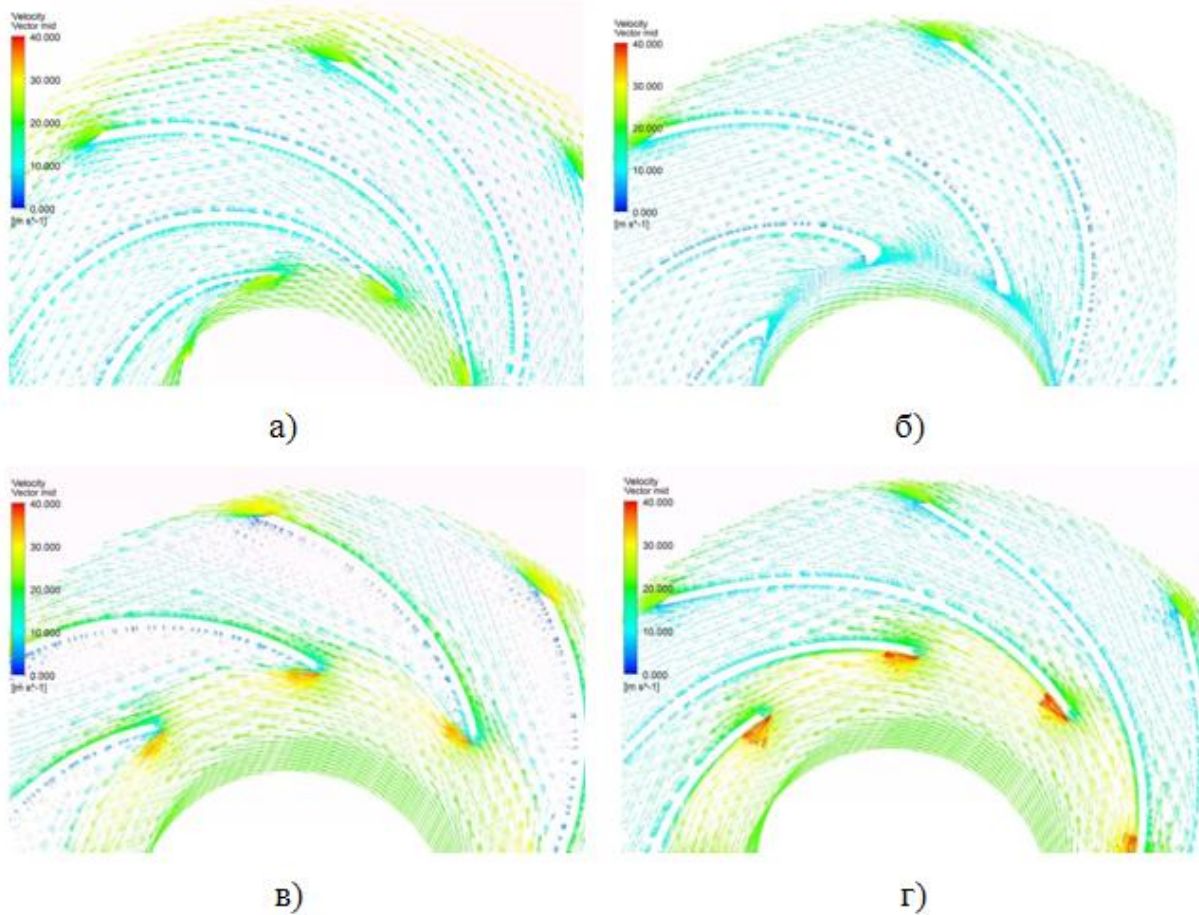
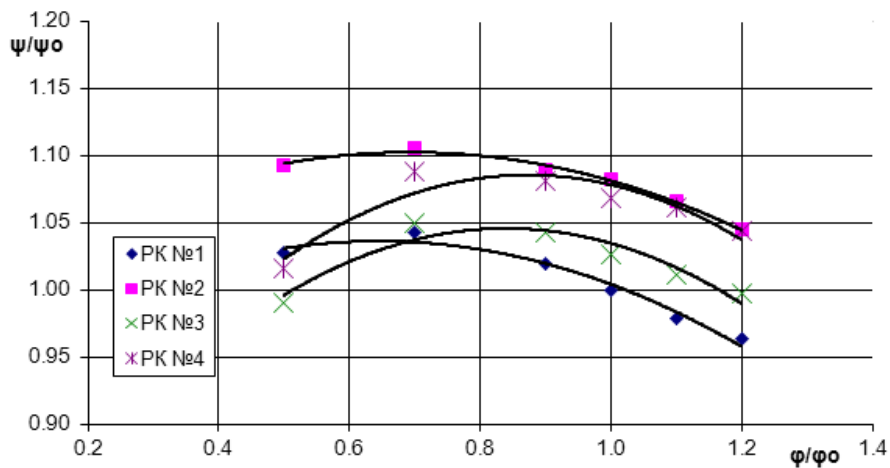
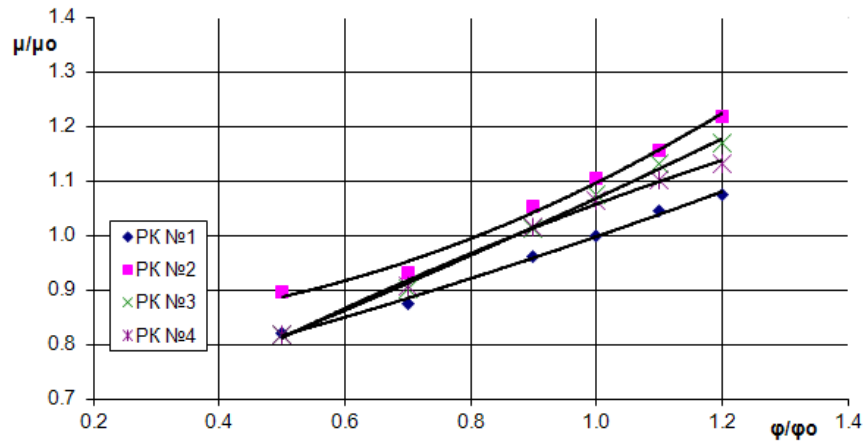


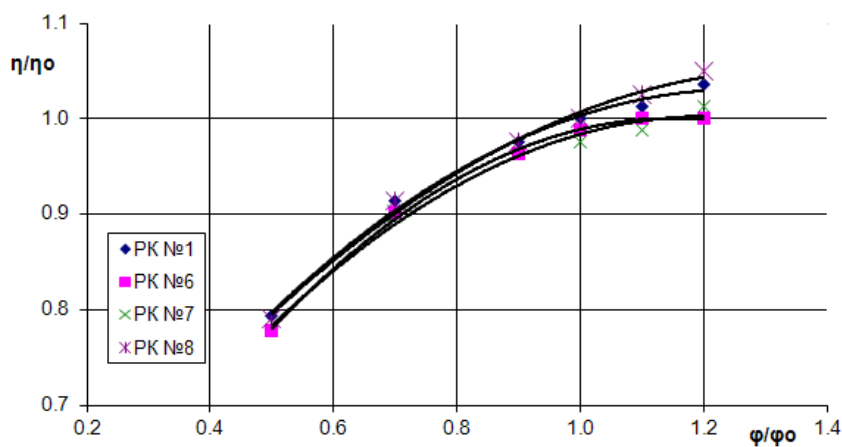
Рисунок 4. – Распределение относительных скоростей



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Напорная (а), мощностная (б) и характеристика КПД (в) исследуемых РК

Схем а РК	H, %	N, %	η, %
№2	8,2	8,9	1,2
№3	2,7	4,8	2,5
№4	6,8	6,3	

Таблица 1.

Как видно из рисунка 4, при применении лопастной решетки, выведенной из зоны поворота потока в колесе (РК №3) на тыльной стороне лопасти наблюдается значительная зона вихреобразования. Изменения в конструкции данной лопастной решетки, внесённые путём решения обратной задачи, были призваны согласовать положение лопасти с направлением течения потока в рабочем колесе после зоны поворота потока, устранив область вихреобразования (РК №4).

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что применение цилиндрических лопастей в целом привело к росту напора рабочего колеса. Это можно объяснить тем, что происходит лучшее силовое воздействие лопастной системы и потока жидкости, повышается интенсивность энергопередачи от колеса к жидкости. При этом закономерно

наблюдается некоторое снижение КПД колеса, вызванное ростом гидравлических потерь из-за изменения формы лопастей.

Особо обращает на себя внимание, тот факт, что КПД колеса схемы РК №4 остался неизменным по сравнению с эталонным колесом с пространственными лопастями. Исходя из совокупности изменений параметров напора и КПД, схему №4 можно назвать оптимальной.

Выводы

В результате проведенного численного исследования была обоснована возможность применения лопастей цилиндрической формы в центробежных рабочих колесах низкой быстроходности исходя из оценки его КПД. При этом удалось выявить положительный эффект роста напора колеса.

Список литературы

- 1 Караханьян В. К. Энергосбережение и повышение энергоэффективности насосного оборудования в России в период до 2020 г / В. К. Караханьян // Насосы&Оборудование. – 2010. – № 4 (63) - 5 (64). – С. 4–6.
- 2 Твердохлеб И. Б. О стоимости жизненного цикла насосов / И. Б. Твердохлеб, А. В. Костюк // Насосы&Оборудование. – 2010. – № 3 (62). – С. 26–28.
- 3 Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary. // Hydraulic Institute and Europump. Published by Elsevier Ltd., January 2001.
- 4 Ольштынський, П. Л. Учет особенностей рабочего процесса направляющего аппарата для повышения технического уровня центробежного насоса [Текст] : диссертация на соискание научной степени канд. техн. наук / Ольштынський П. Л. ; науч. рук. И.Б. Твердохлеб. – Сумы : СумГУ, 2016. – 166 с.
- 5 Ржебаева, Н. К. Расчет и конструирование центробежных насосов [Текст] : учеб. пос. / Н. К. Ржебаева, Э. Е. Ржебаев. – Сумы : СумГУ, 2009. – 220 с.
- 6 Ковалёв, И. А. Ступень низкой удельной быстроходности: особенности рабочего процесса, нетрадиционные способы повышения напорности [Текст] / И. А. Ковалёв, А. В. Ратушный // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – №4. – С. 35-39.
- 7 Воробьев В.М. Новые технологические процессы изготовления рабочих колес гидравлических лопаточных машин [Электронный ресурс] / В.М. Воробьев, И. В. Филатова – Режим доступа: <http://www.avert-mntc.ru/component/content/article/48-2011-11-10-12-31-01/100-2012-09-24-12-48-55.html>. – Название с экрана.
- 8 Материалоемкость изделий машиностроения. Термины и определения: ГОСТ 27782-88. – [Действителен от 1989-01-01]. – М. : Госстандарт СССР, 1988. – 6 с.
- 9 Методика оценки технического уровня и качества насосного оборудования: РД 26-06-57-86. – [Действителен от 1986-11-01]. – М. : ВНИИгидромаш, 1986. – 51 с.
- 10 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. –М. : Наука. гл. ред. физ.- мат. лит., 1987 – 840 с.
11. ANSYS CFX 13.0 Solver Theory. Release 13.0 [Электронный ресурс], 2010. – 261 р. – Режим доступа : <http://www.ansys.com>.

Стаття надійшла до редакції 09.12.2016.

УДК 620.191.33: 620.193

Є.І. Крижанівський, О.Ю. Витязь, Р.С. Грабовський*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ОЦІНКА УМОВ РУЙНУВАННЯ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБ БУРИЛЬНИХ КОЛОН ПРИ СПУСКО-ПІДЙІМАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ**

Здійснено експериментальну оцінку силового критерію руйнування металу тривало експлуатованих бурильних труб. Визначено умови, за яких при спуско-підйімальних операціях можливе руйнування тривало експлуатованих бурильних труб, що містить зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину. Встановлено взаємозв'язок критичних зовнішньої або внутрішньої поперечних кільцевих тріщин у бурильних трубах із вагою бурильної колони. Показано, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини при спуско-підйімальних операціях бурильних колон на глибинах понад 3 км є більш небезпечними, ніж зовнішні від зовнішніх, тоді як в інтервалі глибин від 1 км до 3 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

Ключові слова: критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, критичний розмір зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, характеристична глибина зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини.

Форм. 11. Табл. 4. Рис. 10. Літ. 15.

Е.И. Крыжановский, О.Ю. Витязь, Р.С. Грабовский**ОЦЕНКА УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРОВАННЫХ ТРУБ БУРИЛЬНЫХ КОЛОНН ПРИ СПУСКО-ПОДЪЕМНЫХ ОПЕРАЦИЯХ**

Проведена експериментальна оцінка силового критерію руйнування металу тривало експлуатованих бурильних труб. Определены условия, при которых при спуско-подъемных операциях возможны разрушения длительно эксплуатируемых бурильных труб, содержащих наружную или внутреннюю поперечную кольцевую трещину. Установлена взаимосвязь между фактом возникновения критических внешних (или внутренних) поперечных кольцевых трещин в бурильных трубах и весом бурильной колонны. Показано, что внутренние поперечные кольцевые трещины при спуско-подъемных операциях бурильных колонн на глубинах свыше 3 км являются более опасными, чем внешние, тогда как в интервале глубин от 1 км до 3 км более опасными являются внешние поперечные кольцевые трещины.

Ключевые слова: критический коэффициент интенсивности напряжений, критический размер внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины, характеристическая глубина внешней или внутренней поперечной кольцевой трещины.

Ye.I. Kryzhanivskyi, O.Y. Vytyaz, R.S. Hrabovskyi**ESTIMATION OF COLLAPSE CONDITIONS OF LONG-TERM OPERATED DRILL PIPES DURING TRIPPING**

An experimental assessment of the force criterion for metal failure of long-term drill pipes operation was carried out. Defined were the conditions under which during tripping the collapse of long-term operated drill pipes is possible when they contain an external or internal circular cross crack. The interrelation of critical external or internal circular cross crack in drill pipes to the drilling string weight was established.

It was shown that the internal cross cracks during drilling string tripping at depths exceeding 3000 m are more dangerous than the external ones, whereas within a range of 1000-3000 m the external circular cross cracks are more dangerous.

Key words: critical factor of stress intensity, critical size of the external or internal circular cross cracks, typical depth of external or internal circular cross crack.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день проблеми, пов'язані із збільшенням обсягів видобування нафти та газу в Україні є стратегічними, оскільки забезпечення держави власними енергоресурсами є надзвичайно важливим компонентом її національної безпеки. В Україні видобуток нафти становить 10-12%, а природного газу – 46-48% від загальнодержавних потреб [13]. Для збільшення обсягів видобування вуглеводневих ресурсів необхідно переходити до буріння глибоких та надглибоких свердловин, оскільки на великій глибині (близько 6,5-7 тисяч метрів) на території Дніпрово-Донецької западини і Карпатської нафтогазової провінції виявлено величезні запаси нафти і газу. Проте, як свідчить практика [4, 8], буріння на таких глибинах в ускладнених умовах призводить до суттєвого збільшення кількості аварій, пов'язаних з виходом з ладу елементів бурових колон. Так, в інтервалі буріння 2500-4500 м кількість відмов зростає у 4,8-5 разів, а в інтервалі 4500-5000 м – в 9,8 рази.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці фіксуються випадки руйнування бурильної колони при бурінні свердловин [1, 2, 8]. При цьому значна частина випадків руйнування тіла труби (38%) трапляються на зварних стиках, в трубній різьбі або по тілу труби в поперечному

напрямі. Очевидно, що характер такого руйнування визначається доміантним впливом відповідних силових факторів, тобто величиною, напрямом та характером експлуатаційних навантажень, що виникають у процесі спуско-підймальних операцій.

У переважній більшості випадків неконтрольоване поперечне руйнування тіла труби викликане дією значних втомних та статичних навантажень, високими робочими тисками та критичними розмірами зовнішньої або внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, що зароджується та розвивається в місцях концентраторів напружень через пошкодження роторними клинами або наявності в металі труби неоднорідностей структури (неметалевих включень, раковин, закатів та волосин) [1], а також у разі порушення технології спуско-підймальних операцій, наприклад підймання на одному стропі [2]. Причиною поломок бурильних труб по тілу можуть бути також і корозійні виразки та мікротріщини на внутрішній або зовнішній поверхні, які також призводять до поширення тріщин. Крім того, поперечне руйнування спостерігається також біля зварених у стик труб у зоні зварювання або в зоні термічного впливу [8]. Під час роторного буріння найбільш часто трапляється поперечне руйнування тіла труби в з'єднанні по потовщеному кінці, що становить 60-70 % від загальної кількості аварій.

Таким чином, аналіз раптових відмов, пов'язаних з бурильною колоною, дає підстави виокремити низку чинників, поєднання впливів від яких у більшості випадків і створює умови для виникнення аварійних ситуацій:

- умови навантаження;
- технічні та експлуатаційні концентратори напружень.

Забезпечення надійної та безпечної експлуатації бурильних колон вимагає підвищеної уваги при оцінці та врахуванні вищезгаданих чинників і прийнятті відповідного інженерного (управлінського) рішення.

Оскільки в процесі спуско-підймальних операцій, спричинених впливом статичних навантажень (ваги колони), найбільш поширеним є руйнування бурильної колони в поперечному перерізі шляхом відриву, то важливим є визначення параметрів руйнування.

У зв'язку з цим розрахунково-експериментальна оцінка умов, при яких потенційно можливе поперечне руйнування елементів бурильної колони, є актуальною науково-технічною проблемою.

Метою дослідження є оцінка умов руйнування тривало експлуатованих бурильних труб із наявними зовнішніми або внутрішніми поперечними кільцевими тріщинами при спуско-підймальних операціях в інтервалі буріння 1000-6000 м, ґрунтуючись на підходах механіки руйнування.

Основні результати дослідження. Об'єкт та методична процедура розрахунків та досліджень. Утворення на зовнішній або внутрішній поверхні як бурильної труби, так і елементів їх різьбових з'єднань корозійно-втомних тріщин є причиною виникнення небезпечного стану, що в окремих випадках [3, 7, 9] спричинює їх руйнування. Згідно з даними діагностичного контролю такі тріщини зароджуються на дні корозійних виразок, технологічних рисок, біля концентраторів напружень (наприклад, впадина першого витка як зовнішньої, так і внутрішньої різьби замкового з'єднання) або в зоні термічного впливу бурильних труб із привареними замками. Спочатку вони набувають півеліптичної форми (a/c) з розмірами півосей a та c , однак, розвиваючись в процесі експлуатації, утворюють кільцеві тріщини глибиною (a/t).

У сучасній інженерній практиці характеристики тріщиностійкості металів розглядають як найбільш адекватну основу для оцінювання залишкового ресурсу та умов руйнування елементів конструкцій у експлуатаційних середовищах. У зв'язку з цим методична процедура для оцінки умов руйнування бурильних труб полягає, по-перше, у адекватному виборі відповідної розрахункової схеми, яка описує умови, за яких можливе руйнування бурильних колон, по-друге, у одержанні експериментальних даних, які відображають умови руйнування експлуатованого металу бурильних труб.

Відомо [9], що руйнування елемента конструкції з наявною тріщиною виникає тоді, коли біля вершини тріщини в межах достатньо великої області напруження перевищує граничне значення. Оскільки коефіцієнт інтенсивності напружень K_I характеризує поле напружень, то критерій граничної рівноваги тіла з тріщиною можна записати так:

$$K_I = K_{IC} \quad (1)$$

Величина K_{IC} характеризує опір твердого тіла поширенню в ньому тріщини і визначає тріщиностійкість при плоскій деформації за статичного навантаження елемента конструкції.

Важливою є також оцінка міцності та ризику руйнування елемента конструкції на основі показника "опірності елемента конструкції росту тріщини". Глибина тріщини $(a/t)^*$, при якій різко зростає швидкість (dK_I/da) зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I [9], системи "метал конструкції – середовище" є характерним параметром, під час досягнення якого різко зростає ймовірність її руйнування. У цьому випадку будується безрозмірна залежність типу

$$\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right), \quad (2)$$

де σ – прикладене зовнішнє навантаження, t – товщина елемента конструкції у місці руйнування.

Характеристична глибина тріщини $(a/t)^*$ визначається за методикою [9]. Поточні значення $dK_I/da = F(a/t)$ (рис. 1) підраховують з кроком $a/t = 0,01$ та визначають три точки, в околі яких виконувались умови:

$$\begin{aligned} (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 0,01 &\rightarrow (a/t)_1 \rightarrow 1; \\ (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 0,10 &\rightarrow (a/t)_2 \rightarrow 2; \\ (dK_I/da)_{i+1} - (dK_I/da)_i = 1,00 &\rightarrow (a/t)_3 \rightarrow 3. \end{aligned} \quad (3)$$

За аргументами цих точок визначають координати точок L $(0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2], (dK/da)_L)$ та M $(0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3], (dK/da)_M)$. У визначених точка L і M (див. рис. 1) проводять дотичні. Аргументом точки перетину цих дотичних є значення глибини критичного дефекту $(a/t)^*$, при якому різко зростає швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I .

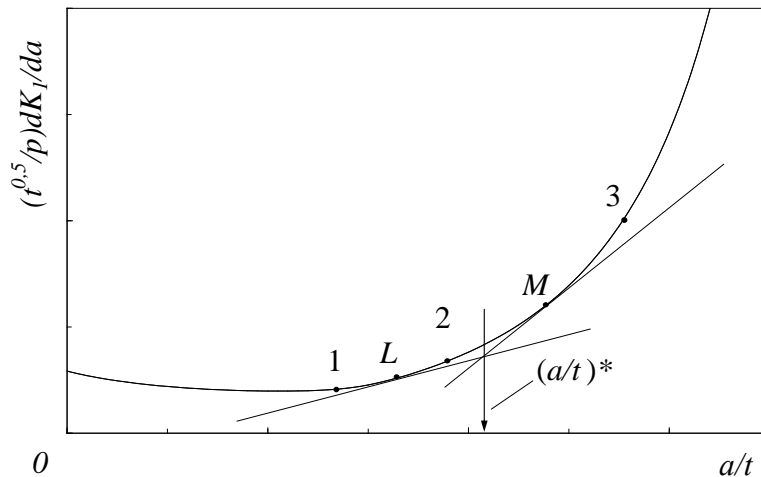


Рис. 1. - Загальна схема визначення характеристичної глибини поперечної кільцевої тріщини $(a/t)^*$ [9]

Під час експериментального визначення умов руйнування необхідно врахувати той факт, що руйнування металу бурильних труб шляхом розвитку поперечних замкнених тріщин відбувається в умовах плоского напруженого стану. В цьому випадку руйнування металу бурильних колон необхідно оцінювати за енергетичним [11] критерієм: тріщина починає рости, якщо інтенсивність енергії J , що звільнилася, досягає критичної величини J_c .

$$J_* = J_c. \quad (4)$$

Використаємо методику [10], яка дослідним шляхом дозволяє визначити критичну тріщиностійкість J_c металу бурильних колон на основі експериментально одержаної діаграми руйнування зразків "зусилля-прогин". Значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} обчислимо за співвідношенням [6]

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{(1 - \mu^2)}}, \quad (5)$$

де J_{Jc} – критична тріщиностійкість; E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па);
 μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

Визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} металу тривало експлуатованих бурильних труб. Матеріалом дослідження є фрагменти двох бурильних труб ТБПВ з умовним діаметром 127 мм, які понад 17 років використовувалися для буріння свердловин нафтогазових родовищ Західної України. Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Хімічний склад досліджуваних сталей бурильних труб								
Сталь 36Г2С								
Масова частка елементів, %								
C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	S _{max}	P _{max}
0,38	1,52	0,92	0,09	0,13	0,04	0,09	0,018	0,016
Сталь 45								
Масова частка елементів, %								
C	Mn	Si	V	Cu	Al	Ni	S _{max}	P _{max}
0,47	0,82	0,26	0,10	0,09	0,15	0,07	0,016	0,018

Механічні характеристики тривало експлуатованих сталей бурильних труб (див. табл. 2) визначались за стандартною процедурою [14] випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг (рис. 2).

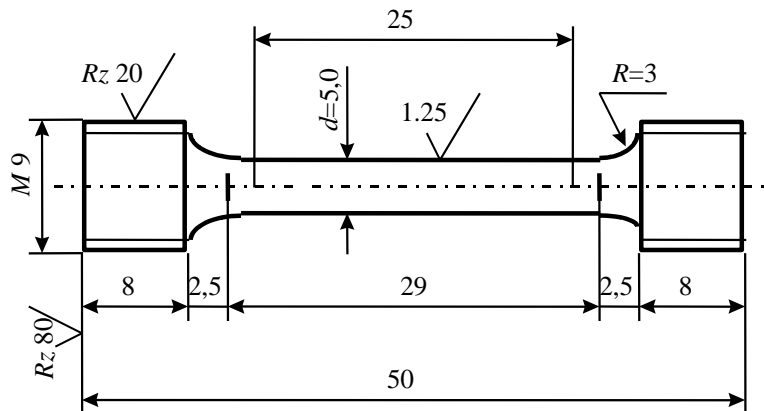


Рис. 2. - Зразок для визначення стандартних механічних характеристик міцності та пластичності досліджуваних сталей [14]

Таблиця 2.

Механічні характеристики сталей бурильних труб [авторська розробка]						
Сталь	Група міцності	Тривалість експлуатації, рік	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
36Г2С	Л	23	790,0	605,0	12,5	27,0
45	К	17	685,0	462,5	12,0	34,5



Рис. 3. - Загальний вигляд зразка (а) та площі деформованої поверхні зразка (б) після експерименту з дослідження умов спонтанного руйнування тривало експлуатованих буриньних труб

Оцінку умов, за яких відбувається руйнування металу труб буриньної колони, здійснювали за методикою [10, 12], експериментально визначаючи величину J_{Ic} . Для цього вирізали по п'ять зразків з фрагментів буриньної труби групи міцності "Л" розміром $200,0 \times 10,0 \times 8,0$ мм та з фрагментів буриньної труби групи міцності "К" розміром $200,0 \times 10,0 \times 8,4$ мм. При цьому оцінювали роботу A (рис. 4), витрачену на деформування зразка з наведеною тріщиною l_{cep} (рис. 3, а) як елемента конструкції, при якій він втрачає свої несучі властивості, віднесену до нетто площі деформованої поверхні зразка S (рис. 3, б)

$$J_{Ic} = \frac{A}{S_f} \quad (6)$$

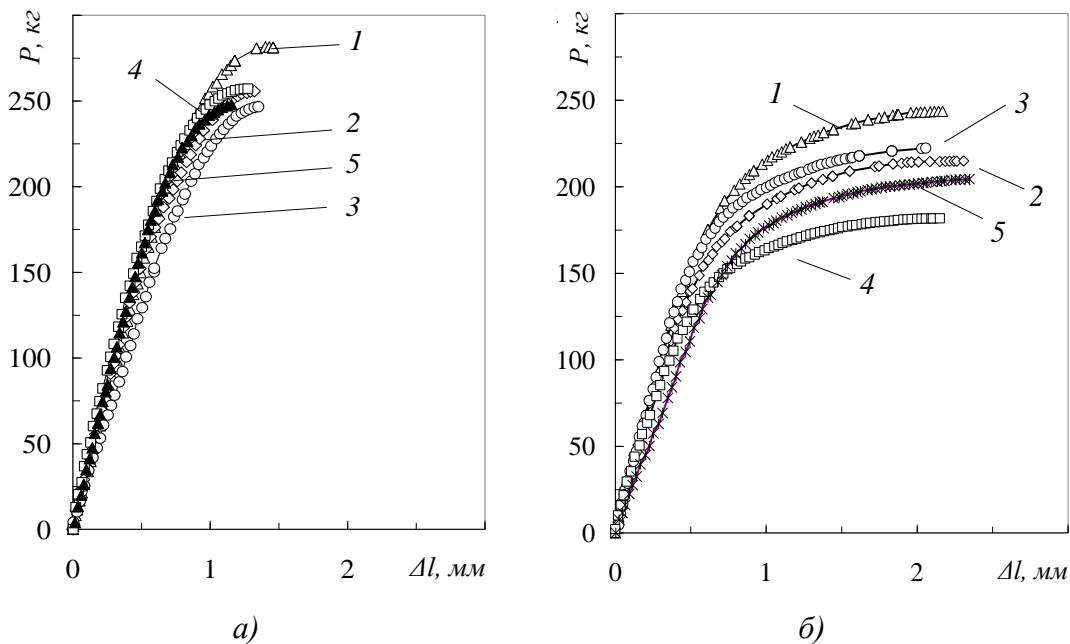


Рис. 4. - Діаграма деформування $P - \Delta l$ зразків з фрагментів буриньних труб:
а) – група міцності Л ($D = 126,0$ мм, $d = 110,0$ мм);
б) – група міцності К ($D = 126,0$ мм, $d = 109,2$ мм)

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) у роботі подавали як критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} і обчислювали за допомогою рівняння (5).

Таблиця 3.

Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Jc}

Труба	Група міцності	K_{Jc} , $МПа\sqrt{м}$					K_{Jc}^{cep} $МПа\sqrt{м}$
		1	2	3	4	5	
36Г2С	Л	105,8	98,8	99,9	96,9	93,6	99,0
45	К	130,8	129,2	130,1	130,0	133,7	130,8

Оцінка міцності та ризику руйнування елементів експлуатованих бурильних колон. В процесі експлуатації бурильних колон, методами неруйнівного контролю виявляються тріщини глибиною близько 2 мм, причому час утворення цих тріщин у замкових з'єднаннях становить 10-20% їх ресурсу [5]. Руйнування замкового різьбового з'єднання бурильних труб під час спуско-підйомних операцій є доволі поширеним випадком раптових відмов бурильних колон (~28,3%) [7]. Причиною руйнування труб є зародження та розвиток зовнішньої або внутрішньої кільцевої тріщини.

Оцінку умов руйнування елементів експлуатованих бурильних колон із зовнішньою або внутрішньою замкненою коловою тріщиною, що перебуває під дією осьового навантаження проведемо із застосуванням відповідних аналітичних залежностей [9] для визначення параметрів коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I та швидкості їх зміни dK_I/da . Одержані розрахункові дані порівняємо із результатами розрахунково-експериментальних випробувань оцінки руйнування експлуатованого металу труб бурильної колони. Причому, основними параметрами, що дозволяють визначити умови руйнування елементів бурильної колони, є:

– глибина наявної в бурильній трубі внутрішньої або зовнішньої кільцевої поперечної тріщини a_c ;

– вага бурильної колони Q^* .

Розглянемо випадки руйнування двох тривало експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" ($D=126$ мм, $t=8,0$ мм) та "К" ($D=126$ мм, $t=8,4$ мм), що містить зовнішню або внутрішню замкнену колову тріщину, що перебуває під дією осьового навантаження.

Оцінка умов руйнування бурильних труби із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною, що перебуває під дією осьового навантаження. Для визначення умов, за яких можливе руйнування експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" та "К", що містять зовнішню поперечну кільцеву тріщину глибиною (a/t), розглянемо розрахункову схему, зображену на рис. 5.

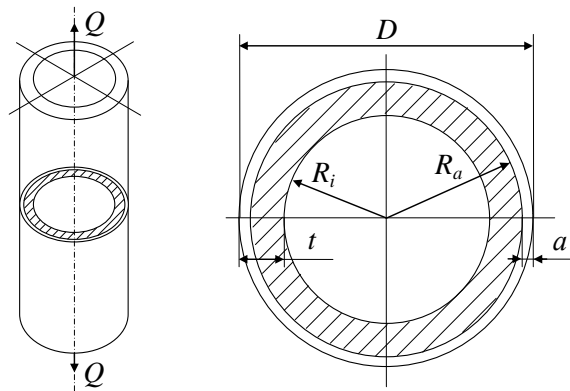


Рис. 5. - Пустотілий циліндр із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження [9, 15]

При підрахунку значень коефіцієнта інтенсивності напружень K_I вздовж фронту зовнішньої поперечної кільцевої тріщини (рис. 5) використаємо залежність [15]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{\sqrt{Y}} \quad (7)$$

$$\text{де } F = \frac{1 - R_{ia}^2}{\left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}\right]^2 - R_{ia}^2}, \quad Y = 0,8 + (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \left[\frac{H}{1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t}} \right],$$

$$R_{ia} = \frac{R_i}{R_i + t}, \quad H = 4 + 1,08 \frac{R_{ia}}{(1 - R_{ia}) \left(1 - \frac{a}{t}\right)}.$$

Критичну глибину зовнішньої поперечної кільцевої тріщини a_c визначали із залежності (7) за умови $K_I = K_{Jc}$, враховуючи задану глибину свердловини, тобто вагу бурової колони (Q)

$$a_c = \frac{K_{Jc} Y}{\pi \sigma^2 F^2}, \quad (8)$$

де $\sigma = \frac{Q}{S_f^*}$, S_f^* – площа руйнування.

Крім того, практичний інтерес становить визначення характеристичної глибини втомної тріщини $(a/t)^*$, при якій різко зростає швидкість зміни коефіцієнта інтенсивності напружень K_I , а отже, і ризик руйнування дефектної бурильної труби під час спуско-підіймальних операцій.

Величину швидкості зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I визначимо, використовуючи залежність [15]

$$\frac{dK}{da} = 0,5\sigma \sqrt{\frac{\pi}{a}} \frac{F}{\sqrt{Y}} + \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Y}} \frac{dF}{da} - 0,5\sigma \sqrt{\pi a} \frac{F}{Y^{1,5}} \frac{dY}{da} \quad (9)$$

$$\text{де } \frac{dF}{da} = \frac{2(R_{ia} - 1) \left[\frac{a(R_{ia} - 1)}{t} + 1 \right] (R_{ia}^2 - 1)}{t \left\{ \left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]^2 - R_{ia}^2 \right\}}, \quad \frac{dH}{da} = 1,08 \frac{R_{ia}}{t(1 - R_{ia}) \left(1 - \frac{a}{t}\right)^2}$$

$$\frac{dY}{da} = \frac{(1 - R_{ia})}{t \left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]} \left\{ H + a \frac{dH}{da} + \frac{Ha(1 - R_{ia})}{t \left[1 - (1 - R_{ia}) \frac{a}{t} \right]} \right\}.$$

Розглянемо випадок руйнування експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" ($D = 126$ мм, $t = 8,0$ мм) та "К" ($D = 126$ мм, $t = 8,4$ мм).

Для цих випадків побудуємо відповідну безрозмірну залежність типу (2).

Для розглядуваних випадків (рис. 6) відносна глибина критичного дефекту практично збігається і становить $(a/t)^* = 0,535$.

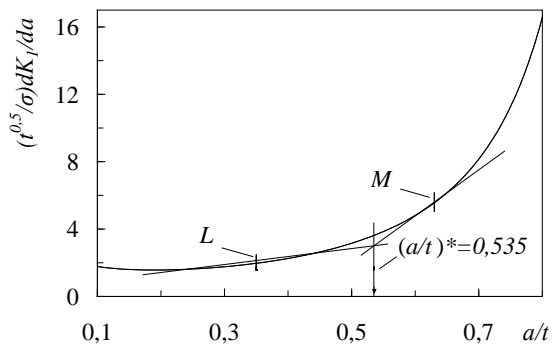


Рис. 6. - Оцінювання небезпеки глибини зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у експлуатованих бурильних трубах груп міцності "Л" та "К" під дією осьового навантаження

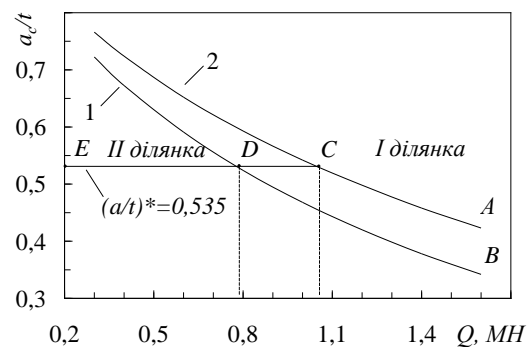


Рис. 7. - Взаємозв'язок глибини критичної зовнішньої поперечної кільцевої тріщини у стінці бурильних труб груп міцності "Л" (1) та "К" (2) та ваги бурильної колони (Q)

Однак, враховуючи особливості руйнування металу бурильних труб груп міцності "Л" та групи міцності "К" та використовуючи залежність (4), встановимо взаємозв'язок між критичною глибиною замкненої втомної тріщини a_c/t та вагою бурильної колони Q , що визначається глибиною свердловини.

Представлені графічно (рис. 7) результати обчислень дають підстави зробити висновок, що для металу бурильних труб групи міцності "Л" під час спуско-підйомальних операцій на глибині від 3,0 км до 6 км ($0,79 \text{ МН} \leq Q \leq 1,6 \text{ МН}$) критичними є зовнішні поперечні замкнені кільцеві тріщини в діапазоні $4,3 \text{ мм} \geq a_c \geq 2,7 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка I, крива 1, BD), тоді як на глибинах від 1 км до 3 км небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 4,3 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка II, DE). Для металу бурильних труб групи міцності "К" під час спуско-підйомальних операцій на глибинах від 4 км до 6 км ($1,05 \text{ МН} \leq Q \leq 1,6 \text{ МН}$) критичними є зовнішні поперечні замкнені кільцеві тріщини в діапазоні $4,5 \text{ мм} \geq a_c \geq 3,55 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка I, крива 2, AC), тоді як на глибинах від 1 км до 4 км небезпечними є втомні тріщини глибиною $a^* = 4,5 \text{ мм}$ (рис. 7, ділянка II, CE).

Оцінка умов руйнування бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження. **Визначимо умови, за яких можливе руйнування бурильних труб груп міцності "Л" і "К", що містять внутрішню поперечну корозійно-втомну тріщину (рис. 8) глибиною $(a/t)^*$. У вершині такої тріщини [15] величина коефіцієнта інтенсивності напружень K_I визначається залежністю**

$$K_I = \sigma \frac{F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\pi a}, \quad (10)$$

при цьому швидкість зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I рівна

$$\frac{dK_{Ia}}{da} = \sigma \frac{dF}{da} \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} + \frac{\sigma F}{2t} \frac{\sqrt{\pi a}}{\left(1 - \frac{a}{t}\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{2} \frac{\sigma F}{\sqrt{1 - \frac{a}{t}}} \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad (11)$$

де функція F та швидкість її зміни dF/da визначаються функціональними рядами, які залежить від співвідношення R_i/R_a [15] ($R_a = R_i + a$).

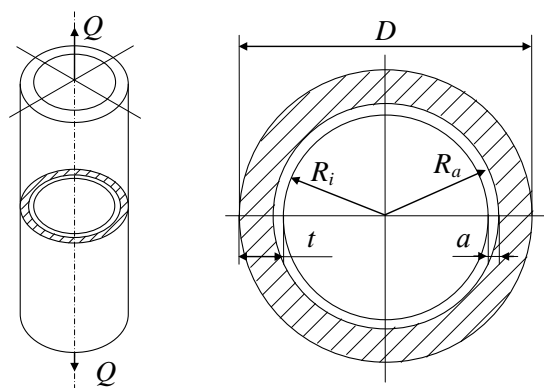


Рис. 8. - Пустотілий циліндр із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною під дією осьового навантаження [9, 15]

Встановимо характеристичну глибину внутрішньої замкненої кільцевої тріщини $(a/t)^*$ для досліджуваних елементів експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" ($D = 126 \text{ мм}$, $t = 8,0 \text{ мм}$) та "К" ($D = 126 \text{ мм}$, $t = 8,4 \text{ мм}$). Для цього побудуємо безрозмірну

залежність типу $\frac{\sqrt{t}}{\sigma} \frac{dK_I}{da} = F\left(\frac{a}{t}\right)$ (рис. 8), та визначимо місця із різким зростанням швидкості зміни (dK_I/da) коефіцієнта інтенсивності напружень K_I під час спуско-підймальних операцій бурильних труб. За описаною вище методикою [9] визначимо координати точок L $(0,5 \cdot [(a/t)_1 + (a/t)_2])$ $(dK/da)_L$ та M $(0,5 \cdot [(a/t)_2 + (a/t)_3])$ $(dK/da)_M$.

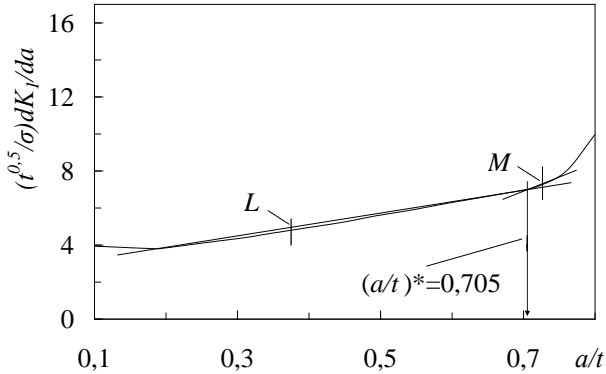


Рис. 9. - Оцінювання небезпеки глибини внутрішньої поперечної кільцевої тріщини у експлуатованих бурильних трубах груп міцності "Л" та "К" під дією осьового навантаження

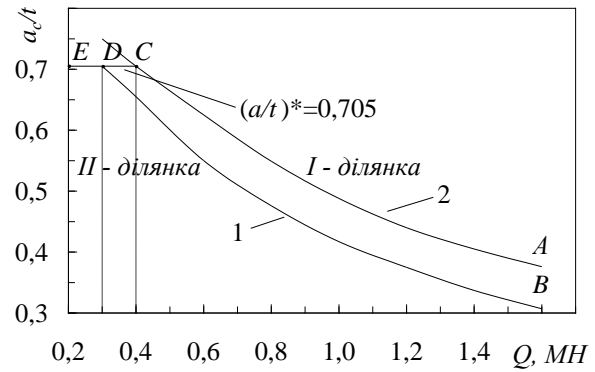


Рис. 10. Взаємозв'язок глибини критичної внутрішньої поперечної кільцевої тріщини, наявної у стінці бурильних труб груп міцності "Л" (1) та "К" (2) та ваги бурильної колони (Q)

Характеристична глибина внутрішньої замкненої втомної тріщини для досліджуваної нами експлуатованої бурильної труби групи міцності "Л" рівна $a^* = 5,6$ мм, а експлуатованої бурильної труби групи міцності "К" рівна $a^* = 5,9$ мм.

Встановимо взаємозв'язок між критичними глибинами внутрішньої замкненої втомної тріщини a_c/t для досліджуваних бурильних труб та вагою бурильної колони Q , що визначається глибиною свердловини.

Результати обчислень (рис. 10) дають підстави зробити висновок, що під час спуско-підймальних операцій для бурильної труби груп міцності "Л" на глибинах від 1,2 км до 6 км ($0,30 \text{ MN} \leq Q \leq 1,60 \text{ MN}$) критичними для металу бурильних труб є внутрішні поперечні замкнені кільцеві тріщини в діапазоні $5,6 \text{ мм} \geq a_c \geq 2,4 \text{ мм}$ (рис. 10, ділянка I, крива 1, BD), а для бурильної труби груп міцності "К" на глибинах від 1,5 км до 6 км ($0,46 \text{ MN} \leq Q \leq 1,60 \text{ MN}$) критичними для металу бурильних труб є внутрішні втомні тріщини в діапазоні $5,9 \text{ мм} \geq a_c \geq 3,2 \text{ мм}$ (рис. 10, ділянка I, крива 2, CA). Тоді як на глибинах від 1 км до глибини 1,2 км для бурильної труби груп міцності "Л" небезпечними є внутрішні втомні тріщини довжиною $a^* = 5,6$ мм (рис. 10, ділянка II, DE), а для бурильної труби груп міцності "К" на глибинах від 1 км до 1,5 км небезпечними є внутрішні втомні тріщини глибиною $a^* = 5,9$ мм (рис. 10, ділянка II, CE).

Одержані результати дозволяють інтерпретувати суттєве збільшення кількості аварій елементів бурильної колон при спуско-підймальних операцій, описаних в роботах [1, 2, 8].

Аналіз результатів проведених розрахунково-експериментальних досліджень Свідчить, що для оцінки умов руйнування тривало експлуатованих бурильних труб груп міцності "Л" та "К", що містять замкнені кільцеві тріщини необхідно, по-перше, враховувати характер розміщення замкненої кільцевої тріщини (зовнішня чи внутрішня), по-друге, враховувати групу міцності бурової труби, по-третє на малих глибинах необхідно враховувати показник "опірності елемента конструкції росту тріщини", а на глибинах від 1,2 км до 3 км – для труб, що містять зовнішню (ділянки AC та BD на рис. 7) або внутрішню (ділянки AC та BD на рис. 10) замкнену кільцеву тріщину – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} як характеристику силового критерію руйнування металу труб бурильної колони.

Таким чином, під час спуско-підймальних операцій визначальним чинником, що призводить до суттєвого збільшення кількості аварій тривало експлуатованих бурильних колон при бурінні на таких глибинах понад 3 км, є втрата металу бурильних труб опірності розвитку тріщин, тобто їх тріщиностійкості. Причому (див. табл. 4), більш небезпечними на цих глибинах є внутрішні замкнені кільцеві тріщини, тоді як на глибинах від 1 км до 3 км більш небезпечними є зовнішні замкнені кільцеві тріщини, оскільки визначальним чинником ту є характеристична глибина втомної тріщини a^* .

Таблиця 4.

Значення критичних (характеристичних) кільцевих тріщин a_c , (a^*)

H, км	Критична зовнішня поперечна кільцева тріщина a_c , (a^*), мм		Критична внутрішня поперечна кільцева тріщина a_c (a^*), мм	
	група міцності "Л"	група міцності "К"	група міцності "Л"	група міцності "К"
1	5,9, (4,3)	6,5, (4,5)	5,7, (5,6)	6,4, (5,9)
2	5,1, (4,3)	5,8, (4,5)	4,9	5,6
3	4,2~(4,3)	5,0, (4,5)	3,8	4,6
4	3,6	4,4~(4,5)	3,2	4,0
5	3,2	4,0	2,8	3,5
6	2,8	3,6	2,5	3,2

Висновки

1. Запропоновано експериментально-розрахункову процедуру для оцінки умов критичного руйнування при спуско-підймальних операціях тривало експлуатованих бурильних труб, що містять зовнішню або внутрішню поперечну кільцеву тріщину.

2. Здійснено експериментальну оцінку критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{JC} металу тривало експлуатованих бурильних труб для груп міцності "Л" та "К".

3. Встановлено, що руйнування тривало експлуатованих бурових труб груп міцності "Л" та "К" із зовнішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибині понад 3-4 км (у залежності від групи міцності) визначається критичною тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 3-4 км – показником "опірності елемента конструкції росту тріщини". Для бурильних труб із внутрішньою поперечною кільцевою тріщиною на глибині від 1,2-1,5 км до 6 км (у залежності від групи міцності) визначається тріщиностійкістю металу труб, а в інтервалі від 1 км до 1,2-1,5 км - показником "опірності елемента конструкції росту тріщини".

4. Оцінка умов критичного руйнування при спуско-підймальних операціях рівно навантажених бурильних труб засвідчує, що внутрішні поперечні кільцеві тріщини є більш небезпечними від зовнішніх на глибинах понад 3 км, тоді як в інтервалі глибин від 1 км до 3 км більш небезпечними є зовнішні поперечні кільцеві тріщини.

5. Одержані результати можна застосовувати для інтерпретації технічного діагностування тривало експлуатованих труб бурильних колон.

Список використаних джерел:

1. Артим В.І. Аналіз корозійно-втомних руйнувань елементів бурильної колони / В.І. Артим, І.І. Яциняк, В.В. Гриців [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 2 (43). – С. 197-202.
2. Івасів В.М. Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони / В.М. Івасів, Я.С. Гринджук, Л.Р. Юрич // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2014. – №6/4 (20). – С. 15 - 17.
3. Карпаш О.М. Методи та засоби забезпечення роботоздатності трубних колон: автореф. дис. докт. тех. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 47 с.
4. Козаченко Н.И. Вопросы надежности бурильных колонн / Н.И. Козаченко // Обзор техн. и технол. геол. развед. работ, орг. производства. – М. : ВИЭМС, 1978. – 37 с.
5. Копей Б.В. Науково-технологічні методи комплексного підвищення ресурсу деталей свердловинного нафтогазового обладнання: автореф. дис. докт. тех. наук. – Івано-Франківськ, 1996. – 46 с.
6. Крижанівський С.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х томах / С.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ-Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 434 с.
7. Крыжановский Е.И. Исследование и повышение сопротивления усталости бурильных колонн при вращательном бурении скважин: дисс. докт. тех. наук. – М., 1990. – 480 с.

8. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / В.І. Похмурський, Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів та ін. – Львів - Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2006. – 1193 с.

9. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб. / за заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк. – Львів : СПОЛОМ, 2012. – 316 с.

10. Оцінка умов руйнування трубопроводів тривалої експлуатації / Р.С. Грабовський, О.М. Лепак, М.П. Мазур [та ін.] // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2015. – №1 (38). – С. 46-53.

11. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / Панасюк В.В. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.

12. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. ГОСТ 25.506-85 – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.

13. Річний звіт НАК «Нафтогаз України» – 2014. – 198 с.

14. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Механические испытания. Конструкционная прочность: у 2 т. / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – с. 368.

15. Harris D.O. Stress Intensity Factor for Hollow Circumferentially Notched Round Bars // 89, Trans. ASME: J. of Basic Engineering. – 1967. – 89. – P. 103-106.

Рецензенти:

Доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу **Мандрик О.М.**

Доктор технічних наук, ст.наук. співр., ст. наук. співроб. відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України **Сиротюк А.М.**

Стаття надійшла до редакції 08.09.2016.

УДК 621.762.4.04

Мініцький А.В.¹, Сосновський Л.О.², Мініцька Н.В.¹¹Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, Україна**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕС ДОПРЕСОВКИ ПОРОШКОВИХ БРИКЕТІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА**

Розглянуто основні технологічні фактори, що впливають на процес допресовки порошкових матеріалів системи залізо - вуглець. Встановлено вміст графіту і температура відпалу, при яких підвищується ущільнюваність брикетів на основі залізного порошку. Показана можливість досягнення низької пористості відпалених і потім допресованих брикетів, які від початку експерименту містили 1,6 мас.% графіту. Показана доцільність виготовлення малопористих середньонавантажених виробів без використання дорогих і дефіцитних легуючих.

Ключові слова: порошок, пресування, допресовка, відпал, пористість, залізо, графіт.

Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Миницкая Н.В.**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ДОПРЕССОВКИ ПОРОШКОВЫХ БРИКЕТОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

Рассмотрены основные технологические факторы, влияющие на процесс допрессовки порошковых материалов системы железо – углерод. Установлено содержание графита и температура отжига, при которых повышается уплотняемость брикетов на основе железного порошка. Показана возможность достижения низкой пористости отожженных и затем допрессованных брикетов, изначально содержащих 1,6 мас.% графита. Показана целесообразность изготовления малопористых средненагруженных изделий без использования дорогих и дефицитных легирующих.

Ключевые слова: порошок, прессование, допрессовка, отжиг, пористость, железо, графит.

Minitzky A.V., Sosnovsky L.A., Minitzka N.V.**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE RE-PRESSING OF THE POWDER COMPACTING THE IRON-BASED**

The main technological factors influencing the process of powder materials repeated pressing iron system - carbon. The graphite content and annealing temperature at which the improved compactibility briquette iron-based powder are established. The possibility of achieving low porosity and then annealed repeated pressing briquettes, initially containing graphite 1.6 wt.%. The expediency of manufacture of low-porosity parts which work with medium load without the use of expensive and scarce alloying.

Keywords: powder pressing, repeated pressing, annealing, porosity, iron, graphite.

Постановка проблеми. Відомо, що характеристики виробів із порошків на основі заліза залежать від складу матеріалу і щільності, досягнутої під час технологічного процесу [1]. Для конструкційних деталей, що працюють в умовах великих та середніх динамічних навантажень, щільність спечених виробів являється ключовим параметром. Основні напрями, пов'язані з отриманням порошкових виробів з високою щільністю і відповідно високими експлуатаційними характеристиками, були отримані в таких технологіях як гаряче пресування, штампування, просочування, інжекційне формування і гаряче ізостатичне пресування [2, 3]. Однак вартість і відповідні обмеження цих технологій перешкоджають їх широкому використанню. Тому, модифікація традиційного методу статичного пресування і спікання, при виробництві близьких до заданих параметрів деяких деталей складної форми при високій щільності являється головною метою ряду досліджень. Можна достатньо впевнено вважати, що загальносвітова тенденція – виготовлення 85–90% деталей з порошків заліза шляхом їх статичного пресування в прес-формах і наступного спікання збережеться достатньо довго, що визначає необхідність технологічного вдосконалення цієї схеми. Одним із можливих варіантів покращення схеми, що містить статичне пресування є додаткова допресовка отриманих брикетів. Даний прийом відомий достатньо давно [4, 5], проте незважаючи на його тривіальність та простоту, він може суттєво покращити характеристики порошкових виробів та розширити їх номенклатуру.

Постановка задач. Метою даної роботи є дослідження процесу допресовки порошкових матеріалів та визначення основних факторів, що впливають на ущільнення брикетів на основі заліза.

Викладення основного матеріалу. Використовували порошок заліза марки ПЖРВ200.28, з насипною щільністю 3,11 г/см³, та порошок завальківського графіту марки ГС-4 з різним вмістом: 0,6, 1,6 та 4 %.

Пресування та допресовку сумішей проводили за відомою методикою [4] в одній і тій самій раз'ємній прес-формі з робочим діаметром 10 мм. Для одностадійного двустороннього пресування прес-форму встановлювали на двігумові пластини висотою 12 мм. Після пресування при 700 МПа проводили розпресовку прес-форми і визначали пористість брикетів. Після чого їх піддавали допресовці при тому ж тиску (700 МПа) і визначали їх пористість повторно.

На першому етапі досліджень було встановлено вміст графіту в залізному порошок при якому досягається мінімальна пористість при даних технологічних умовах отримання. Відомо, що введення графіту у залізний порошок суттєво знижує тиск, необхідний для отримання заданої пористості [6, 7]. Застосування допресовки при 700 МПа після попереднього спікання дозволяє отримати залізграфітові матеріали з пористістю менше 10 % [8]. В своїх попередніх роботах авторами також було частково досліджено вплив вмісту графіту на процес ущільнення брикетів на основі залізного порошку та показано ефективність використання графіту як твердого мастила [9].

На рис.1 приведена пористість спресованих брикетів в порівнянні з їх пористістю після допресовки.

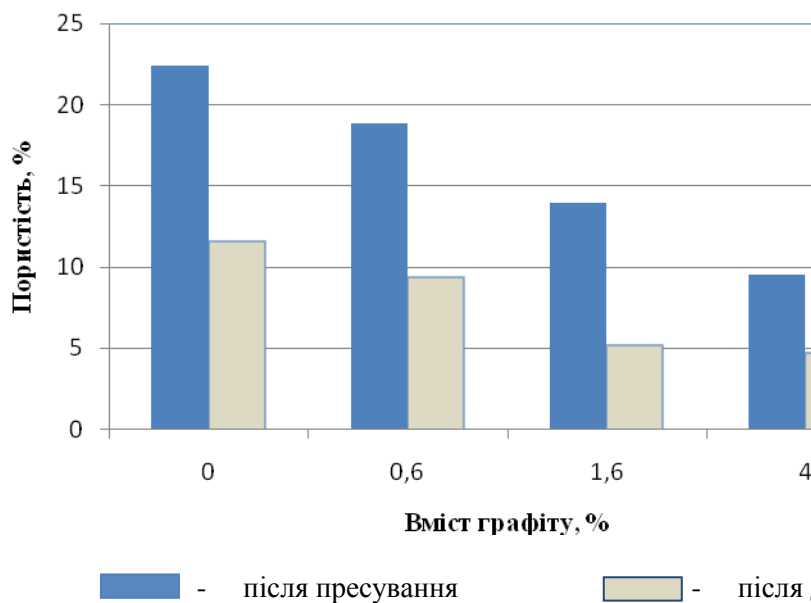


Рис.1. Залежність пористості брикетів спресованих та допресованих при тиску 700 МПа від вмісту графіту

Встановлено, що із збільшенням вмісту графіту у залізному порошок при пресуванні на 700 МПа пористість зразків зменшується з 22 до 9 %. Виконуючи роль твердого мастила, графіт знижує внутрішнє тертя між частинками порошку та стінкою прес-форми. Відомо, що кут внутрішнього тертя залізного порошку в стані насипки і утрусці зменшується на 5 град при введенні графіту [10]. При допресовці відбувається зниження пористості брикетів до 11–12 % для чистого заліза і до 5–6 % з добавками графіту. При цьому слід зазначити, що мінімальна пористість досягається вже при вмісті графіту 1,6 %, тому подальші дослідження проводили саме при такому вмісті графіту у залізі. Результати пресування та допресовки порошкових брикетів показало, що найбільша різниця у пористості має місце для зразків із чистого залізного порошку (~ 10 %). Така різниця пояснюється тим, що після пресування брикетів із залізного порошку спостерігається чітко виражена зона непропресовки брикетів в середній частині, що є характерним для порошкових заготовок отриманих за схемою двостороннього статичного пресування [11]. Допресовка практично повністю усуває зону непропресовки, що суттєво знижує пористість брикетів без графіту або з його невеликою кількістю. Із збільшенням вмісту графіту в суміші різниця в пористості стає меншою, так для суміші з 4 % графіту – 3–4 %, що говорить про високу ущільнюваність сумішей із великим вмістом графіту при першому пресуванні і відсутності зони непропресовки. Допресовка брикетів із таких сумішей може забезпечити тільки ліквідацію локальних мікродефектів, які можуть впливати на фізико-механічні характеристики матеріалу.

На рис. 2 наведено пористість брикетів після допресовки при тиску 700 МПа після відпалу у водні протягом 1 години при різних температурах.

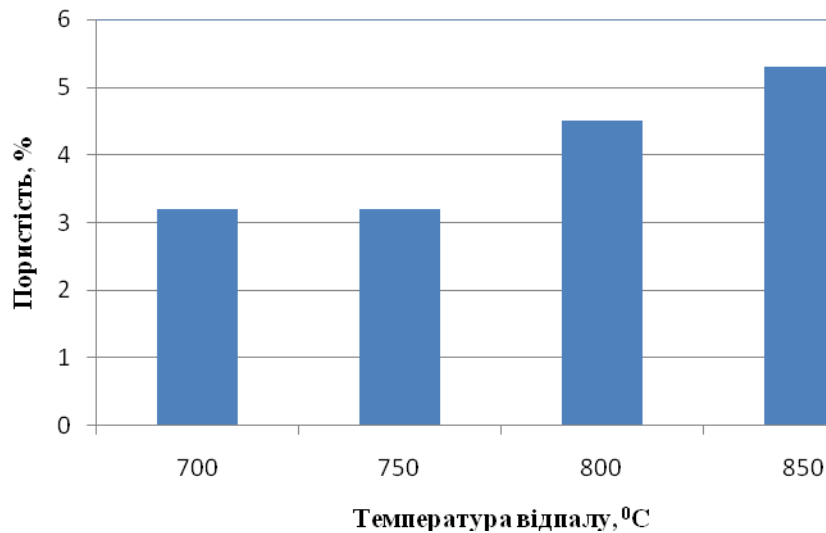


Рис.2. Залежність пористості брикетів допресованих при 700 МПа від температури відпалу у середовищі водню

Відомо, що відпал після пресування знімає деформаційне зміцнення, що набуває порошок в результаті пресування. В результаті при температурах відпалу 700–750 °C допресовка зразків на основі заліза з добавкою графітудозволила отримати пористість близько 3 %. Підвищення температури відпалу до 800 – 850 °C привело до зростання пористості до 4,5 – 5,5 %. Це може пояснюватись зниженням пластичності матеріалу, що відбувається внаслідок науглецювання при даних режимах відпалу. Таким чином, оптимальною температурою відпалу для сплаву заліза з 1,6 % графіту можна вважати діапазон 700–750 °C, саме при такій температурі допресовка дозволяє отримати мінімальну пористість близько 3 %.

Наступним етапом досліджень було визначення впливу часу після відпалу на процес допресовки брикетів. Представляло інтерес, чи впливає час після відпалу на ущільнення матеріалу при допресовці, наскільки принципово в технологічному процесі проводити операцію допресовки (другого пресування) одразу після відпалу або через певний час. Результати досліджень наведені на рис. 3.

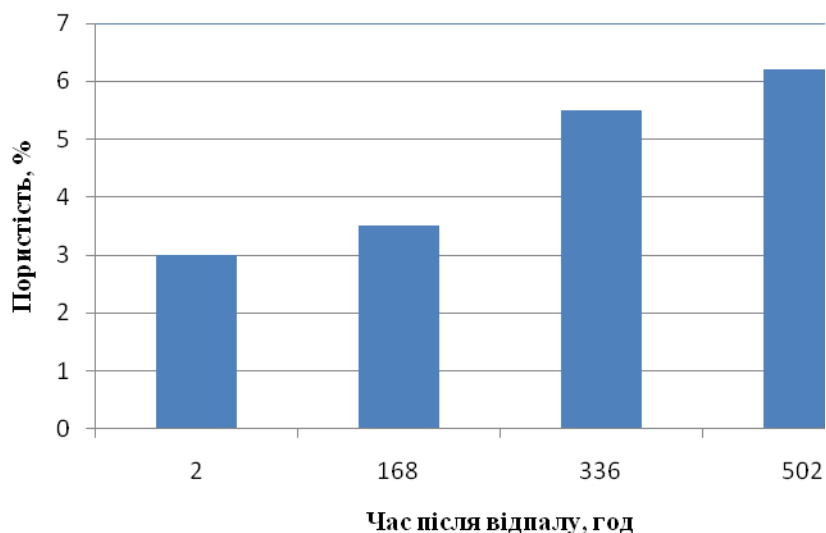


Рис. 3. Залежність пористості брикетів після допресовки при 700 МПа від часу витримки після відпалу при температурі 750 °C

При допресовці одразу після відпалу протягом перших 2 годин спостерігається мінімальна пористість близько 3 %. Допресовка через тиждень (168 годин) також дозволила отримати пористість близько 3 %. Проте, збільшення часу витримки зразків після відпалу показало, що через два та три тижні відповідно пористість після допресовки зросла до 5,5– 6,5 %, тобто в два

рази. Отримані результати можуть бути пояснені тим, що з часом після відпалу може відбуватися взаємодія брикетів із повітрям, в результаті чого на поверхні та по границях зерен адсорбуються атоми азоту та кисню, що перешкоджає пластичній деформації під час допресовки.

Таким чином, проведені дослідження показали, що допресовка порошкових матеріалів системи залізо – вуглець може бути перспективним технологічним прийомом для створення широкої номенклатури середньонавантажених виробів без використання дефіцитних легуючих, що є необхідною умовою при розробці нових рецептур та технологій в теперішній час.

Висновки.

1. Встановлено, що допресовка залізних брикетів, що містять 1,6 % графіту дозволяє отримати зразки з пористістю близько 5 %, що говорить про перспективність порошкових матеріалів системи залізо – вуглець.

2. Допресовка відпалених зразків на основі залізного порошку з добавкою графіту, забезпечує пористість близько 3 %, що дозволяє використовувати такі матеріали для середньонавантажених конструкційних виробів.

3. Показано, що час перед допресовкою не оказує суттєвого впливу на ущільнення зразків в перший тиждень після відпалу, зниження пластичності зразків спостерігається при збільшенні часу перед допресовкою до 2 – 3 тижнів.

Список використаних джерел:

1. Чернышов Л.И., Левина Д.А. Порошковая металлургия – трудности и перспективы современного этапа развития / Порошковая металлургия, 2013. - №11/12. – с. 144-151
2. Витязь П.А. Новые технологии получения и свойства порошковых композиционных материалов: порошковая металлургия в мире и в Беларуси: 1990-2010. Состояние, проблемы, перспективы / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, В.В. Савич – Минск, Беларусь, 2010. – 54 с.
3. Левина Д.А., Чернышев Л.И. Осторожный оптимизм – медленное восстановление отрасли порошковой металлургии, 2015. – №9/10. – С. 157–160
4. Мартынова И.Д. Физические особенности пластической деформации пористых тел. Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. Киев: Наук. думка, 1985. – с. 98–105
5. Артамонов А.Я. Влияние условий обработки на физико-механическое состояние металлокерамических материалов. Киев: Наук. Думка, 1965. – 263 с.
6. Лаптев А.М., Малыхин Е.А., Попивненко Л.В. Влияние графита и стеарата цинка на напряжение выпрессовки и прочность порошковых заготовок состава железо-медь-графит // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, 2006. – №1 (3). – С. 125–128
7. Мамедов В. А., Мамедов А. Т. Свойства высокоплотных порошковых материалов на основе железа, спрессованных без стеарата цинка // Порошковая металлургия. – 2003. - №5/6 – С. 33-36
8. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – К.: Наукова думка, 1980. – 404 с.
9. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Допресовка брикетов из смесей на основе порошка железа // Наукові нотатки, 2016. – №54. – С. 220–224
10. Каташинский В.П., Рухайло Н.В. Влияние смазки на коэффициент трения металлических порошков // Порошковая металлургия. – 1971. – №4 – С. 18–20
11. Федорченко И.М, Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. – Изд-во: АН УССР, 1961. – 420 с.

Стаття надійшла до реакції 30.11.2016.

УДК 504.064

Я.О. Мольчак, І.Я. Мисковець, М.І. Колядинський*Луцький національний технічний університет***ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ ЯК ЗАХИСТ ВІД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ,
СТВОРЕНИХ ТПВ**

Робота присвячена розгляду системи гідротехнічних споруд для захисту територій від надзвичайних ситуацій, які створюються забрудненням довкілля від ТПВ. Проаналізовано та запропоновано основні шляхи покращення екологічного стану територій, що знаходяться під впливом небезпек від звалищ ТПВ.

Ключові слова: тверді побутові відходи, сміттєзвалище, дренаж, екологічний стан, важкі метали, надзвичайні ситуації, гідротехнічні споруди.

Я.А. Мольчак, И.Я. Мисковец, Н.И. Колядинский**ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ КАК ЗАЩИТА ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ
СИТУАЦИЙ, СОЗДАНЫХ ТБО**

Робота посвящена рассмотрению системы гидротехнических сооружений для защиты территорий от чрезвычайных ситуаций, которые создают загрязнение окружающей среде от ТБО. Проанализированы и представлены основные пути улучшения экологического состояния территорий, которые находятся под влиянием опасности от свалки ТБО.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, мусоросвалка, дренаж, экологическое состояние, тяжелые металлы, чрезвычайные ситуации, гидротехнические сооружения.

Y.O. Molchak, I.Y. Myskovets, M.I. Kolyadynskyi**WATERWORKS AS PROTECTION AGAINST EMERGENCIES CREATED BY MSW**

This work is devoted to consideration of hydraulic engineering constructions for protection of the territory from the emergency situations, which creates pollution from MSW. Analyzed and presented the main ways to improve the ecological state of the territories, which are under the influence of danger from MSW landfills.

Keywords: municipal solid waste, landfill, drainage, ecological state, heavy metals, mergencies, waterwork.

Стан проблеми та аналіз публікацій.

Велика кількість надходження твердих побутових відходів на Україні, а їх понад 85-90% знаходиться у режимі порушення проектних показників. Тому, за відсутності запобіжних заходів щодо попередження надзвичайних ситуацій, а саме: забруднення ґрунтів, підземних і ґрунтових вод та повітряного басейну вони руйнують природні екосистеми, тим самим змінюють умови стану проживання людей в гіршу сторону. Відмічене стало необхідністю в обґрунтуванні напрямів локалізації забруднення довкілля від впливу звалищ ТПВ гідротехнічними спорудами.

Проблемою дослідження забруднення екосистем важкими металами займались Баб'як Н.М. [1], Колядинський М.І., Мисковець І.Я. [2,3], Мольчак Я.О., Фесюк В.О., Картава О.Ф. [4], та інші. Дослідження базуються, в основному, на основі сільськогосподарського, конструктивно-географічного підходу та інженерно-технічних рішень для боротьби із забрудненням. Актуальним є науковий підхід, що розглядає відмічені питання, крім всього з еколого-гідротехнічної точки зору, яка забезпечує створення безпечних та здорових умов життєдіяльності людей в умовах надзвичайних ситуацій.

Постановка завдання

З метою вирішення поставленої задачі було поставлено ряд завдань, а саме:

- проаналізувати склад забруднювачів, які створюють надзвичайні ситуації;
- розглянути конструкції гідротехнічних споруд, що сприятимуть зменшенню надзвичайних ситуацій від впливу звалищ ТПВ на довкілля;
- розробити та запропонувати основні заходи та шляхи екологічного захисту навколишнього середовища від звалищ ТПВ.

Основні результати

Пол Коннет відмічає, що «сміття – це не речовина, а мистецтво змішувати разом корисні речі та предмети, визначаючи їм місце на сміттєзвалищі». Змішуючи корисні речі з непотребом,

токсичні речовини з безпечними, горючі речовини та ті, які не піддаються горінню, ми не повинні дивуватись, що одержана суміш безкорисна, токсична і погано горить. Ця суміш і буде називатись твердими побутовими відходами (ТПВ) і буде представляти собою небезпеку для людей і навколишнього середовища куди б не попала вона: на сміттєсховище, сміттєспалювачі чи на сміттєпереробний завод.

Але більш прискіпливий аналіз показує, що ТПВ складаються з: харчових відходів, паперу, картону, деревини, металобрухту чорних і кольорових металів, кісток, шкіри, гуми, текстилю, скла, полімерних матеріалів. Разом з тим, в цій суміші можна знайти солі ртуті з батарей, фосфоро-карбонати з флуоресцентних ламп, токсичні хімікати, які містяться в залишках фарб та розчинників, лаків та аерозолів, акумуляторах і т. п.

Так, осінню кількість твердих побутових відходів зростає за рахунок опавшого листя з дерев та відходів фруктів та овочів [3].

На сучасному етапі розвитку суспільства кожна людина за даними статистики в середньому за одну добу створює від 2 до 3 кг твердих побутових відходів. Відмічене має тенденцію до постійного зростання, що заставляє муніципальну владу всіх міст постійно шукати оптимальні шляхи утилізації відходів своїх громадян [4].

Широке застосування у виробництві та побуті електричного та електронного обладнання, стрімке зростання його імпорту, технологічні нововведення у цій галузі зумовлюють швидкість заміни цього обладнання. Це призводить до того, що у складі твердих побутових відходів все частіше з'являються такі відходи, результатом розпаду яких є найбільш небезпечні речовини (важкі метали, галогени, азбест тощо). Не меншу загрозу навколишньому природному середовищу та здоров'ю людини становлять специфічні відходи лікувально-профілактичних установ, які потрапляють у контейнери твердих побутових відходів та можуть стати джерелом різноманітних інфекцій.

Від звалищ ТПВ найбільш небезпечним є хімічне забруднення підземних вод, яке може поширюватись на значні відстані від звалищ [1].

У місті Луцьку проблема у сфері поводження з ТПВ полягає у подальшому зростанні їхнього негативного впливу на довкілля та здоров'я людей через погіршення стану санітарного очищення міста, періодичне утворення стихійних сміттєзвалищ, практично на одних і тих же місцях, збільшення площі полігону для захоронення ТПВ.

У с.Брище Рокинівської сільської ради Луцького району на відстані 0,8 км від с.Брище, 1 км від артезіанської свердловини, 0,5 км від р.Серна створено Луцький полігон для захоронення твердих побутових відходів з усім комплексом його негативних впливів на навколишнє середовище. Звалище розміщене у північному напрямку від м.Луцька і на південний схід на відстані 800 м від житлових будинків с.Брище. Рельєф території сміттєзвалища – слабохвиляста рівнина з абсолютними висотами 184,3 – 191,7 м над рівнем моря. Сміттєзвалище закладене в 1975 році. Для полігону використаний піщаний кар'єр [1]. Загальна площа перевищує 10 га, річний об'єм захоронення становить понад 340 тис. м.куб. Спочатку експлуатації захоронено 3110 тис. м.куб., біля 70% - заповнення. Питомі обсяги утворення ТПВ постійно зростають: за останні 10 років їх кількість, що припадає на одну людину, підвищилась приблизно на 75% і сьогодні складає в середньому 420-500 кг на людину в рік або 2-2,4 м³. [4].

До стійких токсикантів серед хімічних забруднювачів ґрунтових і підземних вод відносяться важкі метали, тому що вони в природних умовах погано розкладаються, а, значить їх треба відводити.

Ґрунтові та підземні води на які повинна впливати регулююча та дренажна сітка представляють собою близький до поверхні шар ґрунтових вод, в якому вода стоїть або рухається з певною швидкістю, в залежності від водопроникливості ґрунту та п'езометричного нахилу.

Від конструкцій гідротехнічних споруд залежить відвід як забруднювачів, так і забруднених ґрунтових і підземних вод від території звалища ТПВ та прилеглої до нього 3-4

кілометрової зон з послідуочим їх очищенням та скидом в річку, в даному випадку р.Серна [2].

Велика кількість гідротехнічних споруд, які призначені для захисту ґрунтів і ґрунтових вод будуються із гончарних, пластмасових, а можуть і проникних матеріалів, які розділені конструктивними чи технологічними швами, або розміщуються на фільтруючій основі, тому їх невід'ємною конструктивною частиною є протифільтраційні пристрої, роль яких заключається у тому, щоб зібрати проникнену забруднену воду і знизити фільтраційні втрати до допустимих безпечних меж і відвести її в небезпечне місце для очищення.

Перехоплення забруднених ґрунтових вод можна здійснювати горизонтальним дренажем з вертикальними свердловинами, які будуть розвантажувати дренаж. Для більш надійного перехоплення забруднених ґрунтових вод можна влаштувати декілька дрен. При штучному перехопленні забрудненої ґрунтової води в практиці гідротехнічного будівництва застосовують групи колодязів, взаємне розташування яких може залежати від ландшафту, фізико-механічних властивостей ґрунту, глибини розташування водоупору тощо (рис. 1.) [3]

Перехоплення важких металів зі звалища ТПВ можна здійснювати за допомогою природного сорбенту у вигляді геохімічного екрану, який є суглинком визначеного мінералогічного і хімічного складу, покладений в основу ловчого каналу.

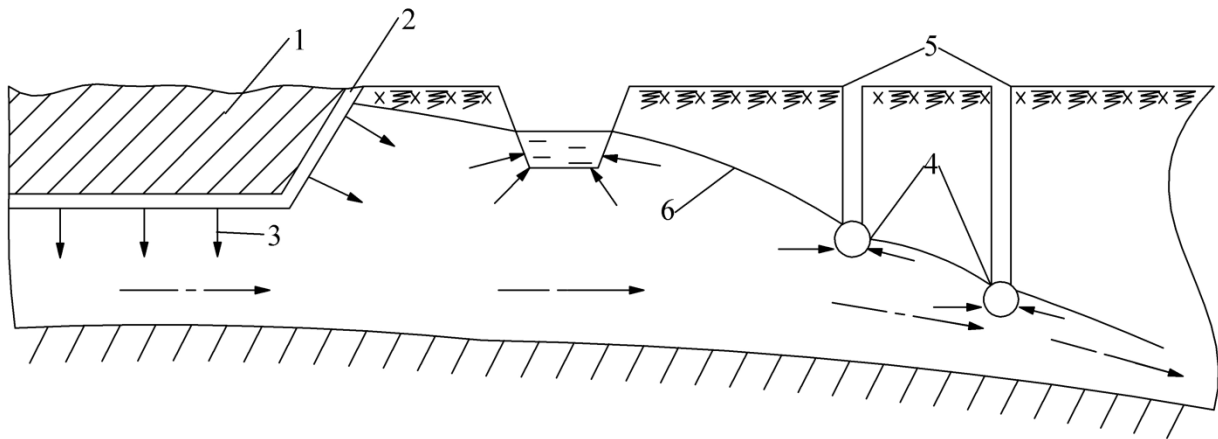


Рис.1. Схема перехоплення забруднених вод ГТС (дренажем і колодязями):

1 – звалище ТПВ; 2 – поліетиленова діафрагма; 3 – міграційна течія; 4 – дрена; 5 – колодязь (свердловина); 6 – рівень ґрунтових вод.

Геохімічний екран у водах ловчого каналу несе основне навантаження із зниження вмісту компонентів забруднювачів. Пройшовши через шар сорбційного матеріалу, вода із ловчого каналу буде попадати в дрени і по них надходити у біоколодязі, де буде відбуватись їх доочищення, після чого доочищену воду можна буде скидати в річки або інші водні об'єкти. Вода до дрен або ловчих каналів буде поступати зі всіх сторін сміттєзвалища. Основною причиною, в силу якої ґрунтові води забруднені поступають по всьому змоченому периметру (звалища ТПВ, або дрени) - це падіння натиску ґрунтових вод, який утворюється звалищем або дренами і розповсюджується в нижчележачих водоносних шарах по екіпотенціалам. Розміщення та кількість свердловин (колодязів) визначається міграційними та відповідними гідротехнічними розрахунками.

Кількісна сторона поступлення ґрунтової води в дрени або ловчі канали, при цьому режим ґрунтових вод на прилеглий до сміттєзвалища площі залежить від властивостей водоносного ґрунту, умов залягання та живлення ґрунтових вод [2].

Умови залягання ґрунтових вод залежать від потужності ґрунтового потоку та глибини залягання водоупору відносно дна звалища ТПВ, або відводячої воду дрени.

Для зменшення фільтрації забруднюючих речовин із сміттєзвалища на сьогоднішній день можна застосовувати різноманітні конструкції протифільтраційних пристроїв – понури, екрани, шпунтові стінки, ядра, діафрагми та інше, які виконуються із різних матеріалів – глини, дерева, металів, залізобетону, резини, плівки та інше. Для протифільтраційних пристроїв гідротехнічних споруд полімерні плівки, як матеріал, практичні, не проникливі для забруднюючих матеріалів, стійкі до агресивного впливу, розповсюджених хімічних реагентів [3].

Низька інноваційно-інвестиційна активність суб'єктів господарювання у сфері поводження з твердими побутовими відходами виражається у повільних темпах впровадження сучасних ефективних технологій поводження з ТПВ – роздільного збирання, сортування, енергетичної утилізації та ін. Ринковий механізм використання твердих побутових відходів в енергетичних цілях та як джерела вторинної сировини є недосконалим внаслідок недостатніх темпів розвитку його організаційно-виробничої інфраструктури та відсутності дієвих економічних стимулів залучення у цю сферу малого та середнього бізнесу, що передбачено ст.40 Закону України „Про відходи”.

Однією з головних причин виникнення проблеми можна вважати низький рівень участі громадськості у сфері поводження з ТПВ, пасивне ставлення населення до її проблем. Зокрема, недостатній рівень екологічної освіти та виховання усіх верст населення зумовлює низький рівень упровадження роздільного збирання відходів у місті.

До розміщування та функціонування сучасних санітарних полігонів ТПВ включають наступні вимоги:

- геологічні (не допускається розміщення полігону на тектонічних розломах та сейсмічно небезпечній зоні);
- гідрологічні (віддаленість від відкритих водоймищ, низький рівень ґрунтових вод, не затопленість їх території паводковими водами);
- санітарні (будівництво та експлуатація полігону згідно санітарних правил та вимог);
- екологічні (не допустити розміщення полігону в природоохоронній зоні, екологічна експертиза проекту, експлуатація полігону, функціонування його згідно екологічних норм і правил, зменшення його впливу на навколишнє природне середовище та здоров'я людей, державна реєстрація його як джерела екологічного лиха, план виводу його з експлуатації та рекультивації земель зайнятих під ним, контроль і моніторинг навколишнього природного середовища на полігоні і його санітарній зоні).
- фінансові (надання фінансових гарантій безпечного функціонування полігону, страхування на випадок екологічного лиха).

Найпоширеніший до останнього часу спосіб боротьби з побутовими відходами в містах - вивезення їх на звалища - не вирішує проблему, а, прямо скажемо, посилює її. Звалища - це не тільки епідеміологічна небезпека, вони неминуче стають потужним джерелом біологічного забруднення

Список літератури:

- 1.Баб'як Н.М. «Забруднення агроєкосистем західного Полісся важкими металами техногенного походження», - дис.на здобуття наук.ступеня к.с-г.н.- Львів, 2004. 142 с.
- 2.Колядинський М.І. Технічні заходи екологічного захисту територій від впливу сміттєзвалищ.// Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Випуск 36,- (м. Луцьк 2012 р., С.157- 160)
- 3.Колядинський М.І, Мольчак Я.О., Мисковець І.Я..Екологічна небезпека твердих побутових відходів. //Сучасні проблеми збалансованого природокористування:Збірник наукових праць ПДАТУ.,(Кам'янець –Подільський ,2011 С.42-45),
- 4.Мольчак Я.О., Фесюк В.О., Картава О.Ф. Луцьк: сучасний екологічний стан та проблеми. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2003 – 488 с.

Стаття надійшла до редакції 6.12.2016.

УДК 656.13.002.3

М.И. Наглюк, В.П. Волков, И.С. Наглюк, В.В. Ляшок*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет***УТОЧНЕНИЕ СРОКОВ СМЕНЫ АНТИФРИЗОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОБУСОВ**

Приведены результаты изменения основных показателей качества антифриза от наработки при эксплуатации автобусов. Представлена математическая модель прогнозирования остаточного ресурса антифриза. С помощью технического эндоскопа получены фотографии поверхности деталей системы охлаждения двигателя после работы двигателя с антифризом.

Ключевые слова: автобус, антифриз, эксплуатация, математическая модель, наработка.

М.І. Наглюк, В.П. Волков, І.С. Наглюк, В.В. Ляшок**УТОЧНЕННЯ СТРОКІВ ЗМІНИ АНТИФРИЗІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОБУСІВ**

Приведені результати зміни основних показників якості антифризу від наробітку при експлуатації автобусів. Наведена математична модель прогнозування залишкового ресурсу антифризу. За допомогою технічного ендоскопу отримані фотографії поверхонь деталей системи охолодження двигуна після роботи двигуна з антифризом.

Ключові слова: автобус, антифриз, експлуатація, математична модель, наробіток.

M. Nahliuk, V. Volkov, I. Nahliuk, V. Lyashok**CLARIFICATION OF TERMS OF ANTIFREEZE CHANGE UNDER OPERATION CONDITIONS**

The results of changes of the main indicators of antifreeze quality depending on the operating time as a result of exploitation of buses. The article presents a mathematical model of forecasting the residual life of antifreeze. With the help of a technical endoscope obtained photographs of the surface parts of the engine cooling system after the motor operation with antifreeze.

Key words: bus, antifreeze, exploitation, mathematical model, operating time.

Постановка проблеми. В условиях непрерывно меняющихся цен на нефтепродукты, специальные жидкости и антифризы, особенно актуальными становятся вопросы, о рациональном использовании этих продуктов. Малые сроки эксплуатации антифриза приводят к его необоснованному перерасходу, большие – к снижению эксплуатационной надежности и долговечности деталей системы охлаждения двигателя. Оптимальным решением в данной ситуации является проведение периодического контроля, который позволит прогнозировать сроки эксплуатации антифриза, в двигателе ссылаясь на его фактическое состояние.

Анализ публикаций. При эксплуатации автобусов периодический контроль работающих антифризов в большинстве случаев не проводят, упуская из виду то, что антифриз контактирует одновременно со многими поверхностями деталей двигателя изготовленных из разных материалов и сплавов.

При появлении в двигателе неисправностей антифриз может потерять работоспособность в течение очень короткого промежутка времени и стать одной из причин наступления отказа в работе системы охлаждения и двигателя, повышенного износа деталей и преждевременного уменьшения ресурса [1, 2].

В процессе эксплуатации автобусов и автомобилей, при работе двигателя антифриз, выполняя функции по отводу тепла, также накапливает продукты коррозионного изнашивания и загрязнений, а это приводит к изменению основных показателей качества антифриза. К основным видам загрязнений охлаждающих жидкостей в процессе их эксплуатации в двигателе можно отнести продукты химической и кавитационной коррозии, масляные и жировые отложения, частицы песка, накипи, грязи, силиконовых герметиков, продукты разложения антифризов (гели) и отработанные присадки [1].

Использование не качественного антифриза приводит к преждевременным отказам в работе системы охлаждения двигателя: выходу из строя радиатора, вследствие его коррозионного изнашивания или закупорки трубок; набухание и потеря эластичности резиновых шлангов приводит к утечкам; сильное вспенивание ухудшает охлаждение и приводит к перегреву теплонапряженных деталей двигателя.

Одним из показателей качества охлаждающей жидкости является электропроводность антифриза. Вопросы, связанные с электропроводностью жидкостей рассматриваются научной

общественностью достаточно давно. Результаты измерений электропроводности стандартных растворов, при различных температурах, приведенные в литературе [3]. В работе [4, 5, 6] описаны исследования и приведены результаты изменения электропроводности различных углеводородных жидкостей, чистых и отработанных образцов различных масел.

Для определения фактического состояния охлаждающей жидкости и ее замены, необходимо производить периодический контроль. Как правило, периодом является величина, которая измеряется в километрах пробега или времени (месяц, год). Однако в таком случае не учитывается то, что при простое автомобиля с работающим двигателем (прогрев, движение на подъём, простой на светофоре и т.д.) охлаждающая жидкость продолжает работать и вырабатывать свой ресурс. В работах [7, 8, 9] рассматривается влияние охлаждающей жидкости на изменение расхода топлива.

Ресурс двигателей в первую очередь определяется изнашиванием деталей и узлов систем двигателя. Для снижения отказов деталей, узлов и систем двигателя, во время эксплуатации, необходимо своевременное обнаружение изменения основных показателей качества антифризов.

В связи с этим **целью работы** является исследование изменения основных показателей качества антифриза и оценка технического состояния поверхности деталей системы охлаждения двигателя на момент замены при эксплуатации автобусов.

Результаты исследований. Производители автомобилей и автобусов обязательно указывают в карте сервисного обслуживания периодичность технического обслуживания и замену антифриза, моторных и трансмиссионных масел в силовых агрегатах на период гарантийного обслуживания.

Картой сервисного обслуживания автомобилей Hyundai предусмотрена замена антифриза через 45 тыс. км, ВАЗ, ПАЗ и Богдан через 60 тыс. км или 24 месяца эксплуатации.

Диагностируя антифриз, можно получить объективную информацию о процессе изменения основных показателей качества антифриза, электропроводности и скорости поступления продуктов коррозионного изнашивания сопряжений и деталей системы охлаждения двигателя при эксплуатации [10].

При выполнении технического обслуживания по замене антифриза А-40 на автомобиле ВАЗ-2115 с помощью технического эндоскопа производилась оценка состояния поверхности деталей системы охлаждения (рис. 1).

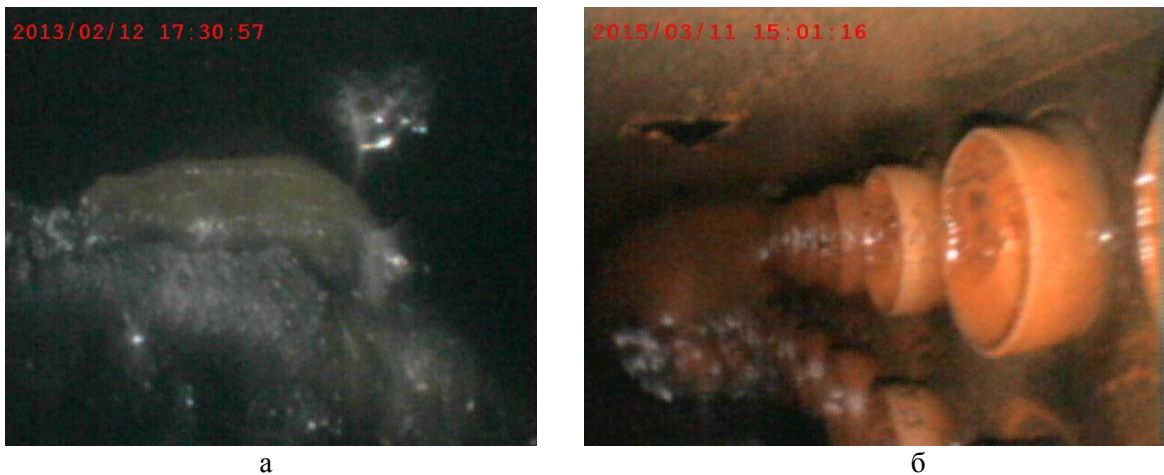


Рис. 1. – Мазеобразные отложения в нижнем резиновом патрубке радиатора (а) и коррозия в трубках радиатора (б)

Зная предельное значение концентрации продуктов коррозионного изнашивания и измеренное значение можно уточнить остаточный ресурс антифриза по формуле

$$L_{\text{ж}}^{\text{ост}} = (F_{\text{д.к}} - F_{\text{изм}}) \cdot V_{\text{о}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{а}} / 60И, \quad (1)$$

где $F_{\text{д.к}}$ – допустимая концентрация продуктов коррозионного изнашивания в антифризе, г/т;

$F_{\text{изм}}$ – измеренная концентрация продуктов коррозионного изнашивания в антифризе, г/т;

$V_{\text{о}}$ – объём системы охлаждения, м³;

$\rho_{ж}$ – плотность антифриза, т/м³;

V_a – скорость движения автомобиля, км/ч;

I – скорость поступления продуктов коррозионного изнашивания в антифриз, г/мин.

Изменение основных показателей от пробега характеризующих качество антифриза применяемого в автобусах (пробег автобусов с начала эксплуатации более 500 тыс. км) представлены в табл. 1.

Анализируя изменение показателей качества антифриза представленных в табл. 1 нужно отметить, что при пробеге 120 тыс. км замене подлежит антифриз в автобусе VANHOLL из-за повышенной коррозии стальных деталей.

Таблиця 1

Результаты анализа охлаждающей жидкости ХТ Antifreeze

Наименование показателя	ХТ Antifreeze (0 км)	Срок службы антифриза в двигателе автобуса		
		Неоплан 121 тыс. км	VANHOLL 120 тыс. км	Сетра 120 тыс. км
1. Плотность при 20°C, г/см ³	1,145	1,062	1,085	1,065
2. Температура застывания, °C	<-30	<-30	<-30	<-30
3. Водородный показатель, pH	6,5	6,61	7,08	7
4. Щелочность, см ³ , не менее	14,3	14	11,4	10,5
5. Электропроводность, Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	6,216·10 ⁻⁵	6,573·10 ⁻⁵	5,86·10 ⁻⁵	6,216·10 ⁻⁵
6. Вязкость кинематическая, мм ² /с, при 80°C	1,28	0,79	1,02	0,81
7. Коррозионное воздействие на металлы, г/м ² ·сут:				
– медь	0,0044	0,0075	0,0023	0,0111
– латунь	0,0028	0,0049	0,002	0,0073
– алюминий	0,0086	0,0104	0,0062	0,0086
– сталь	0,0578	0,0994	0,1308	0,0547
– чугун	0,1168	0,0628	0,1017	0,1035
8. Концентрация продуктов коррозионного изнашивания, г/т:				
Fe	-	236	338	326
Al	-	216	410	92
Cu	-	20	782	16
Sn	-	172	147	115
9. Скорость поступления алюминия в антифриз	мг/км	-	0,12	0,24
	мг/л	-	0,44	0,96
железа	мг/км	-	0,13	0,2
	мг/л	-	0,48	0,79
меди	мг/км	-	0,01	0,46
	мг/л	-	0,04	1,82

Выводы. Выполняя оценку основных показателей качества антифризов при проведении технического обслуживания и анализируя состояние поверхности деталей системы охлаждения с

помощью технического эндоскопа при замене охлаждающей жидкости. Можно точнее установить целесообразность эксплуатации автобуса на данном антифризе конкретного производителя и сроках его замены.

Источники:

1. Драгомиров С. Г. Фильтры для очистки охлаждающей жидкости в автомобильных двигателях / С. Г. Драгомиров, М. Шкапцова, А. Глинкин // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XIII междунар. науч.- практич. конф., 28–29 октября 2009 г. – Владимир: ВлГУ, 2009. – С. 307–311.
2. Безюков О. К. Формализация процессов старения охлаждающих жидкостей ДВС / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. В. Жукова // Двигатели внутреннего сгорания : науч.-техн. журнал. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 1989. – № 2. – С. 105–109.
3. Справочник химика / под ред. Никольского Б. П., 3 том, 2-е изд. доп. и пер. – М: Химия, 1964. – 1010 с.
4. Венцель Е. С. Улучшение качества и повышение сроков службы нефтяных масел / Е.С. Венцель, С. Г. Жалкин, Н. И. Данько. – Харьков: УкрГАЗТ, 2003. – 168 с.
5. Богородицкий Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л.: «Энергия», 1977. – 352 с.
6. Белоусов А. И. Измерение удельной объемной электропроводимости углеводородных жидкостей / А. И. Белоусов, И. В. Рожков, Е. М. Бушуева // Химия и технология топлив и масел. – 1985. – № 3. – С. 35–40.
7. Астапенков В. А. Охлаждающая жидкость экономит топливо / В. А. Астапенков // Автотранспорт Украины. – 1994. – №2. – С.15–16.
8. Галкин М.Л. Инновационные энергоэффективные антифризы для автомобильного транспорта / М.Л. Галкин, А.М. Рукавишников // Автомобильный транспорт: науч.-техн. журнал. – 2013. – №12. – С.24–25.
9. Яковлев Б.П. О коррозии и накипи в системах охлаждения тракторных двигателей / Б.П. Яковлев // Тракторы и сельхозмашины. – 1973. – №2. – С.17–19.
10. Наглюк М.И. Уточнение сроков смены антифризов при эксплуатации / М.И. Наглюк, В.П. Волков, И.С.Наглюк //Наукові нотатки: міжвузівський зб. – Луцьк, 2012. – Вип. 37.– С.246–256.

РЕЦЕНЗЕНТ:

ПОЛЯНСЬКИЙ О.С., доктор технічних наук, професор, Харківській національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харків, Україна.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2016.

УДК 629.083

И.А. Назаров¹, В.И. Назаров²¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет²Запорожский автомобилестроительный завод**ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОРМОЖЕНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

Рассмотрены мероприятия по повышению эффективности экстренных торможений легковых автомобилей, тормозные системы которых не оборудованы электронными системами слежения за процессом торможения, с учетом эксплуатационного, аэродинамического и конструктивного факторов при использовании динамических регуляторов, реализующих способ бортового распределения тормозных сил.

Ключевые слова: легковой автомобиль, эффективность торможения, эксплуатационный фактор, аэродинамический фактор, конструктивный фактор, динамический регулятор тормозных сил, бортовое распределение тормозных сил.

І.О. Назаров, В.І. Назаров

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Запорізький автомобілебудівний завод

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЛЬМУВАННЯ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

Розглянуто заходи щодо підвищення ефективності екстрених гальмувань легкових автомобілів, гальмівні системи яких не обладнані електронними системами стеження за процесом гальмування, з врахуванням експлуатаційного, аеродинамічного і конструктивного факторів при використанні динамічних регуляторів, які реалізують спосіб бортового розподілу гальмівних сил.

Ключові слова: легковий автомобіль, ефективність гальмування, експлуатаційний фактор, аеродинамічний фактор, конструктивний фактор, динамічний регулятор гальмівних сил, бортовий розподіл гальмівних сил.

I.A. Nazarov, V.I. Nazarov

Kharkov National Automobile and Highway University

Zaporozhe Automobile Building Plant

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS BRAKING PERFORMANCE FOR CARS

With an annual increase in the number of modern cars equipped with electronic systems monitor the braking process, on the roads of Ukraine operates a huge fleet of cars, brake systems which are equipped with brake-power of different designs and are not equipped with such. Consequently, during braking on a car has a large number of external forces caused by the action of aerodynamic and operational factors that lead not only to uneven distribution of the normal load between the axles, but also between the wheels of similar axes, i.e., to the on-board non-uniformity. Ideally, the system solves the problem of brake force distribution EBD. However, the installation of such a system in a passenger car requires basic design according to about 1,000 €. Thus, to improve road safety cars are not equipped with ABS may have arisen by implementing on-board non-uniformity due to the dynamic brake-power, tracks changes the normal load on the respective wheels of the car sides in all operating conditions.

Keywords: car, braking performance, operational factors, aerodynamic-call factor, constructive factor, the dynamic brake force control, on-board distribution of brake-forces.

Введение. При ежегодном росте количества современных легковых автомобилей [1–3], оборудованных электронными системами слежения за процессом торможения, на дорогах Украины эксплуатируется огромный парк легковых автомобилей, тормозные системы которых оборудованы регуляторами тормозных сил различных конструкций и не оборудованных таковыми. В большинстве случаев последние или не соответствуют требуемым характеристикам регулирования тормозных сил из-за изнашивания, или не работают вообще. Поэтому вопросам сохранения стабильности эффективности торможения легковых автомобилей и напрямую зависящей от них безопасности дорожного движения уделяется огромное внимание, оговоренное международными стандартами EWRO-5.

Решение вопроса зависит, прежде всего, от эффективности и стабильности функционирования тормозных систем легковых автомобилей в эксплуатационных условиях [2–8].

Работа выполнялась в соответствии с планом научно-исследовательских работ ХНАДУ и договора с конструкторско-эксплуатационным отделом Запорожского автомобилестроительного завода от 01.09.2015 о творческом сотрудничестве.

Анализ последних достижений и публикаций. Вопросам исследования стабильности показателей эффективности торможения в период эксплуатации одиночных легковых автомобилей посвящено значительное количество научных работ [1–8].

В общем случае эксплуатационные условия затормаживания легкового автомобиля включают [9]:

- а) местность и категорию дороги, где выполняется торможение (табл. 1);
- б) дорожные условия (табл. 2);
- в) дорожное покрытие: сухой асфальтобетон; мокрый асфальт; укатанный снег; «микс» (мокрый снег, грязь); лед;
- г) действие аэродинамического сопротивления: сила лобового сопротивления, подъемная и боковая аэродинамические силы [10, 11].

Таблица 1

Расчетная скорость движения автомобиля по категориям дорог [9]

Категория дороги	Максимальная скорость движения автомобиля, v_{amax} , км/час		
	основная		допустимая
	Равнинная местность	холмистая	горная
I-a	150	120	100
I-б	140	110	80
II	120	100	60
III	100	80	50
IV	90	60	30
V	90	40	30

Таблица 2

Поперечные уклоны проезжей части на виражах [9]

Категория дороги	Радиусы кривых в плане, R, м	Поперечный уклон, α , %
I-a, II-б категория	От 3000 до 1000	от 25 до 35
II, III категория	От 2000 до 1000,	от 25 до 35
IV, V категория	От 1000 до 800	от 35 до 45
Для всех категорий	От 800 до 700	45
	От 700 до 650	от 45 до 50
	От 650 до 600	от 50 до 60
	От 600 до 400 и менее	60

Как следует из выше сказанного, первые три условия характеризуют эксплуатационный фактор, четвертое – аэродинамический фактор. Однако влияние на процесс торможения оказывает и конструктивный фактор.

В литературных источниках [2, 10, 11] указывается, что возмущающие факторы, вызывающие изменение показателей тормозных свойств легковых автомобилей, носят случайный характер и определяются их конструктивными и эксплуатационными параметрами. Наиболее важными из них являются значение коэффициента сцепления шины с опорной поверхностью дороги, коэффициент распределения тормозных сил, положение центра масс автомобиля, перераспределение нормальных реакций между колесами при торможении и особенности конструкции элементов их тормозных систем [8, 10, 12-19].

Анализ возможности получения требуемых показателей тормозных свойств [2, 8, 18, 20, 21] эксплуатируемых легковых автомобилей позволил определить, что устойчивость при торможении обеспечивается применением регуляторов тормозных сил, препятствующим опережающему блокированию задних колес, а управляемость – использованием регуляторов, не позволяющим блокироваться передним колесам.

Доказано [2, 6, 8, 10, 12, 21], что в общем случае экстренного торможения легкового автомобиля имеет место разновременное блокирование колес разных осей. В связи с этим, при анализе изменения общей и осевых тормозных сил в функции времени, необходимо выделять три

фазы [21, с. 7–11]: движение автомобиля с незаблокированными колесами; движения автомобиля с заблокированными колесами какой-либо оси; движения автомобиля со всеми заблокированными колесами.

Фактическая траектория движения при торможении эксплуатируемого легкового автомобиля состоит из сопряженных прямолинейных и криволинейных участков. Это вызвано возмущающим воздействием дорожных неровностей, воздушных потоков, биением колес, зазорами в рулевом управлении, неравенством тормозных моментов на колесах различных бортов и т. д. с последующим управляющим воздействием водителя для сохранения направления движения [14–22].

Не решенная часть проблемы. Требованиями действующих международных и отечественных стандартов [23, 24], как необходимого критерия оценки работоспособности тормозной системы эксплуатируемого легкового автомобиля, является обеспечение эффективности и стабильности функционирования всех ее элементов при экстренных торможениях при прямолинейном движении по горизонтальной опорной поверхности дороги с сухим асфальтобетонным покрытием.

Обеспечение одновременного доведения до грани блокирования передних и задних колес при экстренном торможении в случае наклонной поверхности, а также на криволинейной поверхности с фиксированным радиусом поворота, является актуальным и при действии аэродинамической силы [8, 12, 14–18, 25, 26].

Цель и методы ее достижения. Целью работы является повышение стабильности тормозных свойств легковых автомобилей в эксплуатационных условиях. Для достижения указанной цели в теоретической части используются классические методы теоретической механики и теории качения колеса.

Причины снижения тормозных свойств легковых автомобилей. В процессе эксплуатации легковой автомобиль является частью системы «автомобиль–водитель–дорожная среда» и его свойства проявляются во взаимодействии с элементами этой системы [1-6, 27]. Поэтому значимость любого эксплуатационного свойства зависит и от условий, в которых данное свойство проявляется, т.е. от условий эксплуатации.

В целом условия эксплуатации характеризуются дорожными, транспортными и природно-климатическими условиями [1, 9, 27].

Оценка влияния эксплуатационного фактора. В наибольшей степени на эксплуатационные свойства легковых автомобилей влияют дорожные условия. К ним относят следующие: элементы профиля и плана дорог, рельеф местности, вид и ровность покрытия, интенсивность и режим движения.

Основные характеристики эксплуатируемых автомобильных дорог представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры элементов плана и продольного профиля автомобильных дорог [9]

Наименование элементов	Параметры в зависимости от скорости движения, км/ч									
	150	140	120	110	100	90	80	60	50	30
Наибольший продольный уклон, %	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	7,0	8,0	10,0
Наименьший радиус кривизны в плане, м	1200	1100	800	700	600	450	300	150	100	30

Действующие нормативы и стандарты [9] определяют основные нормы, параметры дорог и могут быть использованы для характеристики предельных условий движения легкового автомобиля.

Следовательно, поперечный уклон проезжей части, кроме участков, на которых предусмотрены виражи, назначенный в зависимости от материала дорожного покрытия, изменяется в широких пределах 3–10%. При этом наименьший радиус кривизны в плане составляет 3–1200 м (см. табл. 3). С учетом скоростного режима легковых автомобилей (см. табл.

1) это может привести к значительному перераспределению нормальных реакций на колесах при торможении.

Кроме того, взаимодействие колеса с опорной поверхностью происходит в пятне контакта, и это взаимодействие зависит от типа и состояния опорной поверхности, от конструкции и состояния шины (давление воздуха, рисунок протектора), нагрузки на колесах, скорости движения автомобиля, величины прикладываемого тормозного момента и других конструктивных факторов [8, 10–18].

При качении колеса по недеформируемой поверхности в зоне контакта, при передаче тормозного момента происходит проскальзывание элементов протектора по опорной поверхности. Чем больше величина передаваемого тормозного момента, тем большее количество элементов шины участвует в скольжении. В предельном случае все пятно контакта скользит по опорной поверхности [10, 13].

Коэффициент сцепления шины с мокрой дорогой уменьшается по сравнению со сцеплением с сухой дорогой на величину, пропорциональную параметру, который характеризует форму и размеры элемента в плане [10].

Тип и состояние дорожного покрытия влияют на сцепление между шиной и дорогой также, как и скорость движения автомобиля, [10, 13, 28]. Так, при скорости 60 км/час коэффициент трения скольжения составляет для асфальтобетона:

- с сухим покрытием – 0,7-0,8;
- с мокрым покрытием – 0,5-0,6;
- с мокрым и грязным – 0,35-0,4;
- с обледенелым покрытием – 0,05-0,15;
- со специальным покрытием – 0,9-1,0.

При увеличении скорости движения автомобиля коэффициент сцепления φ снижается в большей мере на мокрой дороге, чем на сухой (рис. 1, а) [10, 28].

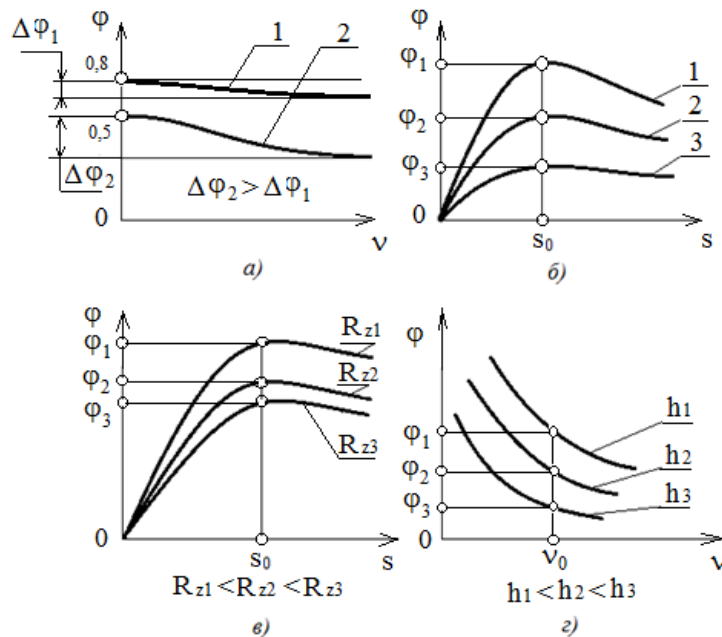


Рис. 1. Изменение коэффициента сцепления в эксплуатационных условиях:
1 – сухой асфальт; 2 – мокрый асфальт; 3 – укатанный снег

При увеличении нормальной нагрузки увеличивается давление в пятне контакта шины с опорной поверхностью и коэффициент сцепления снижается (см. рис. 1, в) [10, 28].

При увеличении толщины (h) водяной пленки в пятне контакта коэффициент сцепления также уменьшается (см. рис. 1, г) [10, 28].

Коэффициент сцепления существенно, но не однозначно на различных дорожных поверхностях зависит от величины и характера распределения нормальных давлений в контакте. Удельная тормозная сила в контакте элементов шины с дорогой состоит из двух составляющих, одна из которых пропорциональна нормальному давлению, а другая не зависит от величины

давления. Поэтому коэффициент сцепления не остается постоянным при изменении величины давления в контакте шины с дорогой. Соответственно, он увеличивается при снижении давления в шине и наоборот. Этому способствует и насыщенность рисунка протектора шины [10, 28].

Однако на мокрых дорогах эта зависимость может быть и противоположной. При уменьшении давления в пятне контакта ухудшается процесс выдавливания воды из-под протекторов, что приводит к снижению коэффициента сцепления. Особенно это важно при торможении, когда имеет место начало скольжения колеса (при доведении колес до грани блокирования). При этом не только снижается тормозная сила на колесе, но и колесо оказывается не в состоянии противостоять не большой величине боковой силы, проводящей к заносу [10, 28].

Наиболее полной характеристикой эластичного колеса по реализации тангенциальной силы в контакте является зависимость коэффициента сцепления φ от коэффициента относительного проскальзывания s (см. рис. 1, б) [10, 28].

Рассмотренная схема образования элементарных тангенциальных сил в контакте колеса с дорогой объясняют характер зависимости $\varphi(s)$, показанный на рис. 2, и позволяет анализировать влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на эту зависимость [10, 28].

При торможении легкового автомобиля на горизонтальном участке пути качение колес обеих осей происходит с 15–30% скольжением, при котором коэффициент сцепления имеет максимальное значение. В момент блокирования в пятне контакта колеса с дорогой возникает 100% скольжение, и коэффициент сцепления снижается до 20–30% (см. рис. 2).

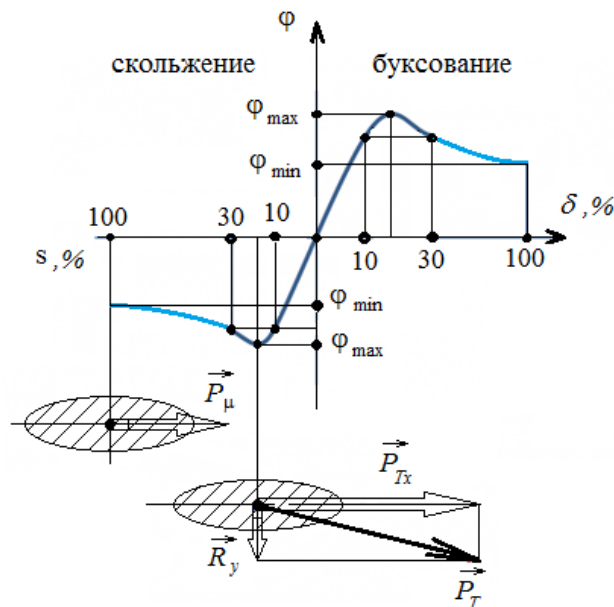


Рис. 2. Зависимость коэффициента сцепления от коэффициентов буксования и скольжения

При дальнейшем увеличении проскальзывания или пробуксовки колеса, коэффициент сцепления продольного направления уменьшается и в предельном случае, коэффициент сцепления в поперечном направлении стремится к нулю.

Наибольшее снижение коэффициента сцепления шин с дорогой происходит на мокрых гладких поверхностях с мелкозернистыми покрытиями, льдом, глиной. Крупнозернистые покрытия более стойки к аква планированию, так как в этом случае водяная пленка меньшей толщины покрывает неровности и, кроме того, вода лучше и быстрее удаляется под давлением шины с площади контакта по сети каналов между выступами покрытия [10].

При прочих равных условиях наибольшее значение коэффициента сцепления шины с дорожным покрытием бывает тогда, когда колесо вращается с одновременным 15–30% проскальзыванием по поверхности дороги [28].

Установлено, что динамический радиус колеса влияет на коэффициент сцепления шины [10], так как от него зависит распределение давлений по ширине беговой дорожки.

Следовательно, сцепление шины с дорогой определяет величину тормозной силы на всех колесах и оказывает влияние на продольную и боковую устойчивость автомобиля [2, 6, 19, 20].

Оценка влияния конструктивного фактора. Из литературных источников [10, 28] следует, что тормозной путь во многом зависит от коэффициента сцепления шин с дорогой. Такой

вывод используется для улучшения сцепных качеств шин без заметного ухудшения износостойкости протектора, так как коэффициент сцепления шины, например, с мокрой дорогой возрастает при уменьшении размеров элемента рисунка.

Таким образом, в процессе эксплуатации влияние конструктивных факторов на реализацию коэффициента сцепления в пятне контакта шины с опорной поверхностью можно характеризовать в общем случае следующими показателями.

Рисунок протектора. На твердых и сухих покрытиях коэффициент сцепления увеличивается при увеличении коэффициента насыщенности контакта. На мокрых дорогах с твердым покрытием коэффициент сцепления увеличивается при улучшении выхода воды и грязи с поверхности контакта. На деформируемых дорогах коэффициент сцепления увеличивается при увеличении площади среза элементов грунта и очищении рисунка протектора [10, 28].

Динамический радиус колеса. Увеличение динамического радиуса колеса приводит к увеличению коэффициента сцепления незначительно на дорогах с твердым покрытием и существенно на деформируемых дорогах, что объясняется увеличением угла наклона реакции плоскости дороги, в результате чего уменьшается отрицательная составляющая продольной реакции [10].

Влияние эксплуатационных факторов на реализацию коэффициента сцепления в пятне контакта шины с опорной поверхностью можно характеризовать в общем случае следующими показателями.

Тип и состояние покрытия. Сцепление шины с дорогой определяет величину тормозной силы на всех колесах и оказывает влияние на продольную и боковую устойчивость автомобиля [14].

Шероховатость покрытия. Оптимальный размер микронеровностей 2-3 мм, углы при вершине неровностей – $70-120^{\circ}$ [10]. При износе дороги коэффициент сцепления снижается, поэтому необходима специальная обработка покрытий, для восстановления сцепных свойств.

Скорость движения. С увеличением скорости коэффициент сцепления снижается [10], причем в большей степени на мокрой и грязной дороге (пленка воды, гидродинамическое давление и др.).

Износ протектора. При износе протектора коэффициент сцепления уменьшается, причем более интенсивно при износах превышающих 50%. При полных износах и недостаточной шероховатости покрытия коэффициент сцепления снижает коэффициент торможения до 0,2-0,25 [21]. Требованиями стандарта [24] установлена предельная глубина рисунка протектора для легковых автомобилей – до 1,6 мм.

Давление воздуха в шине. На сухих чистых и твердых покрытиях увеличение давления приводит к некоторому уменьшению коэффициента сцепления [10]. На деформируемых дорогах уменьшение давления приводит к росту коэффициента сцепления.

Нормальная нагрузка. На деформируемых дорогах при увеличении нагрузки увеличивается отрицательная составляющая продольной силы, являющаяся проекцией реакции на плоскость дороги. На дорогах с твердым покрытием увеличение нагрузки приводит к уменьшению коэффициента сцепления [10].

Если значения коэффициентов сцепления на всех колесах обеих осей легкового автомобиля одинаковы, то оптимальное соотношение между тормозными силами равно соотношению между вертикальными реакциями, действующими на левом и правом колесе каждой оси [2, 10, 21]. Это обстоятельство объясняется тем, что, во-первых, коэффициент сцепления (см. рис. 1) достигает своего максимального значения при определенном коэффициенте скольжения. Если такая величина скольжения достигается одновременно у всех колес, то тормозная сила на каждом из них будет предельно возможной. При этом будет достигаться максимально возможное замедление и соответственно, минимально возможный тормозной путь. Если у колес какой-либо из осей оптимальная величина скольжения будет достигнута раньше, то на остальных колесах предельная тормозная сила по сцеплению еще не достигнет своего максимального значения. Дальнейшее нажатие на тормозную педаль с целью увеличения давления в контурах тормозного привода соответствующих колес (тормозных сил), которые еще не достигли оптимальной величины скольжения, приведет к увеличению скольжения у колес, достигших оптимального скольжения первыми.

Кроме того, качение заторможенного колеса со скольжением более оптимального является не устойчивым, так как при неизменной величине тормозного момента на колесе скорость скольжения растет и за короткое время достигает своего максимального значения и блокируется.

Вследствие чего возникает занос. Коэффициент сцепления при этом снижается [10, 19–21], и, как результат, – уменьшается тормозная сила и величина замедления автомобиля, и возрастает тормозной путь.

Во-вторых, такой процесс торможения оказывает существенное значение на способность затормаживаемых колес противостоять действию внешним боковым силам, к которым относятся поперечная составляющая силы веса, возникающая в результате поперечного наклона дороги, поперечная сила ветра, центробежные силы, возникающие вследствие движения по дороге с фиксированным радиусом кривизны, приводящие к неравности тормозных сил левого и правого бортов легкового автомобиля [8, 15–18]. Таким образом, при полном скольжении колесо не может воспринимать боковую силу без поперечного скольжения.

Поэтому, если колеса блокируются либо достигают такой величины скольжения, при которой внешние боковые силы вызывают поперечное скольжение оси автомобиля, водитель, чтобы сохранить курсовую устойчивость, должен снизить усилие на тормозной педали даже тогда, когда тормозные силы на всех остальных колесах не достигли своего максимального значения.

Оценка влияния аэродинамического фактора. При оценке эффективности торможения легкового автомобиля классически принимались допущения [21], при которых не учитывалось действие эксплуатационного и аэродинамического фактора.

Классически расчет тормозной эффективности проводился из условия обеспечения максимальных замедлений на горизонтальном участке пути с сухим асфальтобетонным покрытием, т.е. для случая экстренных торможений. Кроме того, при анализе перераспределения нормальных реакций считалось, что действие от аэродинамического фактора (продольная, поперечная и горизонтальная составляющие аэродинамической силы) приложено в одной точке – метацентре, совпадающей с центром масс легкового автомобиля, а в ряде случаев и вообще не учитывалось [10, 21].

Следовательно, во время торможения на легковой автомобиль действует большое количество внешних сил, вызванных действием эксплуатационного и аэродинамического факторов, которые приводят не только к неравномерному распределению нормальных нагрузок между осями [10], но и между колесами одноименных осей [8, 15–18], т.е. к бортовой неравномерности.

Так, по данным литературных источников [10, 11] лобовое сопротивление, состоит из пяти составляющих (рис. 3), среди которых сопротивление формы 55-60%, внутреннее сопротивление кузова 10-15%, дополнительное сопротивление 10-15%, индуктивное сопротивление 5-10% (вызывается взаимодействием боковой и подъемной силы в направлении продольной оси), сопротивление трению поверхностных слоев автомобиля 5-10%.

При этом аэродинамическое сопротивление колес – до 5%.

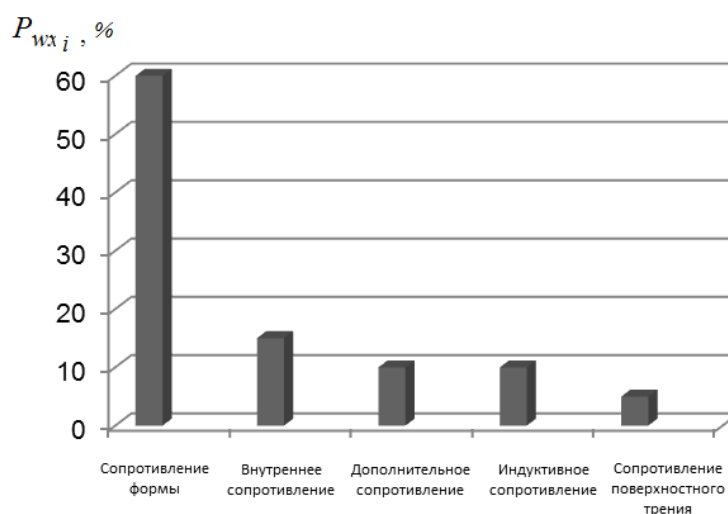


Рис. 3. Диаграмма возможного распределения составляющих аэродинамического сопротивления легкового автомобиля

Способы решения проблемы. В идеале решает проблему система распределения тормозных усилий EBD (англ. Electronic brake force distribution), как продолжение развития

системы ABS. Система EBD анализирует положение каждого колеса при торможении и строго индивидуально дозирует тормозное усилие на нем. Известно, что при торможении легкового автомобиля основная доля нагрузки распределяется на передние колеса, в то время как вертикальная нагрузка на задние уменьшается. В результате это может привести к тому, что задние колеса могут заблокироваться, и потеря устойчивости неизбежна.

Эта проблема может быть решена двумя способами [10]: автоматической регулировкой силы воздействия тормозных колодок на диски или барабаны (регулирование давления в контурах тормозного привода) или уменьшением размеров тормозных дисков задних колес и/или увеличением их радиуса качения, что является невозможным.

В некоторых автомобилях система автоматической регулировки применяется для сохранения курсовой устойчивости при торможении [2, 10, 14, 19] в повороте, когда центр масс автомобиля переносится в сторону колес идущих по внешнему радиусу. В данном случае тормозные усилия распределяются не только между осями, но и между колесами различных бортов [16].

При смешанном покрытии электроника по разности частот вращения определяет, что колеса попали на участки с разнородным покрытием, и уменьшает тормозные силы на колесах, которые имеют худшее сцепление с дорогой.

Однако установка такой системы на легковой автомобиль базовой конструкции по данным завода ЗАЗ составляет примерно 1000 €.

Недостаток – относительная дороговизна такой системы.

Такие задачи в некотором роде решают и регуляторы тормозных сил существующих конструкций [2, 7, 10, 12], способствуя увеличению использования потенциально возможной удельной тормозной силы по мере изменения осевой нормальной нагрузки при торможении [17] за счет различных способов распределения тормозных усилий между осями автомобиля, что в результате повышает эффективность торможения легкового автомобиля на горизонтальных участках пути.

Однако они не способны реализовать бортовую неравномерность нормальных реакций на колесах автомобиля, затормаживаемого в эксплуатационных условиях.

Таким образом, повысить безопасность дорожного движения легковых автомобилей, не оборудованных ABS, возможно, реализовав возникшую бортовую неравномерность, за счет динамических регуляторов тормозных сил, способных отслеживать изменение нормальной нагрузки на колесах соответствующих бортов автомобиля в любых эксплуатационных условиях.

Выводы. В связи с прогнозируемым ростом интенсивности и скорости движения легковых автомобилей на дорогах Украины, а также пропускной способности автомобильных дорог, к эффективности и стабильности тормозных систем предъявляются повышенные требования, которые могут быть достигнуты за счет ряда мероприятий, в том числе за счет реализации бортовой неравномерности тормозных сил.

Существующие устройства, применяемые в тормозных приводах легковых автомобилей, не оборудованных ABS, не обеспечивают наивысшей эффективности экстренных торможений вследствие недоиспользования удельной бортовой тормозной силы в эксплуатационных условиях, так как ранее заложенное их основное назначение – это снижение опасности заноса автомобиля.

Для повышения стабильности показателей тормозных свойств легковых автомобилей в эксплуатационных условиях необходим способ бортового распределения тормозных сил, учитывающий перераспределение нормальных реакций между колесами каждого борта автомобиля с учетом аэродинамического фактора и периодов торможения с заблокированными и неблокированными колесами, что обеспечит максимально полную реализацию удельной тормозной силы автомобиля.

Список использованных источников:

1. Ярещенко Н.В. Довгострокове прогнозування швидкостей руху на автомобільних дорогах: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми» / Н.В. Ярещенко. – Харків, 1999. – 16 с. 2. Стабільність експлуатаційних властивостей колесних машин / [Подригало М.А., Волков В.П., Карпенко В.А. и др.]; под ред. М.А. Подригало. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 614 с. 3. Shang M. Braking force dynamic coordinated control for hybrid electric vehicles / [M. Shang, L. Chu, J. Guo, Y. Fang, F. Zhou] // In Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Advanced Computer Control (ICACC '10). – Shenyang, China, 2010. – vol. 4. – pp. 411–416. 4. Jo C. Cooperative regenerative braking control algorithm for an automatic-transmission-based hybrid electric vehicle during a downshift / [C. Jo, J. Ko, H. Yeo, T. Yeo, S. Hwang, H. Kim] // Journal of Automobile Engineering. – 2012. – vol. 226. –no. 4. – pp. 457–467. 5. Zhang J. Integrated control of braking energy regeneration and pneumatic anti-lock braking / J. Zhang, X. Chen, P.-J. Zhang // Journal of

Automobile Engineering. – 2010. – vol. 224. – no. 5. – pp. 587–610.6. Реализация интеллектуальных функций в электронно-пневматическом управлении транспортных средств: монография/ А.Н. Туренко, В.И. Клименко, Л.А. Рыжих и др. – Х.: ХНАДУ, 2015. – 450с. 7. Совершенствование способов регулирования выходных параметров тормозной системы автотранспортных средств / [Туренко А.Н., Богомолов В.А., Клименко В.И. и др.]. – Харьков: Изд-во ХНАДУ (ХАДИ), 2002. – 400 с. 8. Подригало М.А. Анализ неравномерности вертикальных реакций на колесах и ее влияние на эксплуатационные свойства автомобиля/ Подригало М.А. // Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы: IV-ая междунар. научно-техн. конф., 11-15 апр. 2000 г. – Севастополь: СевГТУ, 2000. – С. 76-79.9. Державні будівельні норми України. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування: ДБНВ.2.3-4:2007. – [Чинні від 2008-03-01]. – Київ: Мін регіон буд України, 2007. – 91 с. 10. Агейкин Я.С. Теория автомобиля: учеб. пособ. / Я.С. Агейкин, Н.С. Вольская. – М.: МГИУ, 2008. – 318 с. 11. Гухо В.Г. Аэродинамика автомобиля / Гухо В.Г.; [пер. с немец.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 403 с. 12. Русановский А.Е. Влияние эксплуатационных факторов на тормозную динамику автомобиля, оборудованного регуляторами тормозных сил: автореф. дис. на соискание наук, степени канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта»/ А.Е. Русановский. – Волгоград, 1982. – 18 с. 13. Расчет конструкций, испытания и эксплуатация автобусов и троллейбусов, их агрегатов и узлов / Труды ВКЭИ автобуспрома. – Львов: Высшая школа, 1975. – С. 95-110. 14. Подригало М.А. Неравномерность вертикальных реакций на колесах автомобиля и его устойчивость при торможении / М.А. Подригало, В.А. Карпенко // Автомобильная промышленность. – 2001. – №2. – С. 19-21.15. Назаров В.И. Математичне моделювання перерозподілу реакцій на осях під час екстреного гальмування на дорозі з нахилом / Назаров В.И., Назаров О.И., Назаров І.О. // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків, 2014. - №39(1082). – С. 134–140. 16. Назаров А.И. Перераспределение вертикальных реакций на колесах легкового автомобиля, движущегося в воздушном потоке по горизонтальной дороге с фиксированным радиусом кривизны / Назаров А.И., Назаров И.А., Назаров В.И. // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Автомобіле- і тракторобудування». – Харків, 2015. – №8(1117). – С. 57-65. 17. Назаров В.И. Перераспределение вертикальных нагрузок при экстренном торможении легкового автомобиля, движущегося в воздушном потоке на горизонтальном участке дороги / Назаров В.И. // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Механіка та машинобудування». – Харків, 2014. – №1. – С. 102-110. 18. Назаров И.А. Обеспечение безопасности движения двухосных транспортных средств при выполнении экстренных торможений в эксплуатационных условиях: (конф. «Молодые ученые – альтернативной транспортной энергетике», 27-28 апреля 2015 г.: сб. научн. трудов «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе») [Электронный ресурс] / Назаров И.А., Назаров В.И., Назаров А.И. – Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГЛА, 2015. – Т.2. – Вып. 2. – С. 218–222.– ISSN 2409-7829. 19. Бобошко А.А. Анализ факторов, влияющих на управляемость и устойчивость автомобиля / Бобошко А.А. // Автомобильный транспорт. – Харьков: Изд-во ХГАДТУ, 1998. – Вып. 1. – С. 62–63. 20. Бобошко А.А. Оценка предельных по условиям сцепления колес с дорогой, показателей управляемости автомобилей и тракторов / Бобошко А.А. // Автомобильный транспорт. – Харьков, 2001. – Вып. 7. – С. 92–94. 21. Булгаков Н.А. Исследование динамики торможения автомобиля. Научное сообщение №18/ Булгаков Н.А., Гредескул А.Б., Ломака С.И. – Харьков: Изд-во госуниверситета им. А.М. Горького, 1962. – 36 с. 22. Влияние тяговых моментов на динамическое распределение вертикальных реакций между колесами автомобиля / [Подригало М.А., Клец Д.М., Назарько О.А., Потапов Н.Н.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – Вып.39. – С. 64–74. 23. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів категорій М, N, і О стосовно гальмування (Правила ЕЭК ООН N 13-09:2000, IDT): ДСТУ UN/ECER 13-09-2002. – [Чинний від 01.07.2005]. – Офіц. вид. – (Державний стандарт України). 24. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання (БЗ №11-12-2010/436): ДСТУ 3649: 2010. – Офіц. вид. – [Чинний від 28.11.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 26 с. – (Національний стандарт України). 25. О распределении тормозных сил между осями автомобиля при торможении на уклоне: Гредескул А.Б. // Труды конф., 6–9 июня 1968 г. Тбилиси: Мецниереба, 1968. – с. 56–62. 26. Гредескул А.Б. Законы регулирования тормозных сил автомобиля при действии боковой силы в процессе торможения / Гредескул А.Б., Подригало М.А., Фаворов Н.Ю. – Харьков: ХАДИ, 1980. – 24с. 27. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель/ [Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С., Гольдин Г.В. и др.] /под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с. 28. Зотов Н.М. Применение ф-сх диаграммы при расчете динамики затормаживаемого колеса / Н.М. Зотов, Е.В. Балакина // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М.: Наука, 2007. – №2. – С. 103–109. – ISSN 0235-7119.

Рецензенты:

Волков В.П., д.т.н., проф. ХНАДУ;

Бондаренко А.И., д.т.н., доцент НТУ «ХПИ».

УДК 621.767

В.М. Пащенко*Національний технічний університет України «КПІ»***ВТРАТИ В ЕЛЕКТРОДИ ПЛАЗМОТРОНІВ НА ПЛАЗМОУТВОРЮВАЛЬНИХ СУМІШАХ ПОВІТРЯ З ВУГЛЕВОДНЯМИ**

Розглянуті питання впливу режимних параметрів роботи генератора плазми на втрати тепла в електроді та міжелектродну вставку плазмотронів, які працюють на сумішах повітря з вуглеводневими газами. Запропоновані залежності, які з точністю, достатньою для інженерних розрахунків, пов'язують основні режимні параметри роботи електродів із рівнем втрат потужності в елементи конструкції плазмового генератора. Запропоновані раціональні, з точки зору мінімізації втрат, режими експлуатації плазмотронів. Бібліогр. 6, рис. 7.

Ключові слова: плазмотрон, термохімічний катод, струм дуги, вміст вуглеводневого компонента, теплові втрати в електроді, втрати в міжелектродну вставку

В.Н. Пащенко*Национальный технический университет Украины «КПИ»***ПОТЕРИ В ЭЛЕКТРОДЫ ПЛАЗМОТРОНОВ НА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЯХ ВОЗДУХА С УГЛЕВОДОРОДАМИ**

Рассмотрены вопросы влияния режимных параметров работы генератора плазмы на потери тепла в электродах межэлектродную вставку плазмотронов, работающих на смесях воздуха с углеводородными газами. Предложены зависимости, которые с точностью, достаточной для инженерных расчетов, связывают основные режимные параметры работы электродов с уровнем потерь мощности в элементы конструкции плазменного генератора. Предложены рациональные, с точки зрения минимизации потерь, режимы эксплуатации плазмотронов. Библиогр. 6, рис. 7.

Ключевые слова: плазмотрон, термохимический катод, ток дуги, содержание углеводородного компонента, тепловые потери в электродах, потери в межэлектродную вставку

V.M. Pashchenko*National Technical University of Ukraine "KPI"***LOSSES INTO THE PLASMA TORCH ELECTRODES WORKING ON PLASMA-FORMING MIXTURES OF AIR WITH HYDROCARBONS**

The questions of the effect on regime parameters of plasma generator to heat loss in the electrodes and inter-electrode insert plasma torches are shown. Researches are carried out on the plasma torches under two basic concepts - two-electrode and electrodes with interelectrode inserts. Plasma-forming mixture of air with hydrocarbon gases were used. The relations of losses in the anode, cathode and interelectrode insert in dependence of the arc current, the plasma-forming mixture and the flow rate ratios between its components are obtained. Formulas that with an accuracy sufficient for engineering calculations that connect values of the main regime parameters of the electrodes with a power level of losses in the plasma generator design elements are proposed as well as the rational from the point of view of minimizing heat loss, modes of operation of plasma torches. Bibliography. 6, Fig. 7.

Keywords: plasma torch, a thermochemical cathode, the arc current, the content of the hydrocarbon component, the heat losses in the electrodes, the losses into interelectrode insert

У плазмових генераторах, які використовують кисневмісні плазмоутворювальні газові суміші, широко використовуються термохімічні катоди на основі Zr або Hf [1, 2]. Такі електроди мають обмежений ресурс, який, зазвичай, не перевищує 5...6 год. Ресурс електрода суттєво залежить від струмового навантаження, складу плазмоутворювальної суміші, якості стабілізації плями дуги на активній вставці катода та ефективності охолодження теплонапружених елементів конструкції – від теплового режиму роботи катода.

У загальному випадку, тепловий режим роботи термохімічного катода визначається: надходженням тепла через пляму прив'язування дуги; Джоулевым теплом, що виділяється при протіканні струму через елементи конструкції катодного вузла; теплом, що виділяється (поглинається) при протіканні хімічних реакцій на катоді та у прикатодному просторі; потоками енергії випромінювання стовпа дуги, що при певних умовах можуть поглинатися елементами конструкції катода; відведенням тепла від зовнішньої поверхні мідної обойми електрода та від катодотримача плазмоутворювальним газом, який їх омиває, та ін.

Основним режимним фактором, який визначає рівень втрат тепла в елементи конструкції катодного вузла, є струм дуги. Загальновідомим є факт практично пропорційного зростання втрат у катода із збільшенням струму дуги [9, 10, 12, 14].

Для термохімічних катодів рівень втрат може суттєво підвищити випромінювання частини стовпа дуги, яка розміщується у кратері, що утворюється у процесі ерозії активної вставки. Тобто тепловий потік у катод є функцією загального часу його роботи і збільшується у міру вигорання стрижня із цирконію (гафнію).

На теплові втрати у катод може вплинути також коефіцієнт витрати окиснювача, що змінює хімічний склад плазмоутворювальної суміші, створюючи тим самим умови для горіння горючого компонента на поверхні катода.

Для виявлення впливу зазначених режимних параметрів і конфігураційних факторів на рівень теплових потоків у катод був проведений цикл експериментальних досліджень взаємозв'язку кількості тепла, що сприймають елементи конструкції катодного вузла, із струмовим навантаженням електрода, витратою та складом плазмоутворювальної суміші повітря із вуглеводневим газом, тривалістю роботи катода (глибиною кратера на активній вставці). Дослідження проведені на двоелектродному плазмотроні із автогазодинамічною стабілізацією дуги. Результати досліджень наведені на рис. (1 – 3).

Збільшення витрати плазмоутворювального газу інтенсифікує відведення тепла від конструктивних елементів катода і дещо знижує рівень теплових втрат у ньому. Характер цієї нелінійної залежності для випадку застосування повітря визначається температурою поверхонь, що охолоджуються (струмом дуги). За умови менших струмових навантажень, коли температура поверхні порівняно менша, збільшення витрати слабо впливає на тепловий стан катода.

Підвищення струму дуги і, відповідно, теплове навантаження на катод веде до зростання температури поверхні електрода. За таких умов навіть незначне збільшення витрати газу, який омиває нагріту поверхню, сприяє інтенсифікації відведення тепла (рис. 1).

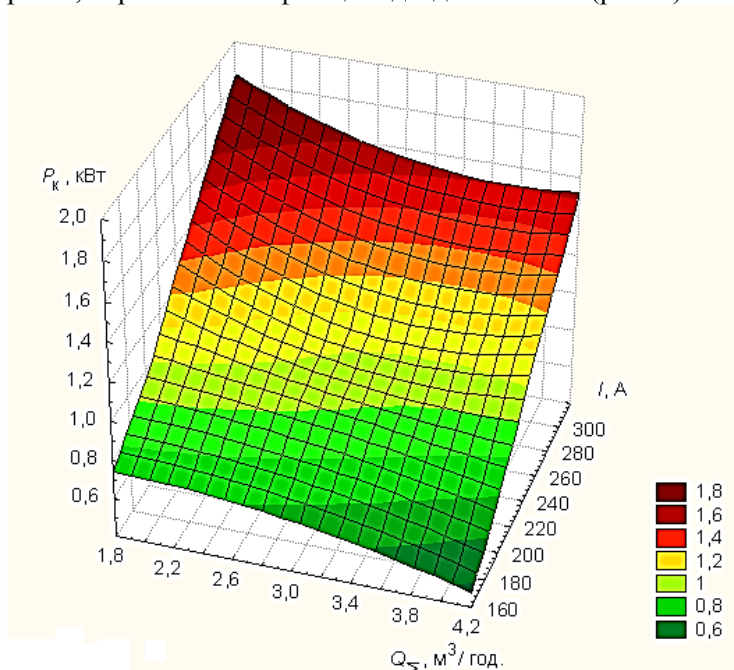


Рис. 1. - Залежність втрат потужності у катоді від витрати плазмоутворювального повітря і струму дуги

Залежність втрат від струму дуги для плазмоутворювального повітря практично лінійні у всьому дослідженому діапазоні зміни струму.

У разі застосування газоповітряної суміші залежність теплових втрат у катод від струму дуги залишається лінійною. Натомість характер залежності втрат від сумарної витрати плазмоутворювального газу, на відміну від повітря, дещо змінюється (рис. 2). Особливо це характерно напруженим тепловим режимам роботи катода на верхній межі дослідженого діапазону струмів.

Якщо за помірних втрат тепла у катоді (значення струму дуги знаходиться у нижній частині дослідженого діапазону) зі збільшенням витрати плазмоутворювальної суміші рівень теплових втрат, як і у випадку з повітрям, знижується, то на більших струмах дуги ця залежність стає менш помітною. У верхній частині діапазону струмів зі збільшенням витрати плазмоутворювальної суміші втрати тепла у катоді навіть дещо зростають. Цей факт можна пояснити зростанням доли

тепла, яке надходить до елементів конструкції катода в результаті реакцій горіння вуглеводневого компонента, кількість якого із підвищенням витрати плазмоутворювальної суміші збільшується. Проходженню таких екзотермічних реакцій сприяє підвищення температури стінки обойми катода через значні теплові потоки у нього за умови високих струмових навантажень.

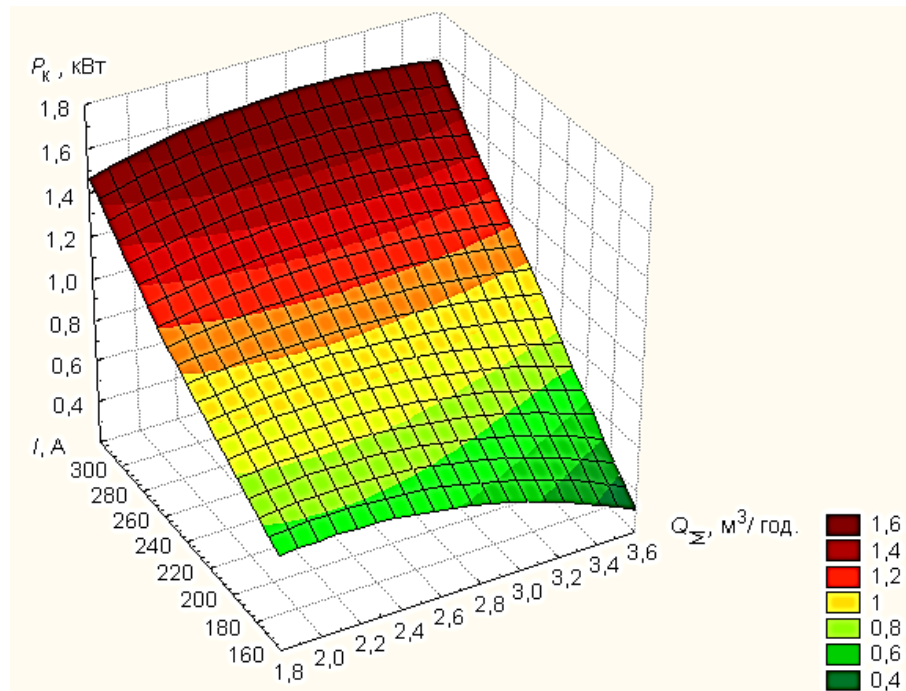


Рис. 2. - Залежність втрат потужності у катоді від витрати плазмоутворювальної суміші повітря з вуглеводневим газом ($\alpha = 1$) і струму дуги

На рис. 3 показана залежність втрат у катоді від кількості метану у вихідній плазмоутворювальній суміші і струму дуги.

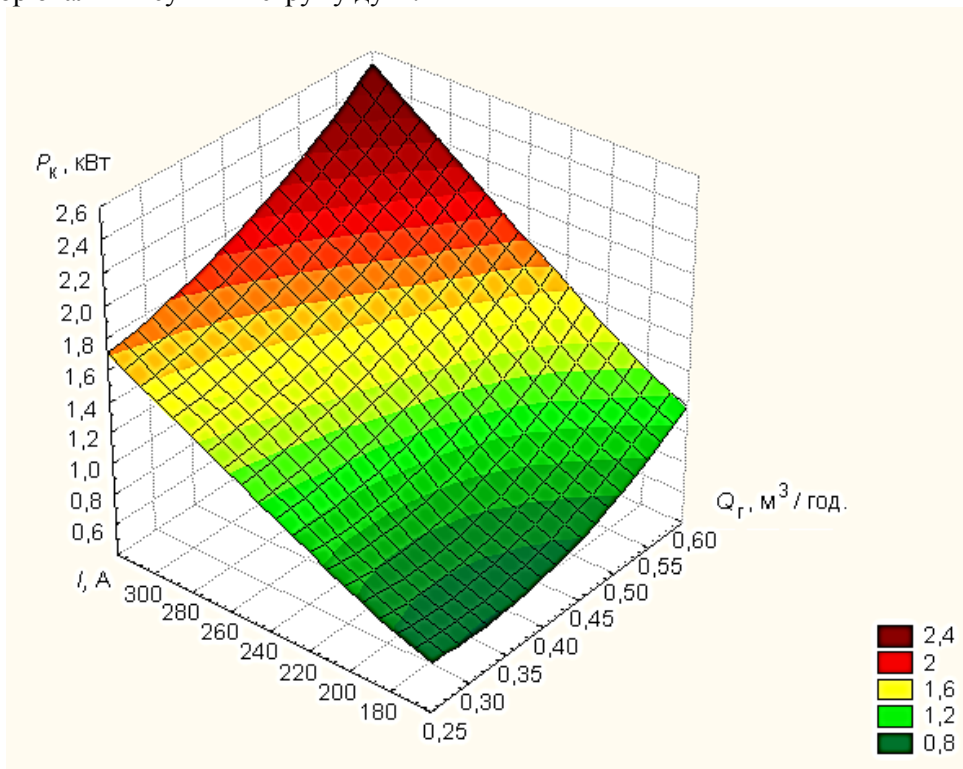


Рис. 3.- Залежність втрат потужності у катоді від витрати вуглеводневого компонента (CH_4) і струму дуги

Наявна лінійна залежність втрат від струму дуги (чим більше струм, тим вище рівень втрат тепла) і нелінійна зростальна залежність втрат від вмісту вуглеводневого компонента.

Підвищення темпу тепловиділення зі зростанням вмісту метану можна пояснити деяким погіршенням умов стабілізації катодної плями та зміни конфігурації (збільшення діаметра) приелектродної ділянки дуги через появу піровуглецю за умови застосування «багатих» сумішей і підвищенням загальної температури газу через часткове проходження реакцій горіння вуглеводневих компонентів.

Із точністю, достатньою для інженерних розрахунків (до 10 %), втрати у термохімічний катод (для досліджених діапазонів параметрів його роботи) можна описати залежністю:

$$P = (36,2 + 1,448 I) e^{\left(\frac{0,975}{Q_{\Sigma}} + 3,48 n \right)},$$

де P – втрати енергії у катод, Вт; I – струм дуги, А; Q_{Σ} – витрата плазмоутворювальної суміші, м³/год.; n – вміст вуглеводневого компонента, долі одиниці.

Встановлення основних закономірностей втрат енергії у катод має вирішальне значення для організації оптимальних режимів роботи термохімічних електродів, які б забезпечили максимальний ресурс роботи цього найменш надійного елемента конструкції плазмового генератора. Хоча у загальному енергетичному балансі плазмотрона більш суттєву роль відіграють втрати у вихідний електрод (анод).

Рівень втрат у вихідний електрод визначає тепловий ККД плазмотрона, як пристрою, а характер розподілу втрат за довжиною трубчастого вихідного електрода – значною мірою його ресурс та конструктивні особливості системи охолодження.

Результати вимірювань наведені на рис. 4. Дослідження доводять практично лінійну залежність втрат тепла у анод плазмотрона від струму.

Зростання втрат зі збільшенням вмісту вуглеводневого компонента добре описується

$$\frac{-(x-b)^2}{2c^2}$$

експоненціальною залежністю виду $y = a e^{\frac{-(x-b)^2}{2c^2}}$.

Підвищені втрати із переходом від повітря до суміші його із вуглеводнями обумовлені підвищенням потужності дуги, яка розміщена в межах вихідного електрода і зміною хімічного складу (теплопровідності) прошарку газу між дугою і стінкою анода.

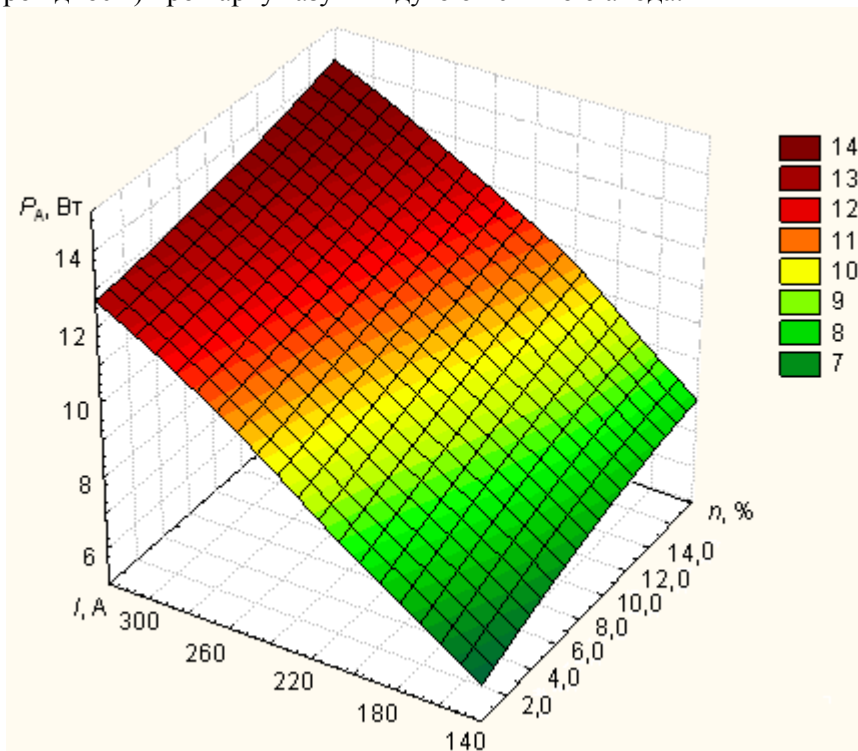


Рис. 4. - Залежність втрат тепла у вихідний електрод (анод) розпилювача

Враховуючи сказане, із точністю, достатньою для інженерних розрахунків (до 5 %), втрати в анод двоелектродних газоповітряних плазмотронів можна задати залежністю:

$$P = 0,041 e^{-3,73(n-0,18)^2} I$$

де P – втрати енергії у анод, кВт; I – струм дуги, А; n – вміст вуглеводневого компонента (метану), долі одиниці.

Для плазмотрона з одиночною міжелектродною вставкою (МЕВ) дуговий канал частково утворений електронейтральною вставкою, яка теж сприймає тепло електричної дуги і погіршує тим самим енергетичний баланс пристрою. Характерною особливістю дослідженої конструкції плазмотрона є послідовне, без зовнішніх комунікацій, охолодження катода та МЕВ, що не дозволяє експериментально окремо виміряти втрати енергії у названі вузли генератора плазми. Але враховуючи те, що основні залежності втрат у термохімічний катод не залежать від принципової схеми плазмотрона, для визначення втрат у МЕВ, маючи сумарні значення для двох вузлів, можна застосувати залежності втрат у катод, отримані для двоелектродних плазмотронів (див. рис. 1 – рис.3). Результати вимірювань (із урахуванням вищесказаного) наведені на рис. 5.

Наявна практично лінійна залежність втрат у МЕВ від струму дуги – зі збільшенням струму втрати зростають. Ця залежність досить чутлива до вмісту вуглеводневого компонента у вихідній плазмоутворювальній суміші. У міру зростання вмісту метану (за умови сталої загальної витрати плазмоутворювального газу) темп зростання втрат зі збільшенням струму знижується. Вочевидь, це обумовлено зниженням температури газового середовища при переході на «багаті» суміші, яка є визначальним фактором рівня випромінювання дуги і потоку нагрітого газу (відомо, що втрати тепла у стінку дугового каналу на початковій ділянці течії газу у дуговому каналі плазмотрона визначаються, головним чином, випромінюванням середовища).

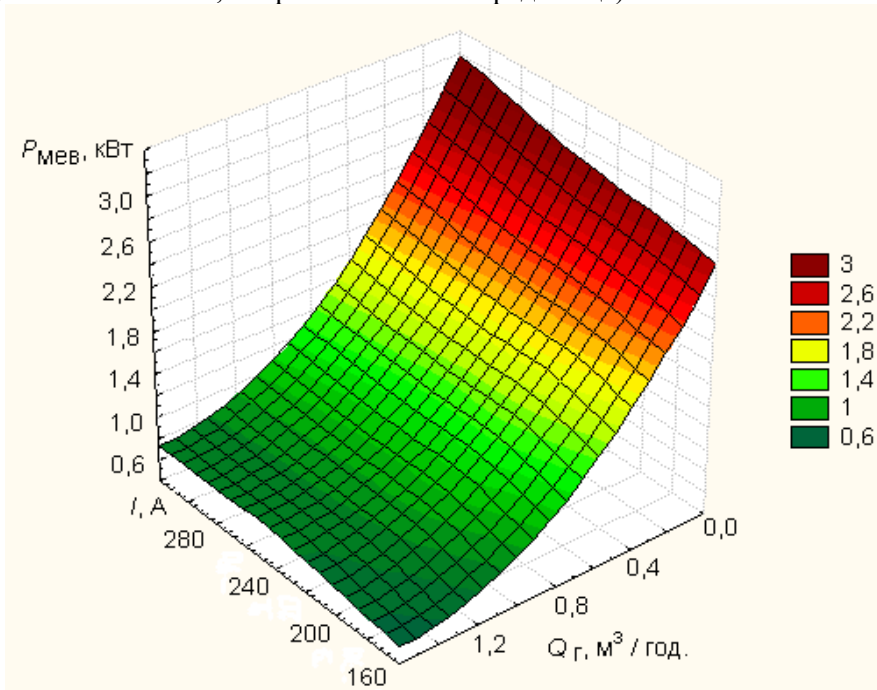


Рис. 5. - Залежність втрат тепла у міжелектродну вставку розпилювача із поодинокією МЕВ і самовентиляцією зазору між МЕВ та анодом ($Q_{\Sigma} = 5,5 \text{ м}^3 / \text{год.}$)

Більш суттєво загальний рівень втрат тепла у МЕВ залежить від вмісту вуглеводневого компонента. У міру збагачення плазмоутворювальної суміші спостерігається різке зниження втрат тепла у вставку. Особливо високим є темп зниження втрат при переході від повітря (коефіцієнт витрати окиснювача $\alpha = \infty$) до стехіометричної суміші ($\alpha = 1$).

Із подальшим зниженням α темп падіння втрат уповільнюється і, починаючи зі значень 0,3...0,4, їх рівень залишається практично незмінним.

Характер втрат енергії у вихідний електрод (анод) радикально відрізняється від характеру втрат у міжелектродну вставку (рис. 6).

Якщо, як і у попередньому випадку, залежність втрат від струму дуги практично лінійна, то зі збільшенням вмісту вуглеводневого компонента втрати у анод зростають. В області

стехіометричних сумішей зростання уповільнюється. На «багатих» сумішах спостерігається стабілізація втрат у анод, а за умов малих струмів дуги навіть їх деяке зниження.

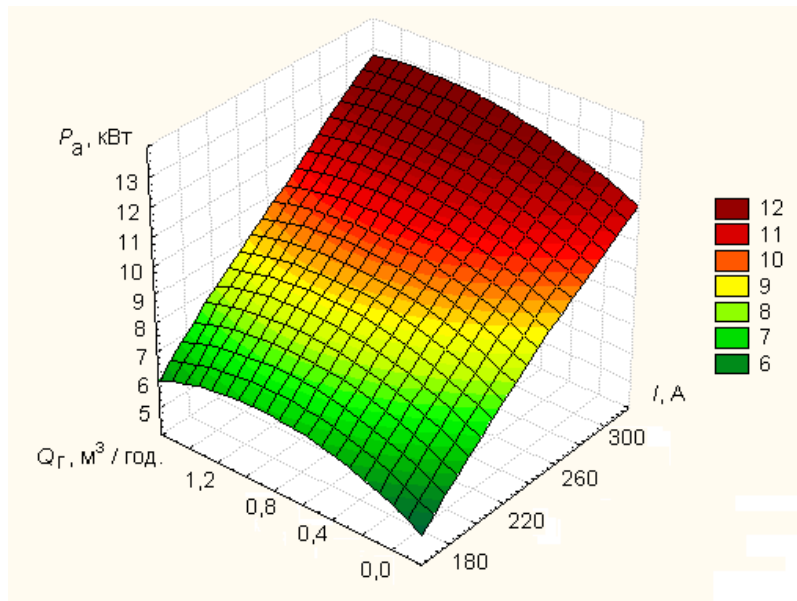


Рис. 6. - Залежність втрат тепла у вихідний електрод (анод) розпилювача із поодинокую МЕВ і самовентиляцією зазору між МЕВ та анодом ($Q_{\Sigma} = 5,5 \text{ м}^3 / \text{год.}$)

Зростання втрат пов'язане головним чином із підвищенням загальної потужності плазмового генератора, яка прямо залежить від складу плазмоутворювальної суміші.

Певним чином впливає на рівень втрат енергії і зміна складу, а, відповідно, і властивостей пристінного шару газу, який відповідає за теплообмін зі стінкою електрода. Зі збагаченням газової суміші зона шунтування дуги зміщується вниз по потоку і розмір ділянки дугового каналу, яка знаходиться в умовах розвиненої турбулентної течії зменшується (за умов певної сталої довжини вихідного електрода). Зменшується і тепловий потік у стінку дугового каналу. Співвідношення між цими двома взаємно протилежними процесами і визначає загальний характер втрат у вихідний електрод. На малих струмах дуги і «багатих» сумішах, коли зона шунтування зміщена у напрямку соплового отвору, баланс змінюється на користь зменшення площі ефективного теплообміну високотемпературного газу зі стінкою дугового каналу. На рис. 7 показана залежність втрат у вихідний електрод від струму дуги і загальної витрати плазмоутворювального газу при сталому співвідношенні між компонентами плазмоутворювальної суміші.

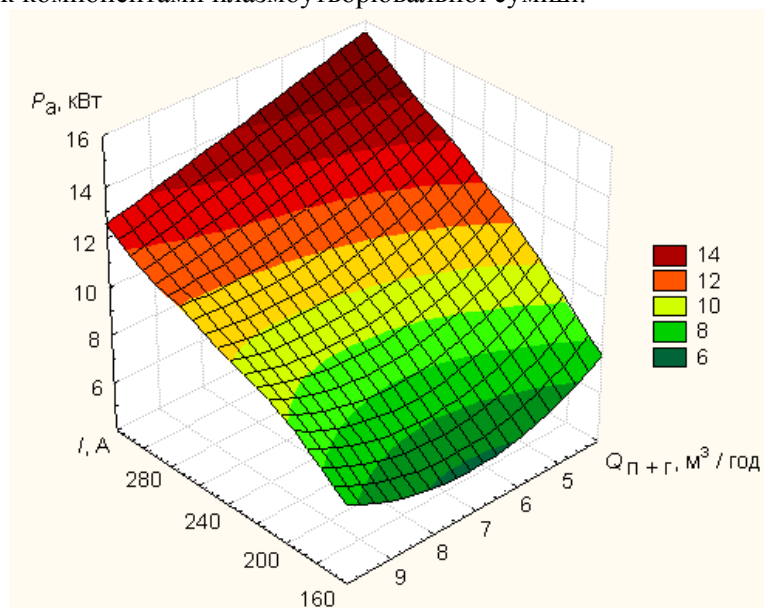


Рис. 7. - Залежність втрат тепла у вихідний електрод (анод) розпилювача із поодинокую МЕВ і самовентиляцією зазору між МЕВ та анодом ($\alpha = 0,47$)

Найявне зростання втрат зі збільшенням струму дуги і їх зменшення із підвищенням витрати плазмоутворювального газу.

Обидва режимних параметри впливають на положення зони прив'язування електричної дуги і режим течії високотемпературного газу у дуговому каналі. Зменшення струму із одночасним нарощуванням витрати плазмоутворювального газу полегшує тепловий режим роботи вихідного електрода, зменшує область існування розвиненої турбулентної течії плазмового потоку. Зона шунтування за цих умов переміщується у бік соплового отвору дугового каналу, а пляма прив'язування дуги (у крайньому випадку) може потрапити на торцеву поверхню вихідного електрода. Незважаючи на відносно малу величину теплового потоку у вихідний електрод, такий випадок є несприятливим з точки зору ерозії анода – торцева поверхня охолоджується недостатньо ефективно, а переміщення плями прив'язування дуги по поверхні погано прогнозоване.

Наведені закономірності взаємозв'язку рівня втрат енергії в елементи конструкції плазмотрона та основних режимних параметрів його роботи визначають характер залежності ККД генератора плазми від струму дуги та вмісту вуглеводневого компонента у плазмоутворювальній суміші. Вочевидь, максимальні значення ККД досягаються на мінімальних струмах дуги за умови роботи на збагачених сумішах, що відповідає загальній тенденції розвитку плазмових пристроїв – від нарощування одиничної потужності плазмових генераторів за рахунок підвищення струму дуги до нарощування потужності за рахунок підвищення напруги на дузі і застосування комбінованого підведення енергії до плазмоутворювального середовища.

Висновки:

- залежність втрат у катод від струму дуги для плазмоутворювального повітря практично лінійна у всьому дослідженому діапазоні зміни струму; для сумішей повітря із метаном теж має місце лінійна залежність втрат від струму дуги (чим більше струм, тим вище рівень втрат тепла) і нелінійна зростаюча залежність втрат від вмісту вуглеводневого компонента;

- втрати тепла в анод плазмотрона практично лінійно залежать від струму дуги і експоненціально від вмісту вуглеводневого компонента (зі збільшенням вмісту втрати зростають);

- має місце практично лінійна залежність втрат у МEB від струму дуги (зі збільшенням струму втрати зростають), але у міру збагачення плазмоутворювальної суміші спостерігається різке зниження втрат тепла у вставку;

- для плазмотрона із МEB залежність втрат в анод від струму дуги практично лінійна, але втрати зростають зі збільшенням вмісту вуглеводневого компонента; в області стехіометричних сумішей зростання уповільнюється, ана «багатих» сумішах стабілізуються (за умови малих струмів дуги наявне навіть їх деяке зниження).

Список використаних джерел:

1. Жуков М. Ф. Термохимические катоды [Текст]: моногр. / М. Ф. Жуков, А. В. Пустогаров, Г. -Н. Б. Дандарон, А. Н. Тимошевский. – Новосибирск: АН СССР, Сибирское отд, Институт Теплофизики, 1985. – 130 с.
2. Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов [Текст]: сб. ст. / под ред. М. Ф. Жукова. – Новосибирск: АН СССР, Сибирское отд, Институт Теплофизики, 1977. – 152 с.
3. Жуков М. Ф. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками [Текст]: моногр. / М. Ф. Жуков, А. С. Аньшаков, И. М. Засыпкин и др. – Новосибирск: Наука, 1981. – 221 с.
4. Жуков М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) [Текст]: моногр. / М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
5. Основы расчета плазмотронов линейной схемы [Текст]: моногр. / – под ред. М. Ф. Жукова. – Новосибирск: АН СССР, Сибирское отд, Институт Теплофизики, 1979. – 148 с.
6. Новиков В. Я. Многодуговые системы [Текст]: моногр. / В. Я. Новиков, П. И. Тамкиви, А. Н. Тимошевский и др. – Новосибирск: Наука, Сиб. от-ние, 1988. – 133 с.

Рецензенти:

Рижов Р. М., професор кафедри зварювальних установок Національного технічного університету України «КПІ», д.т.н, проф.

Петров С. В., пров. наук. співроб. Інституту газу НАН України, д.т.н, ст. наук. співр.

Стаття надійшла до редакції 06.09.2016

УДК 621.998.77

Л.М. Самчук

Луцький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПРИТИСКНОЇ ВТУЛКИ ЗА РАХУНОК ЇЇ ВИГОТОВЛЕННЯ З ВІДХОДІВ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

У статті розглянуто спосіб отримання деталі типу втулка з використанням маловідходної технології – порошкової металургії. В якості робочої сировини запропоновано використовувати металевий порошок сталі ШХ15, який є вторинною сировиною підприємства по виготовленню підшипників СКФ Україна. Встановлено, що деталі виготовлені із композитної суміші ШХ15, С 2%, Си 4,5% мають хороші властивості, проте на відміну від заготовок із чистого ШХ15 температура для спікання даної заготовки має бути вища, приготування композиту займає час, а вартість виготовлення деталі значно зростає.

Ключові слова: відходи, втулка, шлам, технологія, утилізація.

Л.М. Самчук**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ПРИЖИМНОЙ ВТУЛКИ ЗА СЧЕТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

В статье рассмотрены способ получения детали типа втулка с использованием малоотходной технологии - порошковой металлургии. В качестве рабочей сырья предложено использовать металлический порошок стали ШХ15, который является вторичным сырьем предприятия по изготовлению подшипников СКФ Украина. Установлено, что детали изготовлены из композитной смеси ШХ15, С 2%, Си 4,5% имеют хорошие свойства, однако в отличие от заготовок из чистого ШХ15 температура для спекания данной заготовки должна быть выше, приготовления композита занимает время, а стоимость изготовления детали значительно растет.

Ключевые слова: отходы, втулка, шлам, технология, утилизация.

L. Samchuk**OPTIMIZATION OF PRODUCTION BY CLAMPING BUSHINGS ITS PRODUCTION FROM WASTE ENGINEERING COMPANIES**

The article considers the method for details bushing type using low-waste technologies - powder metallurgy. As a working material proposed to use metal powder SH15 steel, which is a secondary raw material for the production of bearings company SKF Ukraine. Found that parts made from composite mixture SH15, C, 2%, 4.5% Cu have good properties, but unlike pieces of pure SH15 temperature for sintering of blanks to be higher composite preparation takes time, and the cost of manufacturing parts significantly increases.

Keywords: waste, plug, mud, technology utilization.

Постановка проблеми. Зважаючи на агресивне середовище в якому працює притискаюча втулка та матеріал з якого вона виготовлена, постає проблема кородування деталі. Також процес виготовлення є дещо дороговартісним.

Для здешевлення виробництва втулки доцільно використовувати маловідходні технології – порошкову металургію. Також для запобігання корозії слід використовувати нержавіючі матеріали. В якості робочої сировини запропоновано використовувати металевий порошок ШХ15, який задовольняє обидві умови. Даний матеріал є відходами підприємства по виготовленню підшипників СКФ Україна.

Підшипникова хромиста сталь ШХ15 є корозійностійким матеріалом і володіє високою зносостійкістю, твердістю, в композиції з іншими матеріалами забезпечує високу втомну стійкість, контактну міцність та твердість.

Ціна таких порошоків з металовідходів шліфувального виробництва на 25...30% нижча ціни стандартних порошоків заліза та сталі. До того ж використання відходів виробництва позитивно впливає на екологічний стан ґрунтів та водойм, так як відбувається мінімізація місць захоронення металевих відходів.

Аналіз літературних джерел. Основну масу металовідходів складає стружка – потенційне джерело сировини для виробництва металопорошків. На заводах порошкової металургії використовують технології утилізації стружки і прокатної окалини металургійних підприємств, які після розплаву розпиляються в порошок із заданими фізико-хімічними і технологічними властивостями. Порошок після пресування і спікання перетворюється в готові деталі.

Шліфувальний шлам сталі ШХ15 утворюється після механічної обробки кілець та роликів підшипників в умовах ПАТ „СКФ – Україна”. Порошки сталі ШХ15, отримані зі шліфшламів, можуть використовуватися для виготовлення деталей конструкційного, антифрикційного і

фрикційного призначення, деталей для електротехнічної промисловості, які в даний час виготовляються із порошків заліза та графіту. Найбільш доцільним, з цієї точки зору, може бути виготовлення деталей простої форми для масового виробництва, наприклад, таких як втулки ковзання, підшипники ковзання, контакти струмоприймачів тощо.

Шліфувальний шлам за зовнішнім виглядом – порошкоподібний продукт характерного для окислів заліза чорного кольору, що містить грудки з вмістом заліза – не менше 60%; вмістом двоокису кремнію – не більше 25%; вологістю – не більше 10%; насипною густиною – 0,32...0,40 г/см³. Після обробки деталей на шліфувальних верстатах шлам подається в колодязі відстоювання, а звідти через трубопроводи в цех інженерних мереж і утилізації, де піддається фільтрації, збирається в ємності і, для подальшого зберігання, вивозиться на ділянку відстоювання. На площадці відстоювання шлам тривалий час зберігається в незадовільних умовах, що сприяє його забрудненню та окисленню, негативно впливає на властивості і робить недоцільною подальшу переробку шламу.

Отже негайна переробка відходів шліфошламу та стружки дозволить не тільки раціонально використати матеріал але й значно скоротити витрати на матеріал підприємств вторинної переробки даної сировини, скоротити площі відстоювання відходів.



Рис.1.– Втулка

Деталь типу втулки виконує роль притискного кільця в механізмі водолічильника.

Конструкційними особливостями деталі є плоска циліндрична форма, наявність трьох співвісних. По зовнішній циліндричній поверхні кільця нарізана трикутна кріпильна різьба. Втулка виготовлена із конструкційної вуглецевої якісної сталі марки 08кп.

Викладення основного матеріалу. В якості досліджуваного матеріалу для виготовлення втулки було використано сталь ШХ15 та її композит.

Для спікання використовувалась муфельна піч МП-0.

Пресування здійснювалось на лабораторній установці П-125 та П-250.

Було проведено рентгеноструктурний аналіз матеріалу, результати якого видно на рис.2, за допомогою приладу ДРОН 4-13.

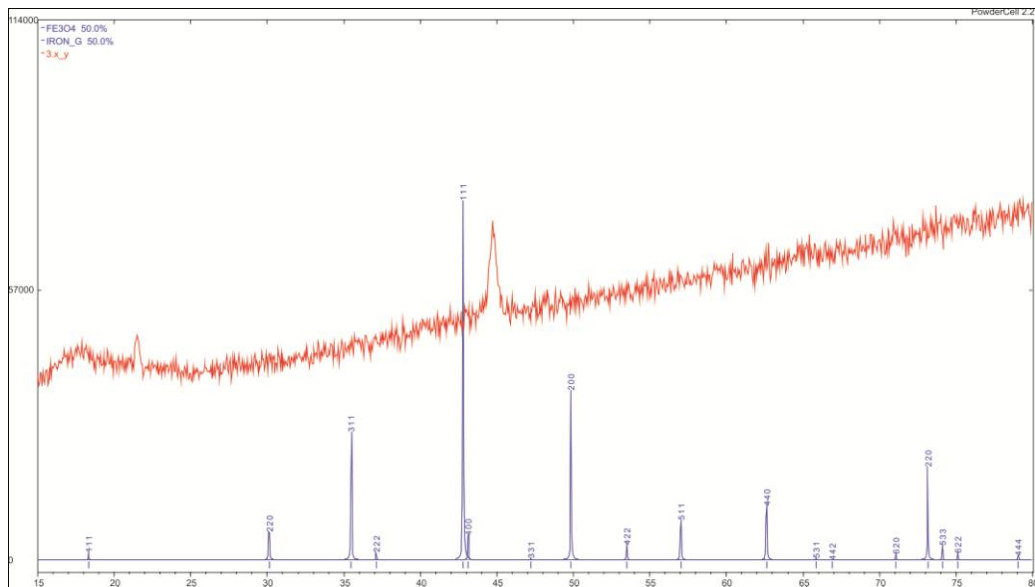


Рис.2. – Дифрактограма матеріалу ШХ15

На дифрактограмі представлено 2 графіки: нижній – стандартний, вибирається із міжнародної бази даних відповідно до певного матеріалу, а верхній – відображає результати проведення аналізу даного. По осі X відображається кут повороту зразка 2θ , по Y – інтенсивність відбивання рентгенівського проміння зразком.

Встановлено наявність оксиду заліза Fe_3O_4 , що свідчить про те що частинки порошку вкриті оксидною плівкою, і як наслідок буде виникати корозія. Отже для того щоб уникнути дане негативне явище проводилось відновлення металевого порошку. Процес відновлення відбувався при нагріванні ШХ15 до $700\text{ }^\circ\text{C}$ з нагнітанням в робочу зону газу H_2 . Для пришвидшення процесу відновлення порошку було додано хімічну присадку KCl в розмірі 1% від маси шихти. Процес відновлення проходив на 30% швидше.

Зразок № 1

Виготовлений зі сталі ШХ15, фракція 0,05 мм.

Матеріал: сталь ШХ15; фракція 0,05 мм.

Тиск пресування: 100 т.

Спикання:

-температура: $900\text{ }^\circ\text{C}$;

-час: 2 год.

Пористість: 33%.

Габаритні розміри заготовки:

- діаметр: 50 мм

- висота: 14 мм.

Механічна обробка: точіння торця різцем.

Стружка: сколювання.



Рис.3. – Порошок після пресування



Рис.4. – Зразок № 1 після спікання

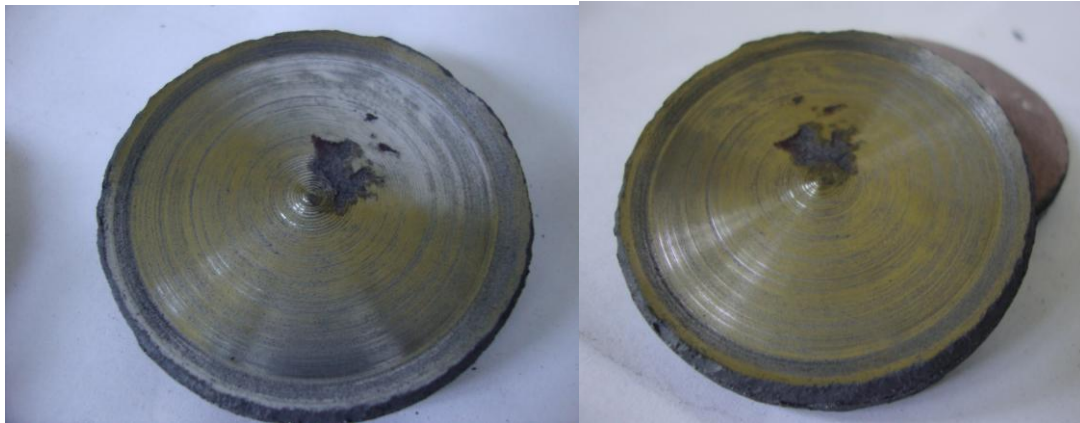


Рис.4. – Зразок № 1 після точіння



Рис.5. – Стружка сколювання

Зразок № 2

Матеріал: сталь ШХ15; фракція 0,1 мм.

Тиск пресування: 50 т.

Спікання:

-температура: 900°C;

-час: 2 год.

Габаритні розміри заготовки:

- діаметр: 50 мм

- висота: 44 мм.

Механічна обробка: точіння торця та циліндричної поверхні різцем, свердління отвору свердлом наскрізь.

Стружка: сколювання, пилоподібна.



Рис.6. – Зразок №2 після точіння торця



Рис.7. – Зразок № 2 після точіння циліндричної поверхні



Рис.8. – Свердління отвору в зразку № 2

Оброблена поверхня характеризується крихкістю, нерівномірністю поверхневого шару, наявністю великої кількості раковин і пор.

Зразок № 3

Матеріал: композит (сталь ШХ15, С 2%, Сu 4,5%)

Тиск пресування: 50 т.

Спiкання:

-температура: 1250°C;

-час: 2 год.

Габаритні розміри заготовки:

- діаметр: 50 мм

- висота: 30,8 мм.

Механічна обробка: точіння торця різцем, свердління отвору свердлом наскрізь, нарізування трикутної кріпильної різі з кроком 2.

Стружка: сколювання, пилоподібна.

Приготування композитної суміші порошоків сталі ШХ15, графіту і міді здійснювалось пропорційним змішуванням компонентів у ваговому розмірі: ШХ15 = 200г, С 2%, Сu 4,5% від ваги сталі. Рівномірне розмішування здійснювалось у вібраційному млині з розмольними тілами протягом 2 годин.

Зразок характеризується рівномірною структурою, високою твердістю, міцністю; володіє властивістю самозмащування завдяки наявності графіту і є антифрикційним матеріалом. Збільшується ресурс працездатності у 2-2,5 рази.



Рис.9. – Зразок № 3 після спікання



Рис.10. – Зразок № 3 після нарізування різі

Висновки. Отже виготовлення деталі типу втулка можливе шляхом використання маловідходних технологій – порошкової металургії. Заготовки виготовлені методом пресування і спікання піддаються механічній обробці і відповідають встановленим вимогам. Отримані таким чином деталі задовольняють поставлені задачі. Встановлено, що деталі виготовлені із композитної суміші ШХ15, С 2%, Сu 4,5% мають хороші властивості, проте на відміну від заготовок із чистого ШХ15 температура для спікання даної заготовки має бути вища, приготування композиту займає час, а вартість виготовлення деталі значно зростає.

Вирішення задачі утилізації дозволяє повернути у виробництво сировину, з високим вмістом легуючих елементів, для виготовлення виробів методом порошкової металургії та вирішити проблему накопичення шламових відходів на підприємствах металообробки з точки зору екології. За рахунок використання відпрацьованих відходів спостерігається позитивний економічний ефект.

Список використаних джерел

1. Сосновський Л.А. Дослідження процесів утилізації порошкових відходів сталі ШХ-15 / Л.А. Сосновський, О.В. Власова, М.Є. Головка // Металознавство та обробка металів 1. 2015. – С. 55-59.
2. Рудь В.Д. Эколого-экономическая эффективность использования отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения / В. Рудь // Устойчивое развитие. 2014. - № 19. – С. 159-164.
3. Рудь В.Д. Апаратна реалізація технології утилізації відходів підшипникового виробництва / В. Д. Рудь, Т. Н. Гальчук // Науковий журнал „Технологічні комплекси”. – 2011. – № 2(4). – С. 75–80.
4. Рудь В.Д. Использование отходов подшипникового производства в порошковой металлургии / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, О.Ю. Повстяной // Порошковая металлургия. – 2005. – №1/2. – С. 106-112.
5. Данцев Д.В. Экспериментальное исследование технологических свойств шихты порошковых сталей / Д.В. Данцев // Збірник наукових праць «Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні». – 2012. – С. 204-210.
6. Патент України № 63558 А МПК 7 В22F9/04. Спосіб отримання металевого порошку з шламових відходів підшипникового виробництва / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, О.Ю. Повстяной; Заявл.06.05.03; опубл. 15.01.04. Бюл.№1, 2004. – С.4
7. Ромашкин А.Н. / Шарикоподшипниковая сталь - общие сведения / интернет матеріали. Режим доступу: http://steelcast.ru/ball_bearing_steel
8. Судина С.В. Применение очищенного опилочного шлама для получения спеченных изделий / С.В. Судина, В.Н. Шуменко, В.В. Шуменко // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые композиционные материалы, саврка. Сборник докладов 8-го Международного симпозиума. – Минск, - 2013. Часть 1. С. 356-359.
9. Рудь В.Д. Вплив технології синтезу на структуру та властивості спеченого композиту системи Ti-Fe-C / В.Д. Рудь, Л.М. Самчук // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, - 2012. - № 64. – С. 239 – 243.
10. Панченко А.И. Формирование качества подшипниковых сталей в процессах деформационного передела / А.И. Панченко, А.Н. Тумко, А.С. Сальников, О.А. Ярошенко, О.В. Пересащенко // Обработка материалов давлением № 1(26). 2011. – С 170 – 174.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2016.

УДК 66.017 : 546.185 : 546.41 : 546.284 : 546.33 : 666.1 : 678

О.Є. Сич

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ВИСОКОПОРИСТОЇ СКЛОКЕРАМІКИ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В роботі досліджено вплив температури спікання на особливості формування пористої структури склокераміки на основі біогенного гідроксиапатиту та $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ скла (співвідношення БГА/скло = 3/2), отриманої методом дублювання структури полімерної матриці при різних температурах спікання (900, 950, 1000 та 1100 °С). Встановлено, що для отримання високопористих зразків не рекомендується застосовувати температуру спікання > 1000 °С, оскільки це призводить до суттєвого зниження пористості матеріалу та її трансформацію з відкритої в закритую, що пов'язано з особливостями рідкофазного спікання.

Ключові слова: склокераміка, високопористий, структура, метод дублювання структури полімерної матриці, імплантат

Е.Е. Сыч

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе исследовано влияние температуры спекания на особенности формирования пористой структуры стеклокерамики на основе биогенного гидроксиапатита и $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ стекла (соотношение БГА/стекло = 3/2), полученной методом дублирования структуры полимерной матрицы при различных температурах спекания (900, 950, 1000 и 1100 °С). Установлено, что для получения высокопористых образцов не рекомендуется использовать температуру > 1000 °С, поскольку это приводит к существенному снижению пористости материала и её трансформации из открытой в закрытую, что связано с особенностями жидкофазного спекания.

Ключевые слова: стеклокерамика, высокопористый, структура, метод дублирования структуры полимерной матрицы, имплантат

O. Sych

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine

ASPECTS OF THE STRUCTURE FORMATION OF HIGHLY-POROUS GLASS-CERAMICS FOR MEDICAL APPLICATION

In the present work the influence of sintering temperature on the peculiarities of formation of porous structure of the glass-ceramics based on biogenic hydroxyapatite and $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ glass (BHA / glass ratio = 3/2) prepared using foam replication method at different sintering temperatures (900, 950, 1000 and 1100 °C). It was established that increasing the sintering temperature causes significant increase of samples shrinkage (up to 68 %), reduce pore size and narrow pore size distribution. During sintering a partial decomposition and/or interaction of hydroxyapatite with the glass phase take place, which results in forming multiphase glass-ceramics composed of reanite NaCaPO_4 , calcium silicophosphate $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4$, calcium pyrophosphate $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$, pectolite $\text{NaCa}_2\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})$ and hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. It was established that preparation of highly-porous samples is not recommended at sintering temperature > 1000 °C due to the significant reduction of the porosity and its transformation from open to closed that connected with the peculiarities of liquid-phase sintering.

Keywords: glass-ceramics, highly porous, structure, replication foam methods, implant

Вступ

В сучасному біомедичному матеріалознавстві одним з основних завдань є розробка матеріалів для інженерії кісткової тканини, які здатні стимулювати регенеративні механізми в організмі людини, сприяючи швидшому загоєнню та відновленню уражених ділянок кісток в ортопедії та травматології. Метод інженерії кісткової тканини полягає у розміщенні стовбурових стромальних клітин кісткового мозку, отриманих з тканин пацієнта, на підкладку (імплантат) для росту та диференціації клітин і подальшому імплантуванні в область кісткового дефекту. Перспективними для тканинної інженерії є високопористі (пористість > 70 %) проникні для біологічних рідин матеріали з достатньою механічною міцністю та подібністю до структури неорганічної складової кісткової тканини [1-4].

Біоактивна склокераміка, отримана на основі гідроксиапатиту та скла, є одним з найкращих кандидатів для створення високопористих матеріалів, забезпечуючи не лише біоактивність, але і достатні механічні властивості, а метод дублювання структури полімерної матриці дозволяє отримувати матеріал будь-якої форми та розмірів з розвиненою структурою взаємопов'язаних пор [5-7].

Тому дослідження особливостей структуроутворення зразків високопористої склокераміки, отриманої методом дублювання структури полімерної матриці, з метою покращення властивостей імплантаційних матеріалів для лікування кісткової тканини в ортопедії та травматології, є актуальним науково-практичним завданням матеріалознавства.

В попередній роботі [8] було отримано високопористу склокераміку при 900 °С з різним співвідношенням у вихідному складі біогенного гідроксиапатиту (БГА) та скла системи SiO₂-CaO-Na₂O. Показано, що найкращими за структурно-механічними властивостями серед отриманих матеріалів є зразки, які у вихідному складі містять 50-60 мас.% БГА. В то же час, така склокераміка оптимізує проліферацію та диференціацію остеогенних клітин-попередників кісткового мозку людини, причому ефективність клонування збільшується зі збільшенням вмісту БГА у вихідному складі [9]. Для підвищення міцності високопористих зразків в даній роботі пропонується збільшити температуру спікання з подальшим дослідженням особливостей структуроутворення в матеріалі.

Тому метою даної роботи було дослідити особливості формування пористої структури зразків склокераміки, отриманих на основі біогенного гідроксиапатиту та SiO₂-CaO-Na₂O скла (співвідношення БГА/скло = 3/2) методом дублювання структури полімерної матриці при різних температурах спікання.

Матеріали та методи дослідження

Як вихідні матеріали для отримання зразків високопористої склокераміки було використано:

- БГА, отриманий шляхом термообробки кісток великої рогатої худоби при 900 °С;
- SiO₂-CaO-Na₂O скло (мас. %: SiO₂ – 72,81, CaO – 4,65, Na₂O – 22,54), отримане варкою склоутворюючих компонентів при 1250 °С;
- пінополіуретан марки ST 3542, "Interfom", Україна.

Високопористі зразки отримували методом дублювання структури полімерної матриці, описаним нами в роботі [10], який включає наступні технологічні операції:

- виготовлення шлікеру з БГА, скла та води (співвідношення БГА/скло = 3/2) у кульовому млині. Вміст твердої фази у шлікері складав 60 мас.%;
- просочення заготовки пінополіуретанової матриці необхідної форми та розмірів шлікером;
- сушка та спікання зразків при температурах 900, 950, 1000 та 1100 °С.

Структура отриманих зразків високопористої склокераміки була проаналізована за допомогою спеціалізованого матеріалознавчого комплексу аналізу зображень «SIAMS-600 («SIAMS-Ltd», Росія) на основі макроструктур, отриманих за допомогою методу оптичної мікроскопії з використанням мікроскопу Bresser MicroSet 40-1024x (Німеччина). Склад матеріалів контролювали методом рентгенофазового аналізу (дифрактометр Ultima IV Rigaku (Японія)) та методом інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії (Фур'є – спектрометр ФСМ 1202 (Росія)) в діапазоні частот 4000–400 см⁻¹. Крім того, для отриманих зразків була визначена об'ємна усадка (зміна об'єму зразків при спіканні), а також загальна та відкрита пористість. Міцність при одновісному стисканні визначали за допомогою універсальної машина Ceram Test System (Україна).

Результати та обговорення

На рис. 1 наведено макроструктуру зразків високопористої склокераміки, отриманої на основі БГА та SiO₂-CaO-Na₂O скла, при різних температурах спікання. З представлених фотографій видно, що збільшення температури спікання від 900 до 1100 °С призводить до трансформації пористості з переважно відкритої в закриту. При отриманні зразків при температурах 900-1000 °С зберігається проникна структура з взаємопов'язаною системою пор, а при підвищенні температури спікання зразків до 1100 °С спостерігаємо формування осклованої поверхні, що пов'язано з особливостями рідкофазного спікання матеріалу в присутності склофази.

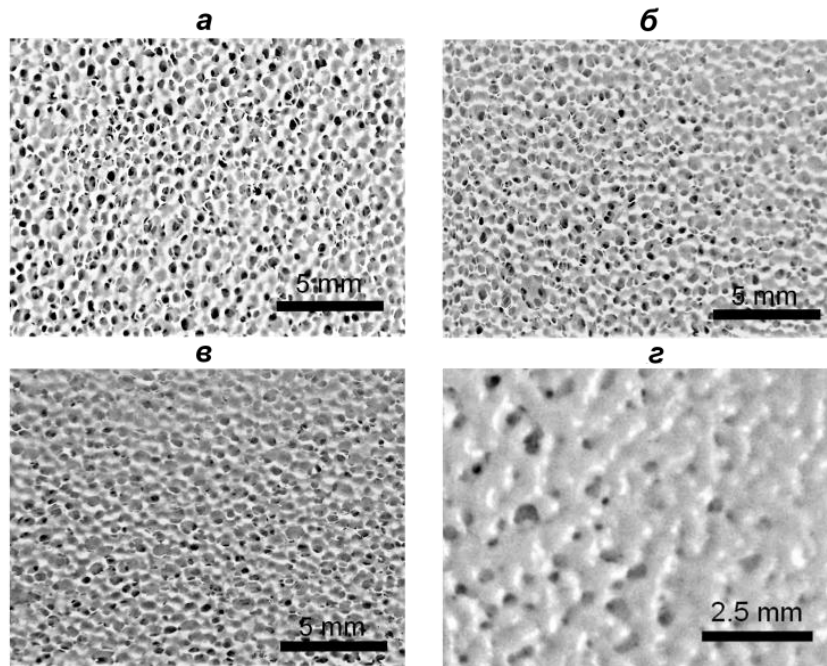


Рис. 1. Макроструктура зразків високопористої склокераміки, отриманої при різних температурах спікання: а – 900 °С; б – 950 °С; в – 1000 °С; г – 1100 °С

При спіканні зразки зазнають об'ємної усадки, яка зростає від 9 до 68 % при збільшенні температури спікання від 900 до 1100 °С (рис. 2), яка, свою чергу впливає і пористість склокераміки (рис. 3). Результати свідчать про те, що загальна пористість зменшується в 2,3 рази, стаючи для зразків, отриманих при температурі 1100 °С, переважно закритою. Суттєва об'ємна усадка зразків при спіканні, трансформація пористості з відкритої в закриту та формування закритої осклованої поверхні пов'язані з особливостями рідкофазного спікання та властивостями склофази, що входить до складу зразків.

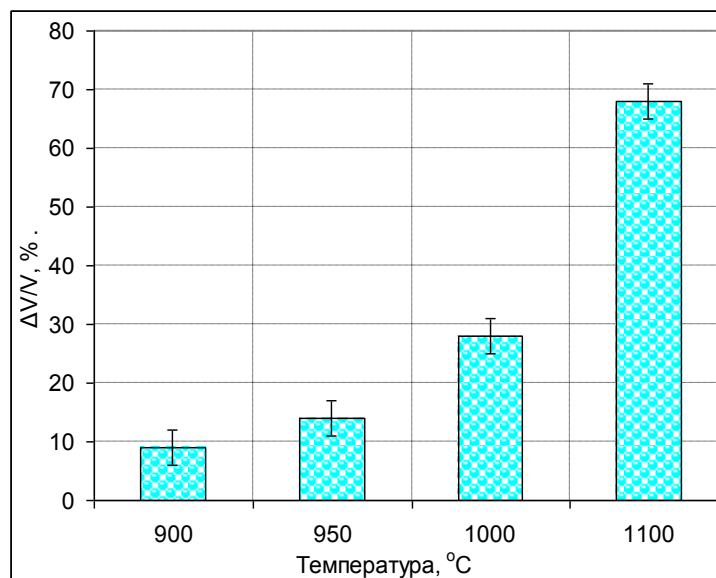


Рис. 2. Залежність об'ємної усадки зразків високопористої склокераміки від температури спікання

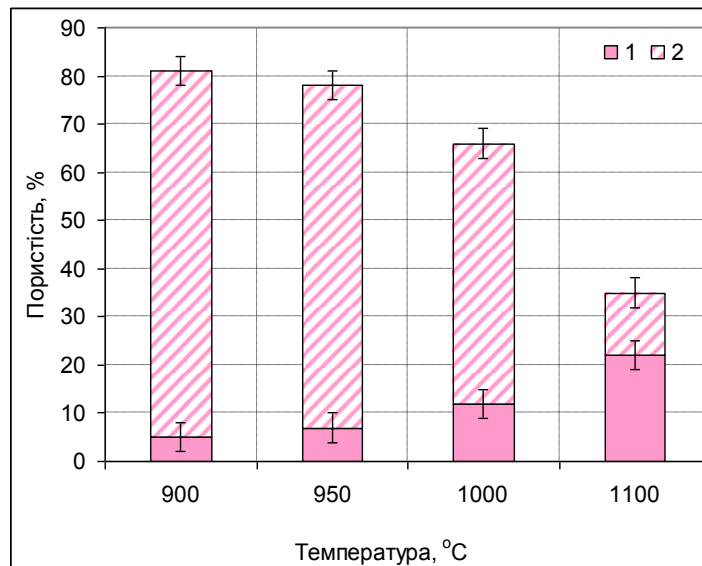


Рис. 3. Залежність пористості зразків високопористої склокераміки від температури спікання: ▨ - відкрита пористість, ▨ - закрыта пористість

Результати аналізу порової структури зразків склокераміки, проведеного за допомогою спеціалізованого матеріалознавчого комплексу аналізу зображення структур «SIAMS-600», представлені на рис. 4 та в табл. 1., свідчать про те, що внаслідок підвищення температури спікання від 900 до 1100 °C відбувається «закриття» пор, звуження області розподілу пор та зменшення розміру як дрібних (мінімального розміру), так і великих (максимального розміру) пор при близьких значеннях середньоквадратичного відхилення. Для зразків, отриманих при температурі ≥ 950 °C структура стає менш однорідною, про що свідчить підвищення коефіцієнту варіації. Крім того, згідно розподілу пор за розміром (рис. 4) в структурі високопористої склокераміки, для зразків, отриманих при 900 °C основна кількість пор (75,5 %) має розмір 150-400 мкм. При підвищенні температури спікання до 950-1000 °C звужується область існування основної кількості пор в структурі зразків – 81-82 % відносно загальної кількості пор мають розмір 100-350 мкм. Найбільш ймовірний розмір пор в структурі зразків, отриманих при температурах спікання 900-1000 °C становить 275 мкм. При підвищенні температури до 1100 °C спостерігаємо стрімке зменшення розміру найбільш ймовірної кількості пор до 175 мкм, а основна кількість пор в структурі зразків високопористої склокераміки (65,5 %) має розмір 150-300 мкм. Такі зміни в пористій структурі склокераміки є результатом суттєвого збільшення усадки при спіканні зразків, що, в свою чергу, пов'язано з особливостями рідкофазного спікання матеріалу.

Результати рентгенофазового аналізу вихідного БГА та високопористої склокераміки на прикладі зразків, отриманих при температурі 900 °C, наведено на рис. 5. Як видно з наведених дебаєграм, вихідний БГА представлений кристалічною фазою гідроксиапатиту ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ (JCPDS, Card No. 09-432)). При спіканні високопористих зразків відбувається розкладання гідроксиапатиту та / або його взаємодія зі склофазою в результаті чого формується полі фазна склокераміка, що містить у своєму складі такі кристалічні фази як ренаніт NaCaPO_4 (JCPDS, Card No. 76-1456), силікофосфат кальцію $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_4$ (JCPDS, Card No. 21-0157), пірофосфат кальцію $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$ (JCPDS, Card No. 33-0297), пектоліт $\text{NaCa}_2\text{Si}_3\text{O}_8\text{OH}$ (JCPDS, Card No. 02-0759) та гідроксиапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ (JCPDS, Card No. 09-432) [8].

Результати РФА підтверджуються також результатами ІЧ – спектроскопії. ІЧ-спектри вихідного БГА та високопористої склокераміки на прикладі зразків, отриманих при температурі 900 °C, наведено на рис. 6. Спектри вихідного БГА мають характерні смуги поглинання кристалічного ГА, пов'язані з коливаннями основних структурних компонентів, таких як PO_4^{3-} ($\nu \sim 1090, 1050, 961, 604, 572, 473 \text{ cm}^{-1}$) та OH ($\nu \sim 3574, 3440, 1630, 634 \text{ cm}^{-1}$) [11].

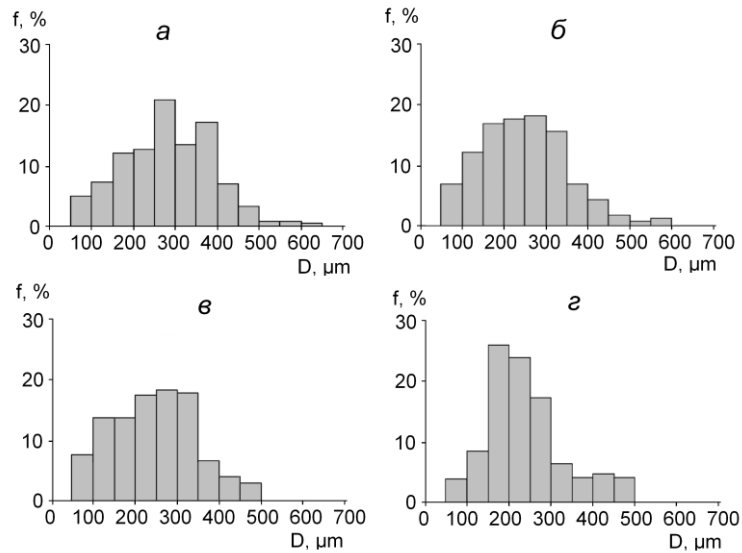


Рис. 4. Розподіл пор за розміром в структурі зразків високопористої склокераміки, отриманої при різних температурах спікання: а – 900 °С; б – 950 °С; в – 1000 °С; г – 1100 °С

Таблиця 1

Результати аналізу пористої структури зразків високопористої склокераміки в залежності від температури спікання

Параметри пор	Температури спікання, °С			
	900	950	1000	1100
Мінімальний розмір, мкм	60	60	55	50
Максимальний розмір, мкм	630	590	490	460
Середній розмір, мкм	280	250	250	240
Середньоквадратичне відхилення, мкм	100	100	100	90
Коефіцієнт варіації	0,35	0,40	0,40	0,38

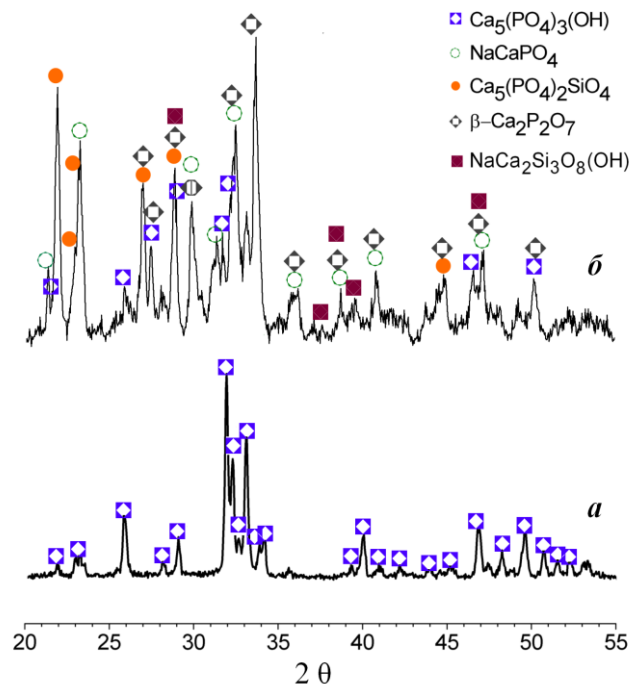


Рис. 5. Дебаграмми вихідного БГА (а) та високопористої склокераміки (б) на прикладі зразків, отриманих при 900 °С [8]

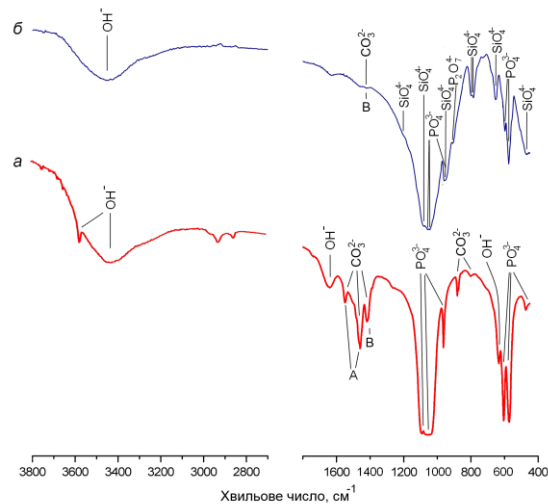


Рис. 6. ІЧ спектри вихідного БГА (а) та високопористої склокераміки (б) на прикладі зразків, отриманих при 900 °С [8, 11]

Аналіз ІЧ-спектрів високопористої склокераміки показав, що для зразків характерна присутність коливань груп PO_4^{3-} та SiO_4^{4-} в інтервалі частот $\nu \sim 1250 - 450 \text{ cm}^{-1}$, а ширина смуг поглинання збільшується у вказаному діапазоні у порівнянні з вихідним БГА. В області $\nu \sim 810 - 780 \text{ cm}^{-1}$ проявляється характерний для коливань кремній-кисневих тетраедрів дублет, який вказує на присутність в структурі склофази кілець, які складаються з шести SiO_4 -тетраедрів $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ [12]. Смуги поглинання в області $\nu \sim 1040 - 900 \text{ cm}^{-1}$ характеризують утворення воластонітових структур типу пектоліту $\text{NaCa}_2\text{Si}_3\text{O}_8\text{OH}$. На зміну фазового складу, пов'язаного з утворенням силікофосфату та пірофосфату кальцію вказують зміна частот в діапазоні $\nu \sim 1200 - 900$ та $700 - 450 \text{ cm}^{-1}$. В структурі присутні також смуги валентних ($\nu \sim 3600 - 3400 \text{ cm}^{-1}$) та деформаційних ($\nu \sim 1630 \text{ cm}^{-1}$) коливань OH^- [8].

Крім того, в ІЧ-спектрах вихідного БГА та високопористої склокераміки характерно проявляються коливання карбонатної групи CO_3^{2-} , причому карбонат-іони в структурі вихідного БГА знаходяться як в А-положенні ($\nu \sim 1550$ та 1459 cm^{-1}), заміщуючи групи OH^- , так і в В-положенні ($\nu \sim 1418 \text{ cm}^{-1}$), заміщуючи групи PO_4^{3-} , а у випадку склокераміки – карбонат-іони фіксується лише в В-положенні ($\nu \sim 1420 \text{ cm}^{-1}$).

Для високопористих біоматеріалів не висувають надто високих вимог щодо механічних властивостей, але такі матеріали повинні мати достатню міцність, необхідну для їх імплантування в область кісткового дефекту без руйнування. На рис. 7 представлено залежність міцності на стиск отриманих зразків високопористої склокераміки від температури спікання. З рисунку видно, що міцність зростає від 0,9 до 8 МПа зі збільшенням температури спікання, що пов'язано зі структурою пористості отриманих зразків - формуванням закритої пористості та осклованої поверхні.

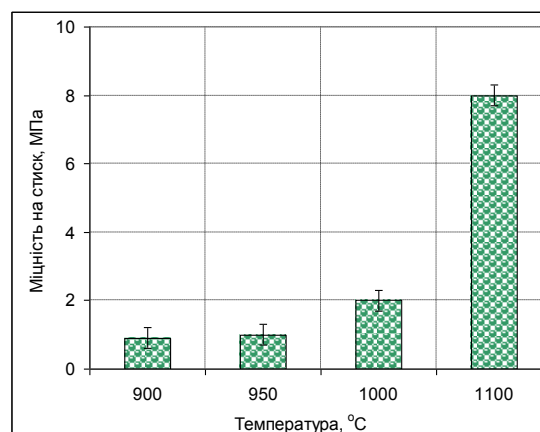


Рис. 7. Залежність міцності на стиск зразків високопористої склокераміки від температури спікання

Висновки

В роботі досліджено особливості формування пористої структури склокераміки на основі біогенного гідроксиапатиту та $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ скла (співвідношення БГА/скло = 3/2), отриманої методом дублювання структури полімерної матриці при різних температурах спікання в інтервалі температур 900-1100 °С. Показано, що підвищення температури спікання призводить до суттєвого збільшення усадки зразків, зменшення розміру пор та звуження області розподілу пор за розміром. Встановлено, що для отримання високопористих зразків не рекомендується застосовувати температуру спікання > 1000 °С, оскільки це призводить до суттєвого зниження пористості матеріалу та її трансформацію з відкритої в закрити, що пов'язано з особливостями рідкофазного спікання.

Автор висловлює щире подяку кандидату технічних наук, старшому викладачу кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Яценку Артему Павловичу за допомогу в отриманні зразків, кандидату фізико-математичних наук, науковому співробітнику Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України Євичу Яну Івановичу за проведення механічних випробувань зразків, а також молодшому науковому співробітнику Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України Товстоног Ганні Богданівні за обробку структур за допомогою програмного забезпечення «SIAMS-600 («SIAMS-Ltd», Росія).

Список використаних джерел:

1. Karageorgiou V. Porosity of 3D biomaterial scaffolds and osteogenesis / V. Karageorgiou, D. Kaplan // Biomaterials. – 2005. – Vol. 26, Issue 27. – P. 5474-5491.
2. Tripathi G. A porous hydroxyapatite scaffold for bone tissue engineering: Physico-mechanical and biological evaluations / G. Tripathi, B. Basu // Ceram. Int. – 2012. – Vol. 38, Issue 1. – P. 341-349.
3. Hammel E. C. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review / E. C. Hammel, O. L.-R. Ighodaro, O. I. Okoli // Ceram. Int.. – 2014. – Vol. 40, Issue 10. – P. 15351-15370.
4. Tang D. Biofabrication of bone tissue: approaches, challenges and translation for bone regeneration / D. Tang, R. S. Tare, L.-Yo Yang, et al. // Biomaterials. – 2016. – Vol. 83. – P. 363-382.
5. Belyakov A. V. Porous materials made from calcium phosphates (Review) / A. V. Belyakov, E. S. Lukin, T.V. Safronova et al. // Glass Ceram. – 2008. – Vol. 65, Issue 9-10. – P. 337-339.
6. Gerhardt L.-C. Bioactive glass and glass-ceramic scaffolds for bone tissue engineering / L.-C. Gerhardt, A. R. Voccaccini // Materials // Materials. – 2010. – Vol. 3. – P. 3867-3910.
7. Гузман И. Я. Некоторые принципы образования пористых керамических структур. Свойства и применение (обзор) / И. Я. Гузман // Стекло и керамика. 2003. – № 9. – С. 28-31.
8. Sych E. E. Structure and properties of permeable highly porous glass-ceramics for orthopedics and traumatic surgery // E. E. Sych, A. P. Yatsenko, T. V. Tomila, et al. // Powder. Metall. Met. Ceram. – 2016. – Vol. 55, Issue 5. – P. 319-327.
9. Панченко Л. М. Эффективность клонирования стволовых стромальных клеток костного мозга человека в присутствии высокопористой стеклокерамики и её растворимости ex vivo // Л. М. Панченко, Е. Е. Сыч, А. П. Яценко // Вісник ортопедії, травматології та протезування. – 2014. – № 4. – С. 50-55.
10. Пат. на корисну модель № 97215 Україна, МПК (2014.01) C04B 35/571, A61P 19/00, A61K 33/00 Спосіб виготовлення високопористого комірчастого кальційфосфатного біоматеріалу / Яценко А. П., Сич О. Є.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – u 2014 06982; заявл. 20.06.2014; опуб. 10.03.2015, Бюл. № 5. - 3. с.
11. Товстоног А. Б. Исследование биогенного гидроксипатита после микроволнового и традиционного спекания по данным ИК-спектроскопии / А. Б. Товстоног, Е. Е. Сыч, Т. В. Томила и др. // Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины «Современные проблемы физического материаловедения». Серия «Физико-химические основы технологии порошковых материалов». – 2014. – Выпуск 23. – С. 64-69.
12. Плюснина И. И. Инфракрасные спектры силикатов / И И. Плюснина. – М.: МГУ, 1967. – 190 с.

Рецензенти статті

Уварова Ірина Володимирівна, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, доктор технічних наук, професор

Плем'яніков Микола Миколайович, професор кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кандидат технічних наук, доцент

Стаття надійшла до редакції 30.11.2016.

УДК 53.082.36:531.755

Г.М. Сокол

Хмельницький національний університет, Україна

СТРУКТУРНА МОДИФІКАЦІЯ САПОНІТОВИХ ГЛИН КИСЛОТНОЮ ОБРОБКОЮ

Досліджено зміни у структурі та проведено порівняння характеристик природної та кислотно активованої сапонітової глини. Розраховано структурні параметри пористої системи на підставі ізотерм низькотемпературної (77 К) адсорбції-десорбції азоту та досліджено структурні зміни за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Встановлено, що кислотна модифікація сприяє розвитку питомої поверхні (з 47,7 м²/г до 177,9 м²/г) та збільшенню загального об'єму пор (з 0,134 см³/г до 0,201 см³/г).

Ключові слова: глинистий мінерал, кислотна активація, низькотемпературна порометрія, структурно-адсорбційні характеристики.

H.M. Sokol

STRUCTURAL MODIFICATION OF SAPONITE CLAY BY ACID TREATMENT

The structure changes of raw and acid activated saponite clay has been investigated by nitrogen adsorption method and scanning electron microscopy. Established that the porous structure of saponite clay mineral represented by micro-meso porous system with domination of micropores. Acid modification promotes the development of specific surface area (from 47,7 m²/g to 177,9 m²/g) and increase the total volume of pores (from 0,134 cm³/g to 0,201 cm³/g).

Keywords: clay mineral, acid activation, low temperature porosimetry, structure-adsorption characteristics.

Г.М. Сокол

СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ САПОНИТОВЫХ ГЛИН КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Исследованы изменения пористой структуры, проведено сравнение характеристик природной и кислотно активированной сапонитовой глины. Рассчитано структурные параметры пористой системы на основе изотерм низкотемпературной (77 К) адсорбции-десорбции азота. Установлено, что кислотная модификация способствует развитию удельной поверхности (с 47,7 м²/г до 177,9 м²/г) и увеличению общего объема пор (с 0,134 см³/г до 0,201 см³/г).

Ключевые слова: глинистый минерал, кислотная активация, низкотемпературная порометрия, структурно-адсорбционные характеристики.

Сапоніт - глинистий мінерал, що відноситься до групи триоктаедричних смектитів. Вперше досліджений в Швеції в 1842 році Сванбергом, який представив його як гідросилікат магнію. Кристалізується в моноклінній системі. Кристалічна решітка представлена блоком, який складається з октаедричного шару, розташованого між двома шарами кремнієвих тетраєдрів [19]. Завдяки великій площі питомої поверхні, оптимальним реологічним характеристикам, каталітичним та сорбційним властивостям, сапонітові глини широко використовують у промисловості.

У літературі наводяться приклади застосування сапоніту як сорбенту для очищення води від радіоактивних елементів [14], барвників та важких металів [3,16], пестицидів, значною мірою триазинів [5]. У роботі [2] авторами запропоновано технологію виготовлення пористих фільтрувальних матеріалів для очищення питних вод на основі композитів з сапонітом. У тваринництві сапоніт використовують як мінеральну добавку в годівлі корів, свиней і птиці. Встановлено вплив сапоніту на зниження ліпідів у крові та печінці тварин [1].

Унікальність природних глинистих мінералів полягає не лише у високій ефективності та селективності сорбційних процесів, а й у широких можливостях проведення хімічного та структурного модифікування з метою зміни їх властивостей з необхідними заданими параметрами. Обробку кислотою глинистих мінералів, як правило, називають "кислотою активацією", так як збільшується питома площа поверхні і кількість активних ділянок твердої фази [17]. Відомо, що кислотно активовані форми сапонітів суттєво відрізняються своїми сорбційними властивостями [6, 12, 16] і переважно проявляють вищу сорбційну ємність.

З точки зору практичного застосування, важливими параметрами, які характеризують природні мінерали є внутрішній об'єм пор, питома поверхня та об'єм мікропор. Найбільш простим і надійним методом визначення даних характеристик є сорбція газів, зокрема азоту.

Мета роботи – з'ясувати особливості пористої структури природних мінералів, оцінити вплив кислотної активації на характеристики структури матеріалу.

Об'єктом дослідження є процес формування пористої структури природноглинистого матеріалу до та після модифікації.

Предметом дослідження є глинистий мінерал сапоніт Ташківського родовища Хмельницької області.

Матеріали та методи

Зразки сапоніту

Глинистий мінерал, який використовується в даній роботі є ≤ 1 мм фракція сапоніту Ташківського родовища (Хмельницька область, Україна). Активованій кислотою сапоніт отримували шляхом обробки п'яти грамів глини при механічному перемішуванні з 150 мл 2М розчину H_2SO_4 при $90^\circ C$. Через 4 години тверду фазу відокремлювали від розчинну та від іонів SO_4^{2-} і просушували при кімнатній температурі.

Рентгенофлуоресцентна спектрометрія

Елементний склад природного сапоніту досліджували на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі CER-01, за допомогою аналізатора EXPERT 3L. Інтерпритація спектрів здійснювалась в програмі ElvaX 2.9.5.

Скануюча електронна мікроскопія (SEM)

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

Метод низькотемпературної адсорбції азоту

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

Результати досліджень

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

Таблиця 1.

Хімічний склад сапонітової породи Ташківського родовища (мас. %)

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

Слід зазначити, що дана сапонітова порода характеризується значним вмістом заліза. При чому йони Fe^{n+} можуть бути присутні як у міжшаровому просторі в вигляді обмінних катіонів, в структурній формі в вигляді ізоморфних заміщень, так і у вигляді мінеральних домішок оксиду заліза [13,9]. Відповідно до [18] обмінні катіони Na^+ , K^+ та Ca^{2+} містяться у міжшаровому просторі, а катіони Mg^{2+} і Al^{3+} зафіксовані в структурній решітці сапоніту.

Як відомо, обробка глин мінеральними кислотами середніх концентрацій (2 – 4н) призводить до вимивання із міжшарового простору обмінних катіонів (Na^+ , Ca^{2+}) та катіонів октаедричної решітки (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+}). При цьому розвпорядковуються алюмокремнієві пакети в базальному напрямку, але структура алюмосилікатних шарів не порушується. Як результат - значно розвивається поровий простір, збільшується питома поверхня [4, 11].

На електронно-мікроскопічних знімках (Рис. 1) представлена характерна морфологія зразків сапоніту у вигляді безформених желеподібних купчастих агрегатів, складених з тонко дисперсних лускоподібних глинистих частинок з крипнокристалічною структурою. Розміри глинистих агрегатів знаходяться в межах від 2 до 10 мкм. Форма окремих глинистих кристалітів чітко не простежується. В менших агрегатах глинисті кристаліти сапоніту проявляють еластичність. Роздільна здатність мікроскопу і збита структура глинистих агрегатів не дозволяє однозначно окреслити розміри окремих кристалітів. Але очевидно, що їх розміри є менше 1 мкм. Зразок кислотно активованого сапоніту відрізняється диспергованістю глинистих агрегатів та істотним збільшенням дрібних еластичних агрегатів кристалітів з розмірами 0,5-2 мкм.

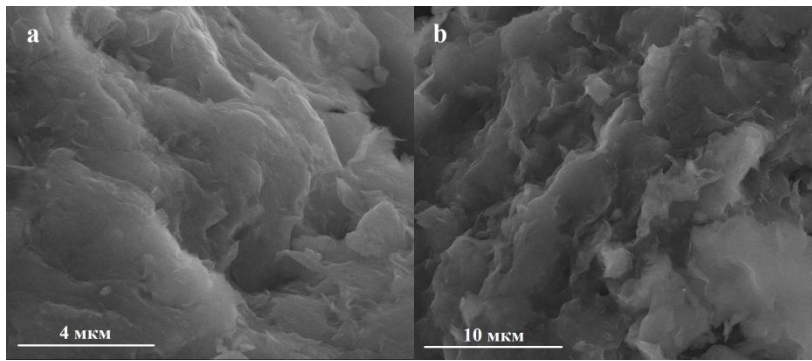


Рис. 1. - Мікрофотографії СЕМ зразків сапоніту: а) природний; б) модифікований кислотою

Питома поверхня визначена з використанням методу ВЕТ (Brunauer-Emmett-Teller) в області ізотерми, обмеженої діапазоном відносних тисків $P/P_0 = 0,05-0,35$ та за методом DFT (DensityFunctionalTheory), який базується на теорії функціоналу густини. Загальний об'єм пор розраховано шляхом перетворення кількості адсорбованого азоту при $P/P_s = 0,99$ до об'єму рідкого адсорбату. Метод ВЈН (Barret-Jouner-Halenda) використано для визначення загального об'єму мезопор, діаметру пор та розподілу пор за розміром. Для визначення розподілу мікропор за розмірами, об'єму мікропор V_{mic} , зовнішньої площі поверхні S_{ext} , площі поверхні мікропор S_{mic} використано метод.

Вихідною моделлю для всіх подальших розрахунків є ізотерми сорбції (Рис. 2) зразків, тобто залежність кількості рівномірно адсорбованого зразком азоту від відносного тиску азоту P/P_0 , де P і P_0 – тиск пари адсорбату (азоту) і тиск його насиченої пари при 77 К.

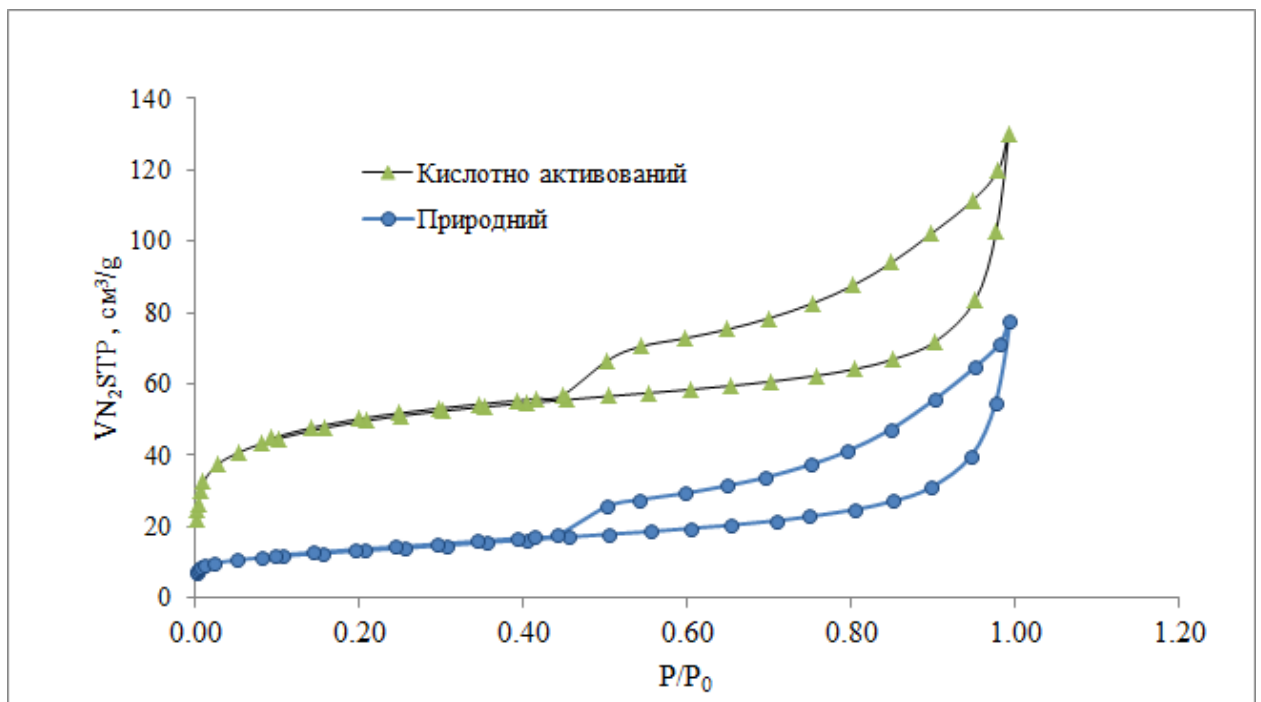


Рис.2. - Ізотерми адсорбції/десорбції азоту на зразках сапоніту

Отримані ізотерми для різних зразків сапоніту є якісно подібні між собою і відносяться до IV типу згідно з класифікацією, представленою Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT). Ізотерми проявляють гістерезис, який згідно класифікації IUPAC [10] належить до типу H3, зазвичай, пов'язують з порами, що складаються із плоскопаралельних шарів. Форми ізотерм вказують на наявність пор двох типів - мікро і мезопор у досліджуваному матеріалі. Крива ізотерм різко зростає на початку при невеликому надлишковому тиску ($P/P_0 < 0.1$), що пов'язано з присутністю вільних мікропор в матеріалі, в якому відбувається адсорбція азоту. Петля гістерезису наближається до точки відносного тиску, близькому до 0,46, що відповідає

наповненню і звільненню мезопор. [15]. В таблиці 2 наведено значення деяких параметрів, отриманих з аналізу ізотерм.

Таблиця 2.

Структурно-адсорбційні параметри сапонітів за даними ізотерм адсорбції/десорбції N₂ при 77 К

Зразок	Питома поверхня S, м ² /г		Об'єм пор V, см ³ /г			Діаметр пор D, Å
	S _{ВЕТ}	S _{DFT}	V _{total}	V _{месВН}	V _{mic} t	
Природний	47,7	47,2	0,134	0,199	0,008	15,46
Мод. к-тою	177,9	189,8	0,201	0,130	0,062	15,39

Показники питомої поверхні для зразків сапоніту за даними різних методів знаходяться у межах від 47,7 до 177,9 м²/г, загальний об'єм пор у кислотно активованому сапоніті зростає від 0,134 до 0,201 см³/г. Істотне збільшення питомої поверхні пов'язано зі збільшенням внутрішньої поверхні, що відповідає поверхні мікропор.

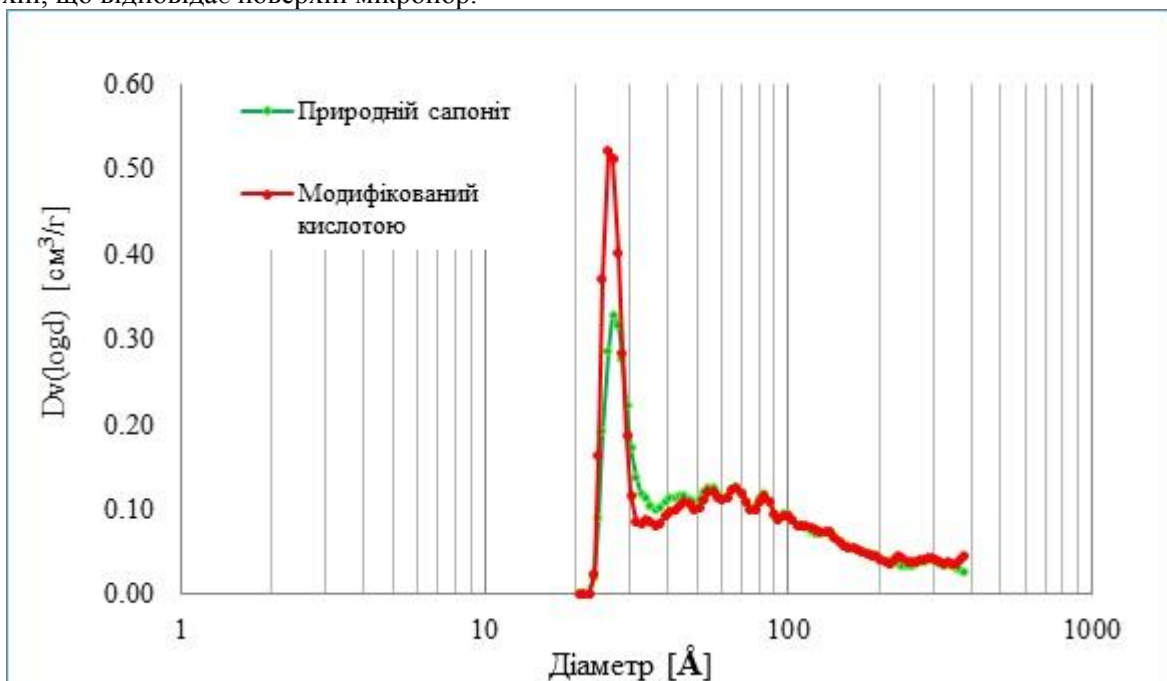


Рис.3. - Диференційна модель ВН адсорбції азоту на зразках сапоніту

З аналізу диференційної моделі ВН (Рис. 3), що відображає розподіл пор за розміром, можна виділити два характерних піки, які відповідають мікропорам з діаметром 20-25 Å та мезопорам у діапазоні 55-80 Å. Зазначимо, що для сапоніту модифікованого кислотою у розподілі пор відмічається суттєве зростання частки мікропор, більше, ніж у 7 разів і оцінюється як 0,062 см³/г за t-методом. Таке значне зростання об'єму мікропор після обробки кислотою відбувається за рахунок вимивання міжшарових катіонів, що спричиняє послаблення зв'язку між шарами і розширення простору між частинками глини та в результаті часткової деструкції октаедричного шару (видалення катіонів Al³⁺, Fe³⁺, Mg²⁺) [11, 17].

Висновки

Методом адсорбції/десорбції азоту встановлено, що пориста структура глинистого мінералу представлена мікро-мезопористою системою, в якій переважають мікропори. Хімічна модифікація кислотою призводить до вимивання катіонів у міжшаровому просторі, що впливає на збільшення питомої поверхні, зростання об'єму мікропор та розшарування тонкодисперсної структури мінералу.

Подяки

Дослідження виконані за фінансової підтримки Міжнародного Вишеградського фонду, проект 51501546/2015 та Міністерства освіти і науки України, проект 0115U000227

Список використаної літератури:

1. Кулик М. Ф. Сапоніт і аеросил у тваринництві та медицині / М. Ф. Кулик, Т. В. Засуха, М. Б. Луцок. – Вінниця: ФОП Рогальська І. О. – 2012. – 362 с.
2. Рудь В.Д. Порошкові фільтруючі матеріали на основі природних мінералів / В.Д. Рудь, С.В. Храпатий, Н.М. Гулієва // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. (за напрямом «Інженерна механіка»). – 2013. – Вип. 42.–С. 224 – 227.
3. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды / Ю.И. Тарасевич - К: Наукова думка. – 1981. – 208 с.
4. Финевич В.П. Композиционные наноматериалы на основе кислотно-активированных монтмориллонитов / В.П. Финевич Н.А. Аллерт Т.Р. Карпова В.П. Дуплякин // Рос хим ж им. Д.И. Менделеева. – 2007. – Вып. 4 – С. 70 – 74.
5. AGGARWAL V. Triazine adsorption by saponite and beidellite clay minerals /Vaneet Aggarwal, Hui Li, and Brian J. Teppen // *J. Environmental Toxicology and Chemistry*. USA. –2006. –Vol. 25.–No. 2.– P. 392–399.
6. Breen Ch. Characterization and Catalytic Activity of Acid-Treated, Size-Fractionated Smectites / Breen Ch., Deeba Zahoor F., Madejova J., Komadel P. // *J. Phys. Chem. American Chemical Society.*–1997. – Vol. 101. – No. 27. – P324 -331.
7. Brigatti M.F. Structures and mineralogy of clay minerals /M.F. Brigatti , B.E. Galan, K.G. Theng // *Handbook of Clay Science.* – Elsevier Ltd. *Developments in Clay Science.* – 2006.– Vol. 1.–P.19-86.
8. Dmitrenko Yu. A. Estimation of Saponite Sorptive Properties with Regard to Fluoride Ions / Yu. A. Dmitrenko, A. V. Mamchenko, and N. I. Shpilevaya // *Journal of Water Chemistry and Technology.* – 2012. –Vol.34 – No. 6. –P.271–276.
9. Dmitrenko Yu. A. Sorption of Hydrochloric Acid with Saponite /Yu. A. Dmitrenko and A. V. Mamchenko // *Journal of Superhard Materials.* Allerton Press, Inc. – 2013. – Vol. 35 – No. 1. – P. 15–22.
10. IUPAC/ IUPAC manual of symbols and terminology // *Pure Appl. Chem.* – 1972 –Vol 31–578 p.
11. Jozefaciuk G. Effect of acid and alkali treatments on surface areas and adsorption energies of selected minerals / G. Jozefaciuk G. Bowanko // *Clays and Clay Minerals.* – 2002. –Vol. 50. – No. 6–P. 771–783.
12. Kooli F. Characterization and catalytic properties of a saponite clay modified by acid activation, F. Kooli, W. Jones // *J. Clay Minerals. The Mineralogical Society.* London. – 1997. – Vol. 32. – P.633-643.
13. Ogorodova L. P. Calorimetric Determination of the Enthalpy of Formation of Natural Saponite /L. P. Ogorodova, I. A. Kiseleva, L. V. Mel'chakova, M. F. Vigasina, V. V. Krupskaya and V. V. Sud'in // *Geochemistry International.* Pleiades Publishing, Ltd. – 2015. – Vol. 53. – No. 7 –P. 617–623.
14. Pshinko G. N. Treatment of Waters Containing Uranium with Saponite Clay /G. N. Pshinko, S. A. Kobets, A. A. Bogolepov, and V. V. Goncharuk // *Journal of Water Chemistry and Technology.* – 2010 Vol. 32. – No. 1 – P. 10–16.
15. Sing K. The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials *Colloids and Surfaces / Sing Kenneth.* – Physicochemical and Engineering Aspects. – Elsevier Ltd. – 2001. – P. 187–188.
16. Spivak V. Ecological sorbent which is mainly consist of saponite mineral from Ukrainian clay-field / V. Spivak, I. Astrelin, N. Tolstopalova, I. Atamaniuk // *Chemistry & Chemical Technology.* – 2012. – Vol.6. – No.4. – P. 451-457
17. Suarez Barrios M. Textural and structural modifications of saponite from Cerro del Aguliabz acid treatment / M. Suarez Barrios, C. de Santiago Buey, E. Garcia Romero, J.M. Martin Pozas // *Journal of Clay Minerals.* – 2011. – Vol 36.-P. 483 – 488.
18. Tarasevich, Yu.I. The Composition and Thermal Resistance of Hydrates of Exchange Cations of Saponite / Yu.I. Tarasevich, V.E. Polyakova, Z.G. Ivanova, M.Yu. Trifonova // *Journal of Water Chemistry and Technology.* – 2011.– Vol. 33. – No. 4. – P. 381–391.
19. [Wilson](#) M.J. *Rock-Forming Minerals - Sheet Silicates / M.J. Wilson.* – Clay Minerals, Second (2nd) Edition, The geological society. London. –2012 . – Vol. – 724 p.

Стаття надійшла до редакції 06.08.2016

УДК:621.762

А.М. Степанчук, Ю.Ю. Румянцева, О.А. Демиденко
Національний технічний університет України "КПІ"

ВПЛИВ СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ СПЛАВІВ ЗАЛІЗО–САМОФЛЮСІВНИЙ СПЛАВ НА ЇХ КОЗИЙНУ СТИЙКІСТЬ У РОЗЧИНАХ СІРЧАНОЇ КИСЛОТИ

Наведені результати дослідження корозійної стійкості порошкових матеріалів з композицій, які склалися з заліза та 15, 30, 40, 50 і 70 % високолегованого самофлюсівного сплаву в 2,5 і 30 % розчині сірчаної кислоти. Показано, що на корозійну стійкість впливає склад та структура матеріалу. Найбільшу корозійну стійкість мають композиції в структурі яких фаза самофлюсівного сплаву утворює суцільний каркас, корозія якого є лімітуючою стадією корозії матеріалу у цілому. Встановлено, що у контакті з розчинами сірчаної кислоти композиції з вмістом самофлюсівного сплаву 15 і 30 % відносяться до стійких, а з вмістом СФЗ більшим за 30 % до стійких і дуже стійких.

Ключові слова: залізо, самофлюсівний сплав, структура, корозія, сірчана кислота, глибинний показник корозії.
Рис. 8; Табл. 2; Лит. 13.

А.Н. Степанчук, Ю.Ю. Румянцева, А.А. Демиденко
Национальный технический университет Украины "КПИ"

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗО-САМОФЛЮСУЮЩИЙСЯ СПЛАВ НА ИХ КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ В РАСТВОРАХ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Приведены результаты исследования коррозионной стойкости порошковых материалов из композиций, которые состояли из железа и 15, 30, 40, 50 и 70 % высоколегированного самофлюсующегося сплава в 2,5 и 30 % растворе серной кислоты. Показано, что на коррозионную стойкость влияет состав и структура материала. Наибольшую коррозионную стойкость имеют композиции в структуре которых фаза самофлюсующегося сплава образует сплошной каркас, коррозия которого является лимитирующей стадией коррозии материала в целом. Определено, что в контакте с растворами серной кислоты композиции с содержанием самофлюсующегося сплава 15 и 30 % относятся к стойким, а с содержанием СФЗ более 30 % к стойким и очень стойким.

Ключевые слова: железо, самофлюсующийся сплав, структура, коррозия, серная кислота, глубинный показатель скорости коррозии.

Рис. 8; Табл. 2; Лит. 13.

A.N. Stepanchuk, Y.Y. Rumyantseva, A.A. Demydenko
National Technical University of Ukraine "KPI"

INFLUENCE OF COMPOSITION AND STRUCTURE OF IRON-SFA ALLOYS ON THEIR CORROSION RESISTANCE IN THE SULPHURIC ACID

There was determined deep mark of corrosion velocity of explored materials. There were shown the results of the research of corrosion resistance of powder materials of compositions which consist of iron and 15, 30, 40, 50, 70% of highly doped self-fluxing alloys in 2,5 and 30% sulfur acid solution. There was proposed mechanism of explored material corrosion, according to it, relative low corrosion resistance of compositions with SFA 15 and 30% caused by creating galvanic couples on border of the iron phase and SFA phase, which accelerates corrosion processes. Increasing SFA amount over 30% causes creation in the material solid SFA mesh, which is very consistent in acid solutions. The last one isolates iron phase from contacting with acid solution and determines material corrosion velocity at all. that in contact with 2,5 and 30% sulfur acid solutions compositions containing 15 and 30% SFA are consistent, but with SFA containing more than 30% are consistent and very consistent.

Keywords: iron, self-fluxing alloys, structure, corrosion, sulfur acid, deep corrosion, velocity mark

Fig. 8; Tabl. 2; Lit. 13.

Вступ. Сучасна техніка ставить до властивостей конструкційних матеріалів високі вимоги (твердість, міцність, корозійна стійкість), зумовлені зростаючою інтенсивністю навантаження вузлів машин і механізмів та різноманіттям середовищ, в яких вони працюють. Наприклад, порошкові багатофункціональні матеріали, серед різноманіття галузей їх застосування, можуть бути використані для виготовлення деталей заглиблених насосів в гірничо– та нафтодобувній промисловості, які працюють в умовах абразивного зношування та дії агресивних розчинів кислот та лугів.

У цьому відношенні перспективними матеріалами для виготовлення деталей таких насосів, наприклад ущільнювачів, можуть бути використані композиції за участю самофлюсівних сплавів на основі нікелю (СФС) та заліза (СФЗ) [1–2], які можуть працювати як зносостійкі антифрикційні матеріали в умовах дії абразивів. Враховуючи те, що самофлюсівні сплави є високолегованими і вміщують елементи з високою корозійною стійкістю слід передбачити перспективу їх

використання у складі матеріалів, які працюють в умовах дії розчинів кислот та лугів. До таких матеріалів можуть бути віднесені композиції за участю порошків заліза та самофлюсівних сплавів. Дані про корозійну стійкість таких композицій в літературі практично відсутні. Тому, на нашу думку, з метою встановлення оптимального складу композицій та умов їх виготовлення, дослідження їх корозійної стійкості в розчинах кислот та лугів є досить актуальною задачею.

Постановка задачі. Задачею роботи є дослідження процесів взаємодії компактованих порошкових композицій з порошків заліза та самофлюсівних сплавів на основі заліза (СФЗ) з розчинами сірчаної кислоти з метою визначення їх корозійної стійкості залежно від складу, вивчення механізмів корозії та надання рекомендацій по отриманню матеріалів з наперед заданими характеристиками корозійної стійкості.

Результати експериментальних досліджень. В роботі досліджувались матеріали з композицій Fe-СФЗ з вмістом останнього 15, 30, 40, 50 та 70 % . Для вивчення впливу складу матеріалів на їх корозійну стійкість в розчинах сірчаної кислоти, отримували зразки з відносною щільністю 98–99% за умов встановлених в роботі в роботі [3]. Для визначення відносною корозійної стійкості також досліджувались зразки з заліза та самофлюсівного сплаву.

Хімічний склад вихідних матеріалів та усереднений розрахунковий елементний склад отриманих з них композицій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

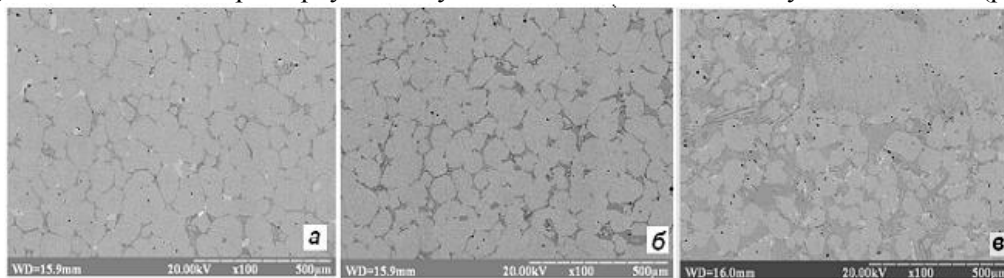
Хімічний склад вихідних матеріалів та композицій з них

Матеріал	Вміст елементів, %									
	Fe	Ni	Cr	Cu	Si	B	C	P	S	Mn
Залізо	Осн.	<0,3	<0,3	<0,3	0,28	–	0,17	<0,04	<0,05	0,500
СФЗ	Осн.	25,0	8,30	4,40	1,6	3,2	0,6	0,42	–	–
Fe+15 % СФЗ	Осн.	3,75	1,74	0,28	3,0	0,9	0,22	0,08	0,042	0,255
Fe+30 % СФЗ	Осн.	5,00	2,12	0,30	0,48	1,1	0,24	0,11	0,040	0,240
Fe+40 % СФЗ	Осн.	8,7	3,33	0,36	0,56	1,7	0,24	0,17	0,032	0,195
Fe+50 % СФЗ	Осн.	12,5	4,44	0,41	0,64	2,3	0,27	0,22	0,025	0,150
Fe+70% СФЗ	Осн.	16,4	6,64	1,39	0,88	2,8	0,33	0,28	0,014	0,11

Для вивчення впливу концентрації сірчаної кислоти на корозійну стійкість сплавів готували 2,5% та 30% її розчини у воді. Зразки сплавів занурювали у розчини кислот і після певної витримки їх виймали з нього, промивали водою, сушили та зважували. Зважування проводили на аналітичних терезах з точністю до 0,001 г. Проводились також металографічні дослідження поверхні зразків до та після корозії. Отримані результати наведені на рисунках 1–3 та рисунку 6.

Про попередню оцінку корозійної стійкості зразків можна зробити висновок за загальним зовнішнім виглядом розчину, в якому вони кородували. Зі зменшенням вмісту самофлюсівного сплаву в сплаві колір більш темним (змінюється від світлого до темно синьо-зеленого), що свідчить про різну концентрацію розчинених продуктів корозії.

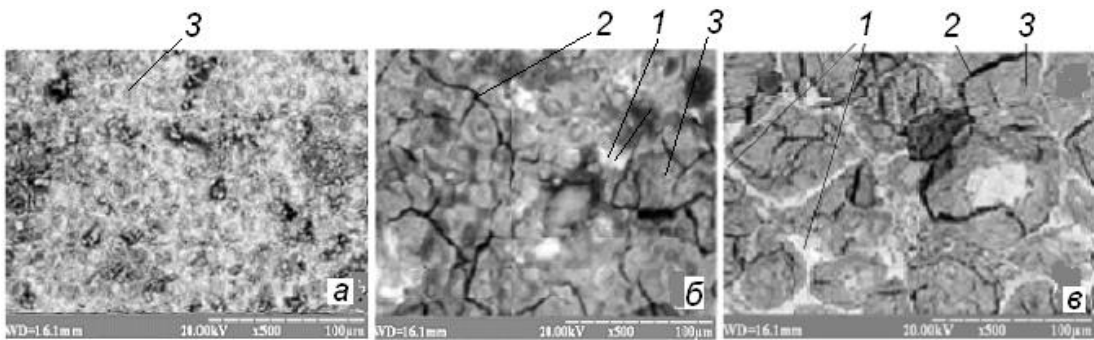
Металографічні дослідження структури вихідних зразків показали, що вона двофазна і складається з зерен заліза та включень самофлюсівного сплаву (рис. 1, а). При збільшенні вмісту в сплаві самофлюсівного сплаву останній утворює суцільне мереживо за рахунок чого утворюється "сотова" структура в якій зерна заліза відокремлені один від одного прошарком СФЗ (рис. 1, б). Товщина цього прошарку збільшується зі збільшенням вмісту СФЗ в сплаві (рис. 1, в).



а – 15; б – 30; в – 50 (темно сіра фаза – СФЗ)

Рис. 1. Мікроструктура вихідних зразків з різним вмістом СФЗ (%)

Після проведення корозійних досліджень структура поверхні зразків змінюється. Зразки з чистого заліза кородують рівномірно по всій поверхні (рис. 2, а).



1 – СФЗ; 2 – тріщини; 3 – залізо

Рис. 2. Мікроструктура поверхні зразків після корозії з заліза (а), сплаву Fe–15% СФЗ (б) та сплаву Fe–30% СФЗ (в)

Структура поверхні зразків з вмістом СФЗ має інший вигляд. Так при корозії зразку з 15% СФЗ в обох розчинах майже на всій його поверхні виникають тріщини (рис. 2, б).

При збільшенні в сплаві вмісту СФЗ також мають місце корозійні тріщини (рис. 2, в). При цьому спостерігається виділення на поверхні зразка мережива з СФЗ. Аналізуючи загальний вигляд мікроструктури поверхні разків з 50% СФЗ після корозії можна відмітити проявлення на ній зерен карбідів та карбоблідів (рис. 3, а), які характерні для структури самофлюсівних сплавів (рис. 3, б), що уждожується з даними роботи [1]. Структура впорядковується, утворюється карбідно-боридний каркас.

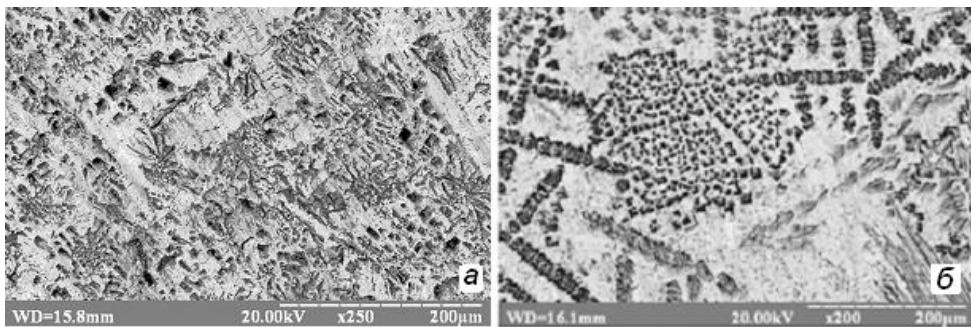


Рис. 3. Мікроструктура зразків на основі заліза, які містять 50% (а) та 100 % СФЗ після корозії у сірчаній кислоті

При вивченні вагових змін зразків під час корозії було встановлено (рис. 4), що в 2,5 % розчині зразки з вмістом СФЗ 15 та 30% кородують протягом 50 год. практично однаково. При цьому вагові зміни знаходяться на рівні вагових змін чистого заліза.

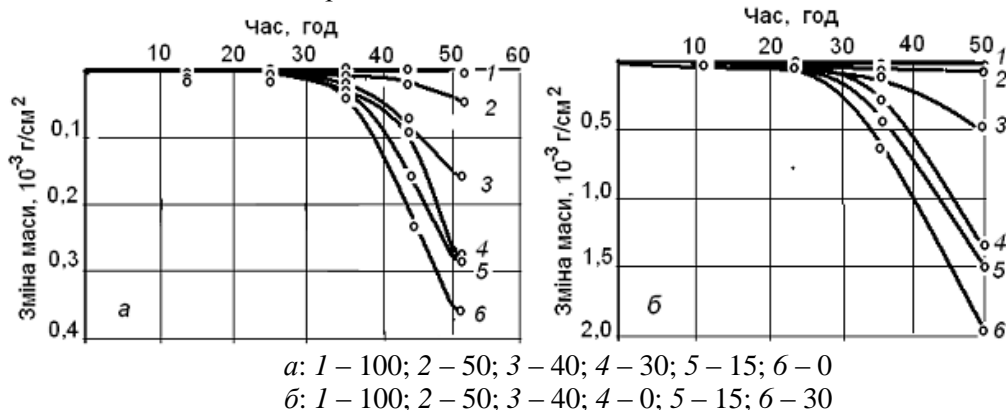


Рис. 4. Залежність зміни маси зразків сплавів Fe – СФЗ від часу їх корозії у 2,5%-ому (а) і 30 % – ому (б) розчинах сірчаної кислоти з різним вмістом СФЗ (%)

Спостерігається також прискорення корозійних процесів у 4–6 разів для всіх сплавів зі збільшенням концентрації розчину сірчаної кислоти (рис. 4, б).

Для порівняння швидкості процесів корозії в роботі були розраховані вагові показники швидкості корозії для сплавів з різним вмістом СФЗ за формулою [4]:

$$k = \frac{M}{St} \quad (1)$$

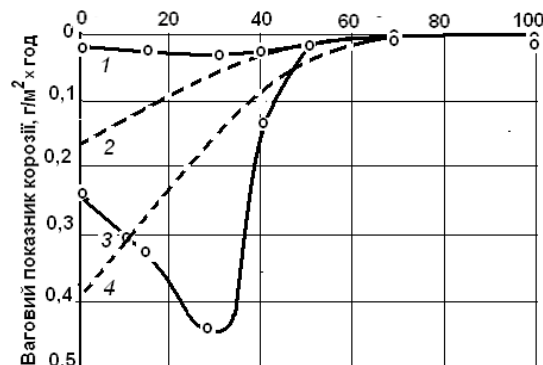
де k – ваговий показник швидкості корозії ($\text{г/м}^2 \times \text{год.}$);

S – площа поверхні зразка, м^2 ;

t – час випробувань, год.

M – корозійні втрати маси зразка, г (різниця у вазі до і після випробувань);

На основі отриманих даних були побудовані залежності значень вагових показників корозії від вмісту СФЗ (рис. 5). Отримані залежності узгоджуються з експериментальними даними наведеними вище.



1 – 2,5; 3 – 30; 2, 4 – теоретичні залежності

Рис. 5. Залежність середніх значення вагового показника корозії від вмісту СФЗ при корозії в розчинах сірчаної кислоти (%) протягом 50 годин

Обговорення результатів. Отримані результати по дослідженню корозійної стійкості в нашій роботі можна пояснити виходячи з елементного складу матеріалів, що досліджувались (табл.1). Як видно з таблиці 1, основними легувальними елементами досліджуваних сплавів є нікель та хром, які можуть підвищувати корозійну стійкість сплавів на основі заліза. Наявність хрому в сплаві буде приводити до утворення його карбідів і боридів (або складних карбідів і боридів) [1,2], що, вірогідно, також може сприяти підвищенню корозійної стійкості сплаву. Останнє зумовлено їх більш високою корозійною стійкістю ніж металів, що їх утворюють.

Бор та кремній забезпечують самофлюсівність сплавам [1,2], а також можуть утворювати з іншими складовими сплаву бориди та силіциди.

Наявність в сплавах на основі заліза фосфору може бути причиною виникнення кристалізаційних тріщин, що може бути причиною погіршення їх корозійної стійкості. Окрім того, в сплавах на основі заліза можуть утворюватись фосфідні евтектики Fe-P, Fe-P-C, Fe-P-C-Si [5,6].

Мідь в сплавах на основі заліза підвищує їх стійкість до корозії за рахунок суттєвого зниження швидкості окиснення заліза [7]. Але вона також може взаємодіяти з сірчаною кислотою за реакцією $\text{Cu} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{CuSO}_4 + \text{H}_2$ або $\text{Cu} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{CuSO}_4 + \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.

При взаємодії сплавів на основі заліза з розчинами сірчаної кислоти можливе протікання наступних реакцій $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$; $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$; $\text{Fe} + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2$. Або в загальному вигляді $\text{Fe} + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{FeSO}_4 + \text{H}_2$. При цьому поверхня металу пасивується і процес корозії поступово сповільнюється за рахунок утворення пасивного шару на поверхні заліза із змішаного оксиду $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$. Товщина цього шару може складати 3–5 нм [8]. Порівняно висока корозійна стійкість заліза та мало вуглецевих його сплавів зумовлюється також тим, що при взаємодії з сірчаною кислотою на його поверхні можуть утворюватись важкорозчинні продукти корозії систем Fe-Si та Fe-C.

Однією з причин корозійного розтріскування, яке відбулося при дії сірчаної кислоти на зразки, що містять 15% та 30% СФЗ (рис. 2, б,в) може бути сегрегація елементів [9], у нашому

випадку фосфору, та хімічна активність середовища. Іншою причиною може бути неоморідність хімічного складу досліджуваних матеріалів. Значна різниця в електрохімічних потенціалах компонентів сплаву може сприяти прискоренню перебігу анодно-катодних процесів, які можуть лежати в основі перебігу корозійних процесів.

Загальний механізм перебігу цього виду корозії полягає у тому [10], що при контакті двох металів, які мають різні електрохімічні потенціали, утворюються гальванічні пари. При цьому метал з більш від'ємним електрохімічним потенціалом в ряду напружень є більш активним.

У нашому випадку найбільш електронегативним, а отже, найбільш активним елементом, є Mn, який міг утворити у зразку наступні сполуки за нижчезказаними реакціями $Mn + O_2 = MnO_2$ та $4Mn + 3O_2 = 2Mn_2O_3$. Можливе також протікання реакцій: $Mn + H_2SO_4 = MnSO_4 + H_2$.

Хром хімічно малоактивний, але при взаємодії з розбавленою сірчаною кислотою утворює солі трьовалентного хрому [11]. Саме утворенням цих солей можна пояснити зміну кольору розчину на зелений інтенсивність якого збільшується зі збільшенням часу корозії та місту в композиціях СФЗ, який є джерелом хрому. При цьому можливе протікання реакцій:

$Cr + H_2SO_4 (розб) = CrSO_4 + H_2$, $CrO + H_2SO_4 = CrSO_4 + H_2O$, $2Cr(OH)_3 + 3H_2SO_4 = Cr_2(SO_4)_3 + 6H_2O$.

Окрім того, хром має схильність до карбіду – (Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$) та боридоутворення (CrB , CrB_2), що призводить до утворення так званого корозійностійкого «каркасу».

Як було зазначено вище, чисте залізо виявляється досить стійким до дії сірчаної кислоти. Ще більшу стійкість виявляє нікель, адже його електрохімічний потенціал складає лише $-0,234$ В (у заліза $-0,441$ В). Взаємодія нікелю з сірчаною кислотою відбувається за реакцією: $Ni + H_2SO_4 = NiSO_4 + H_2$.

Наявність нікелю в сплавах на основі заліза приводить до їх аустенізації. При наявності хрому відбувається стабілізація аустенітної структури, що покращує здатність сплавів до пасивації, а отже, збільшує їх корозійну стійкість у агресивних середовищах та тривалість їх експлуатації.

Виходячи з викладеного збільшення вмісту в досліджуваних матеріалах самофлюсівного сплаву теоретично має приводити до збільшення їх корозійної стійкості (рис. 5, 2,4). Але практично ця залежність інша (рис. 5, 1,3). Аномальне зниження корозійної стійкості при вмісті в сплавах СФЗ 15 та 30 % може бути зумовлене утворенням гальванічних пар унаслідок значної хімічної неоднорідності, зумовленою структурою матеріалу в якій є фазова складова з заліза і високолегована складова СФЗ (рис.2). У цьому випадку при наявності електроліту, який вміщує сірчану кислоту та сульфат міді, як це має місце у нашому випадку, можливе виникнення гальванічної пари у якій як анод слугує залізо, а катод – самофлюсівний сплав, який є високолегованим сплавом [1,2]. Останнє узгоджується з даними по отриманню порошоків нержавійних сталей шляхом міжкристалевої корозії [12]. Як наслідок, відбувається значне прискорення розчинення заліза, особливо на межі поділу фаз. Це може бути однією з причин виникнення тріщин при корозії сплавів з вмістом СФЗ меншим за 30 % які мають структуру з зерен заліза і дискретними зернами самофлюсівного сплаву (рис. 2, а; рис. 6). У цьому випадку унаслідок виникнення глибинних тріщин збільшується площа поверхні, яка приймає участь у електрохімічних процесах.

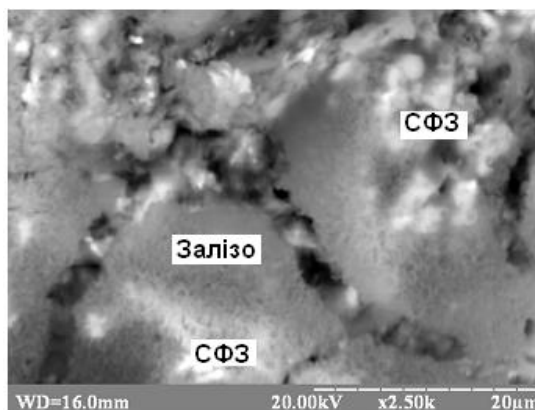
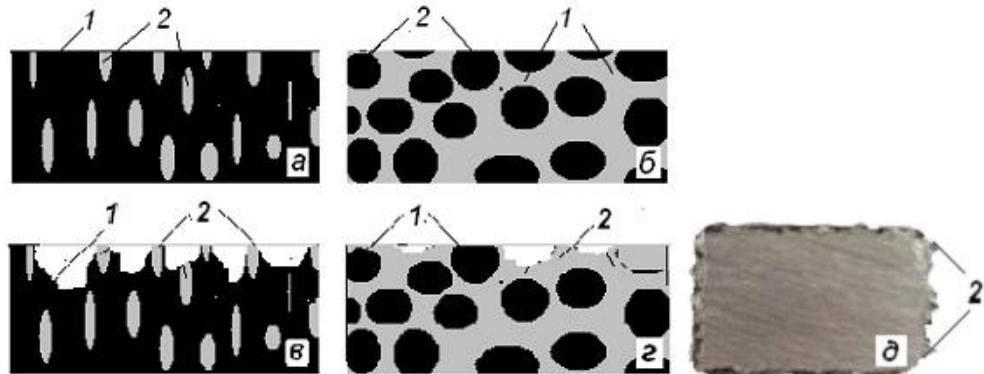


Рис. 6. Структура поверхні сплаву Fe–30 % СФЗ зі слідами міжкристалевої корозії

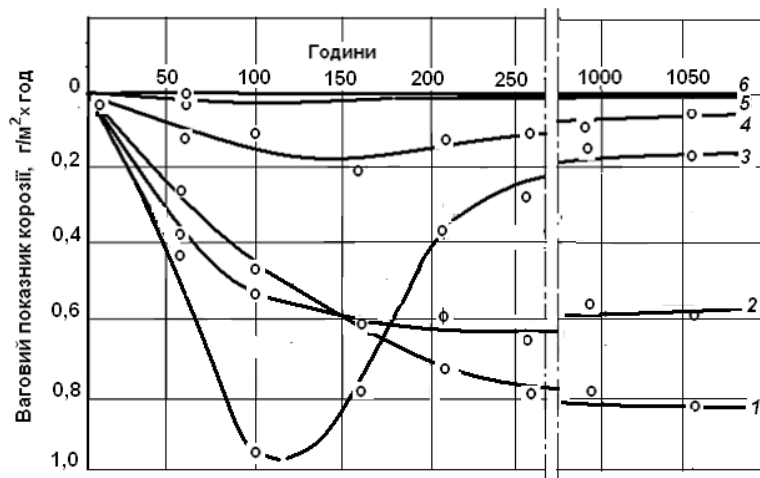
Збільшення корозійної стійкості сплавів з вмістом СФЗ більше 30 % може бути зумовлене відносним збільшенням фазової складової, яка в досліджених умовах практично не кородує (рис. 4, 1). У таких сплавах, як було зазначено вище, фазова складова з СФЗ утворює суцільне мереживо, яке відокремлює зерна заліза одне від одного як у площині поверхні так і в глибину (рис. 7, б). Така структура може значно зменшувати міжфазову поверхню, яка приймає участь у електрохімічних процесах.



1 – залізо; 2 – самофлюсівний сплав

Рис. 7. Схема корозії сплавів з вмістом СФЗ до (а, в) і більше (б, г) 30 %; а, б – до корозій; в, г – після корозій; д – зразок в перетині з слідами корозії на поверхні

Для в'ясування впливу структури сплавів на перебіг процесів, які відбуваються при корозії досліджуваних сплавів залізо – самофлюсівний сплав нами були проведені довготривалі випробування їх корозійної стійкості, результати яких наведені на рисунку 8.



1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60

Рис. 8. Залежність вагового показника корозії сплавів Fe–СФЗ від часу корозії та вмісту СФЗ (%) в 30%-ому розчині сірчаної кислоти

Як видно з них, дійсно, сплави, які мають гетерогенну структуру з дискретними включеннями фази СФЗ інтенсивно кородують, особливо на початковій стадії (рис. 6; рис. 7, в; рис. 8). При збільшенні тривалості корозії інтенсивність корозії дещо знижується, але залишається значною (рис. 8, 2,3). При збільшенні в сплаві вмісту СФЗ інтенсивність корозії значно зменшується як на початковій стадії так і у подальшому (рис. 8, 4,5). А для сплавів з вмістом СФЗ 50 %, особливо за часу корозії більшому за 250 год., процес корозії відбувається подібно до корозії самофлюсівних сплавів на основі заліза, які в досліджених умовах кородують дуже повільно. Отримані результати підтверджують наші припущення, що на корозійну стійкість досліджуваних сплавів значною мірою впливає їх структура. Процес корозії буде визначатись закономірностями корозії самофлюсівного сплаву у тому випадку, коли в структурі матеріалу при отриманні його спіканням у присутності рідкої фази [3] він утворює суцільне мереживо (рис. 1,

б,в ; 7, г), яке розділяє фазу заліза і попереджує її контакт з агресивним середовищем (у нашому випадку розчинами сірчаної кислоти).

З врахуванням значень вагового показника корозії був розрахований глибинний показник швидкості корозії (табл. 2), який характеризує середнє проникнення корозійного руйнування в матеріал у міліметрах за одиницю часу (І рік), тобто мм/рік. Розрахунки проводили за формулою [4]:

$$\dot{I} = \frac{8,76k}{\gamma} \quad (2)$$

де γ – густина матеріалу, що випробується, $г/см^3$

Отримані дані наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Залежність глибинного показника корозії від вмісту СФЗ в різних розчинах сірчаної кислоти

Вміст СФЗ, %	Показник корозії П, мм/рік	
	2,5 % H ₂ SO ₄	30 % H ₂ SO ₄
0	0,180	0,898
15	0,1330	0,665
30	0,0270	0,194
40	0,0140	0,085
50	0,0073	0,044
100	0,0015	0,009

Як видно з таблиці 2 має місце кореляція між отриманими значеннями глибинного показника корозії з даними наведеними на рисунках 4, 5, 8. Якщо давати характеристику дослідженим матеріалам з точки зору 10 – бальної шкали оцінювання загальної корозійної стійкості матеріалів [4], композиції з вмістом самофлюсівного сплаву на основі заліза більшим за 30 % у контакт з розчинами сірчаної кислоти відносяться до стійких та дуже стійких і можуть бути використані для виготовлення конструкційних матеріалів заглибних насосів гірничо – та нафтодобувної промисловості та запірної арматури хімічної промисловості.

Висновки. Вивчена кінетика корозійної стійкості порошкових матеріалів з композицій, які складались з заліза та 15, 30, 40, 50 і 70 % високолегованого самофлюсівного сплаву в 2,5 та 30 % розчині сірчаної кислоти. Показано, що корозійна стійкість змінюється залежно від складу композиції та часу корозії.

Запропоновано механізм корозії досліджених матеріалів, згідно якому відносно низька корозійна стійкість композицій з вмістом СФЗ 15 та 30 % зумовлена утворенням гальванічних пар на межі фази заліза та СФЗ, що прискорює процеси корозії. Збільшення вмісту СФЗ понад 30 % призводить до утворення у матеріалі суцільного каркасу з СФЗ, який є дуже стійким у розчинах кислот. Останній ізолює фазу заліза від контакту з розчином кислоти і, тим самим, визначає швидкість корозії матеріалу у цілому.

Встановлено, що композиції з вмістом самофлюсівного сплаву 15 і 30 % і часі корозії у межах до 200 годин за 10 – бальної шкали оцінювання загальної корозійної стійкості матеріалів відносяться до стійких, а з вмістом СФЗ більшим за 30 % до стійких і дуже стійких у 2,5 та 30 % розчинах сірчаної кислоти.

У подальшому для розширення галузей застосування матеріалів із композицій залізо–самофлюсівний сплав доцільне проведення досліджень їх корозійної стійкості в інших агресивних середовищах розчинів кислот, лугів та солей.

Список використаних джерел:

1. Степанчук А.М. Використання самофлюсівних сплавів при створенні композиційних матеріалів та покриттів [Електор. ресурс]/А.М. Степанчук, О.А.Демиденко, Л.О.Бірюкович, М.Б.Шевчук //Матеріали міжнародної конференції "Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра", – Київ: НТУУ"КПІ", 2013. – С. 454–465.
2. Степанчук А.М. Матеріали для напилювання покриттів [текст] навч. посіб. /А.М. Степанчук, І.І. Білик. – К.: Центр учбової літератури, 2016. – 226 с.
3. Степанчук А.М. Конструкційні порошкові матеріали на основі заліза за участю самофлюсівних сплавів /А.М.Степанчук., О.А.Демиденко, А.В.Демиденко, К.В. Шаповал //Наукові вісті НТУУ"КПІ". – 2012. – №1. – С. 51–60.

4. Методические указания к выполнению лабораторного практикума по дисциплине «Коррозия и защита металлов» для студентов всех специальностей. /Сост.: С. И. Пинчук, А. П. Стовпченко, И. Г. Рослик, О. О. Внуков. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 33 с.
5. *Бондарь В.И.* Коррозия и защита материалов. Учеб. пособие для студентов металлургических специальностей. / В.И. Бондарь. – Мариуполь: ПГТУ, 2009. – 126 с.
6. *Медовар Б.И.* Аустенитно-боридные стали и сплавы для сварных конструкций / Б.И. Медовар, Н.И. Пинчук, Л.В. Чекотило. – К.: Наукова думка, 1970. – 145 с.
7. *Кичигин В.И.* Коррозионная устойчивость порошковых сталей, инфильтрированных медью, в растворе серной кислоты / В.И. Кичигин, И.И. Замалетдинов, В.Г. Александров // М.: Коррозия: материалы, защит. – 2015. – №1. – С. 6–13.
8. *Пантелеенко Ф.И.* Пути повышения коррозионной стойкости плазменных слоев из самофлюсующихся сплавов на железной основе / Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов, О.П. Штемпель // Машиностроение: сб. науч. тр. / Под ред. И.П. Филонова. – Минск: Технопринт, 2002. – С. 226–232.
9. Замалетдинов И.И., Александров В.Г., Трубина Е.П. Исследование коррозионности порошковых сталей для трущихся узлов электронасосов, применяемых в нефтедобывающей промышленности / И.И. Замалетдинов, В.Г. Александров, Е.П. Трубина //Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: материалы 11 Междунар. науч. практ. конф., г. Новочеркасск, 19 нояб. 2012 г. /Юж.-Рос. Гос. Техн. Ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), – 2012. – С. 24–33.
10. Коррозия: справочное издание. Под ред. Л. Л. Шрайера. – М.: Металлургия, – 1981. – 632 с.
11. Otsubo, F., Era, N. and Kishitake, K., Structure and phases innickel-base self-fluxing alloy coating containing high chromium and boron / F. Otsubo, N. Era, K. Kishitake // SprayTechnol. – 2000. – №9. – С. 107–113.
12. *Степанчук А. М.* Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук. Підручник. /А.М. Степанчук.– Київ: Видавництво “Політехніка”, 2006. – 353 с.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2016

В.А. Сяський

Рівненський державний гуманітарний університет

УТОЧНЕНА МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧІ ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ ВІД СИСТЕМИ ШТАМПІВ З КУТОВИМИ ТОЧКАМИ ДО ПРУЖНОГО КРУГЛОГО ДИСКА

Уточнена модель контактної взаємодії системи жорстких штампів та пружного круглого диска враховує початкову різницю радіусів кривини контактуючих поверхонь та особливості передачі оберտального моменту за рахунок сил тертя, заданих законом Кулона. На основі виразів для зміщення контурних точок диска побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами. Розв'язок системи рівнянь дозволяє встановити положення і розмір зони контакту, напружено-деформований стан на контурі диска та величину притискового зусилля у системі штампів, яке забезпечує максимальну передачу оберտального моменту і гарантує мінімальне зминання матеріалу. Розглядаються різні варіанти контактування тіл в залежності від співвідношення між радіусами кривин їх поверхонь.

Ключові слова: пружний диск, жорсткий штамп з кутковими точками, сили тертя, обертальний момент, контактні напруження, сингулярні інтегральні рівняння з логарифмічними ядрами.

В.А. Сяський

УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО МОМЕНТА ОТ СИСТЕМЫ ШТАМПОВ С УГЛОВЫМИ ТОЧКАМИ К УПРУГОМУ КРУГЛОМУ ДИСКУ

Уточненная модель контактного взаимодействия системы жестких штампов и упругого круглого диска учитывает начальную разницу радиусов кривизны контактирующих поверхностей и особенности передачи вращательного момента от штампов к упругому телу за счет сил трения, заданных законом Кулона. На основе выражений для смещения контурных точек диска построена система сингулярных интегральных уравнений с логарифмическими ядрами. Решение системы уравнений позволяет определить положение и размер зоны контакта, напряженно-деформированное состояние на контуре диска и величину прижимного усилия в системе штампов, которое обеспечивает максимальную передачу вращательного момента и гарантирует минимальное сминание материала. Рассматриваются различные варианты взаимодействия тел в зависимости от соотношения между радиусами кривизны их поверхностей.

Ключевые слова: упругий диск, жесткий штамп с угловыми точками, силы трения, крутящий момент, контактные напряжения, сингулярные интегральные уравнения с логарифмическими ядрами.

V. Syaskyy

REFINED TRANSMISSION MODEL OF ROTATIONAL MOMENT FROM THE SYSTEM OF HARD STAMPS TO THE ELASTIC ROUND DISK

In the article the contact interaction of the system of hard stamps with angular points and round elastic disk is researched. The specified interaction model considers the initial difference of contacting surfaces curvature and peculiarities of the rotational moment transmission from stamps to the elastic body by Coulomb friction. The boundary condition of the problem involve equality of normal displacements of the contacting bodies common points. Based on the expressions for displacement of contour points of disk the system of singular integral equations with logarithmic kernels was created. For the numerical implementation of the problem the combined method of mechanical squaring and boundary collocation is used. The solution of the system of equations allows to determine the position and the size of the contact zone, stress-strain state on the elastic body outline and value of clamping force in the system of stamps, that provides the maximum rotational moment transmission and ensures minimum crushing of material. Depending on the correlation between the curvature radius of their surfaces, different options of the contacting bodies interaction are analyzed.

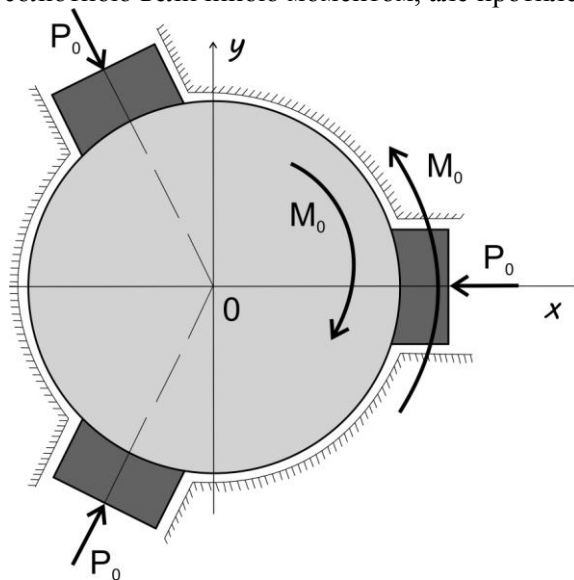
Key words: hard stamps with angular points, Coulomb friction, rotational moment, contact stresses, singular integral equations with logarithmic kernels.

Формулювання проблеми в загальному вигляді. При розрахунках фрикційних передач, гальмівних систем для транспорту та підйомної техніки, розробці пристроїв для закріплення ріжучих інструментів та заготовок у обробних верстатах, а також фіксації геофізичних приладів та обладнання у свердловинах широко використовуються розв'язки задач про тиск жорстких штампів з кутковими точками на поверхню кругового циліндричного отвору в масивному тілі або на бічну поверхню круглого диска чи вала. Контакт між тілом і штампамі забезпечується системою зрівноважених сил, прикладених вздовж осей симетрії штампів, та моментом пари сил, який рівномірно розподілений по усіх штампах. Передачу обертального моменту від системи штампів до тіла здійснюють сили тертя в зоні контакту. Актуальним є дослідження залежності напружено-деформованого стану пружного тіла від геометричних параметрів штампів та сил тертя в зоні контакту. Визначення розподілу контактних напружень необхідне для розв'язання проблем міцності співдотичних тіл, їх зносостійкості, теплового розрахунку тертьових поверхонь тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вдавлювання гладких штампів без кутових точок на циліндричну поверхню пружних тіл, коли кривини контактуючих контурів є близькими і такими, що забезпечують суцільну зону контакту, досліджено у роботах [1, 2]. Взаємодія двох жорстких штампів із кутовими точками та пружного круглого диска або пружної пластинки із круговим циліндричним отвором, коли радіуси кривин контактуючих поверхонь рівні, розглянута в роботі [3]. Подальші дослідження в цьому напрямі передбачали використання систем із довільної кількості однакових симетричних штампів з кутовими точками [4]. Такі постановки задач є ідеалізованими. У більшості технічних застосувань має місце тиск штампів на поверхні тіл, радіуси кривин яких відрізняються на величини, що перевищують пружні деформації. При цьому можна вважати контактуючі поверхні позбавленими шорсткості, а їх кривини – сталими. Прикладом такої технічної проблеми є закріплення ріжучих інструментів (свердл, фрез) або заготовок у затискних патронах обробних верстатів. Патрон із одним комплектом затискних штампів використовується для закріплення інструментів або заготовок різного діаметра. Важливим у цьому випадку є встановлення величини затискного зусилля у патроні, яке забезпечує максимальну передачу обертального моменту і гарантує мінімальне змінання матеріалу.

Метою дослідження є побудова уточненої моделі передачі обертального моменту від системи жорстких штампів з кутовими точками до пружного круглого диска або вала за рахунок сил тертя у загальному випадку, коли радіуси кривин контактуючих поверхонь відрізняються на скінченні величини.

Постановка задачі. Не зменшуючи загальності, розглядається ізотропний круглий диск радіусом R і товщиною $2h$. На контурі диска в площині серединного перерізу рівномірно розміщено N однакових симетричних жорстких штампів з кутовими точками, які утримуються системою із паралельних напрямних (Рис. 1). Форма і розмір штампів характеризуються радіусом контактуючої поверхні r та відстанню між кутовими точками $2d$. Твірні поверхонь взаємодіючих тіл є паралельними, а радіуси кривин відрізняються на скінченну величину, що має порядок пружних зміщень. Контакт між диском і штампами підтримують зрівноважені сили P_0 , які діють вздовж осей симетрії штампів. Поступальне радіальне зміщення штампів забезпечують пари паралельних напрямних. Між напрямними і бічними поверхнями штампів тертя відсутнє. Усі напрямні утворюють єдину жорстку систему, до якої прикладено обертальний момент M_0 із центром обертання, що співпадає з центром диска. Обертальний момент через штампи завдяки силам тертя передається до диска. Для забезпечення рівноваги диска в його центрі діє зосереджена пара сил із таким самим за абсолютною величиною моментом, але протилежним за напрямом.



Оскільки радіуси поверхонь штампів і диска різні, то розміри ділянок контакту наперед невідомі і підлягають встановленню. У результаті взаємодії тіл в зоні контакту виникають нормальні T_ρ і дотичні $S_{\rho\lambda}$ зусилля, які потрібно визначити. Також необхідно встановити кільцеві T_λ напруження на контурі диска γ . Особливий інтерес становить граничне значення моменту

M_0 , яке може передаватися до пружного тіла без проковзування при заданій силі P_0 , та величина поступального зміщення штампів.

Лінійні розміри диска та штампів вздовж твірних циліндричних поверхонь можна вважати однаковими, тому доцільно розглядати систему диск-штампи в умовах узагальненого плоского напруженого стану. При цьому досліджується серединний переріз взаємодіючих тіл. В залежності від співвідношення між радіусами контактуючих поверхонь можливі два варіанти взаємодії. Перший варіант – радіус кривини поверхонь штампів більший від радіуса диска. У цьому випадку буде одна ділянка контакту із невідомими межами в околі серединної точки штампа. Другий варіант – радіус кривини поверхонь штампів менший від радіуса диска. У цьому випадку буде дві ділянки контакту із невідомими внутрішніми межами, які поширюватимуться від зовнішніх кутових точок штампів назустріч одна одній. Оскільки при взаємодії тіл має місце передача обертового моменту за рахунок сил тертя, то у обох випадках ділянки контакту будуть несиметричними відносно осей симетрії штампів.

Побудова визначальної системи рівнянь математичної моделі задачі.

Розглянемо спочатку випадок $r > R$. Якщо зусилля P_0 не забезпечує повного контактування поверхонь, то можна говорити про контактну задачу для штампів без кутових точок [1, 2].

Система прямокутних і полярних координат вводиться так, щоб її початок O_1 співпадав із центром диска, а вісь Ox співпадала з віссю симетрії одного із штампів (Рис. 2). Несиметрична зона контакту окремого штампа характеризується дуговими координатами β_1 , β_2 . Повна зона контакту може бути визначена наступним чином

$$L \equiv [\beta_1; \beta_2] \cup \left[\frac{2\pi}{N} + \beta_1; \frac{2\pi}{N} + \beta_2 \right] \cup \dots \cup \left[\frac{2\pi(N-1)}{N} + \beta_1; \frac{2\pi(N-1)}{N} + \beta_2 \right].$$

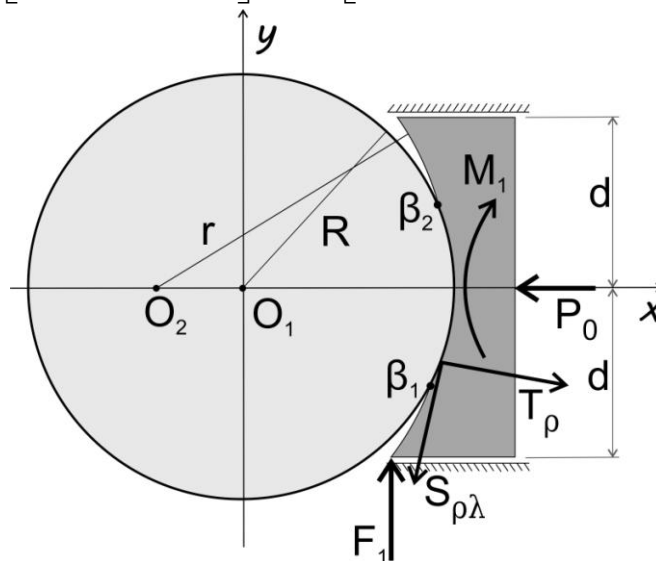


Рис. 2. Розрахункова схема для окремого штампа

Передача обертового моменту від системи напрямних до штампа фактично реалізується силою реакції F_1 в точці однієї із напрямних, що контактує із кутовою точкою штампа після його зміщення як жорсткого цілого, та моментом M_1 деякої пари сил. Сила F_1 та момент M_1 є невідомими і підлягають встановленню.

Умови дотику взаємодіючих тіл обираються у вигляді рівності нормальних зміщень спільних точок контактуючих поверхонь. При цьому вважається, що контурні точки диска, які не контактують зі штампами, залишаються нерухомими. Враховуючи геометрію зони контакту, а також наявність на цій ділянці сил тертя, заданих законом Кулона, граничні умови задачі можна записати у вигляді [3]

$$u(\lambda) + tg \lambda \cdot v(\lambda) = U_0 - D_1(\lambda), \quad \lambda \in L; \quad (1)$$

$$S_{\rho\lambda}(\lambda) = f \cdot T_\rho(\lambda), \quad \lambda \in L; \quad (2)$$

$$D_1(\lambda) = \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \lambda} - R \cos \lambda + R - r, \quad \lambda \in L.$$

Тут $u(\lambda)$, $v(\lambda)$ – проекції вектора зміщення контурних точок на координатні осі; f – коефіцієнт тертя ковзання; U_0 – величина зміщення штампа як жорсткого цілого; $D_1(\lambda)$ – величина вільного зміщення точки штампа до моменту контактування з точкою λ контуру диска.

Компоненти вектора зміщення контурних точок диска при заданому навантаженні визначаються за формулами [3]

$$u(\lambda) + i \cdot v(\lambda) = \frac{1}{2Eh} \left[(1-\nu)(f_1(\lambda) + i \cdot f_2(\lambda)) + \frac{i}{\pi} \int_{\gamma} (f_1(\lambda) + i \cdot f_2(\lambda)) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt - \frac{e^{i\lambda}}{\pi} \int_{\gamma} T_{\rho}(t) dt + \frac{2i \cdot e^{i\lambda} M_0}{\pi} + C_1 + i \cdot C_2 \right], \quad (3)$$

де $f_1(\lambda) + i \cdot f_2(\lambda) = i \int_{\beta_1}^{\lambda} (T_{\rho}(t) + i \cdot S_{\rho\lambda}(t)) e^{it} dt$; E , ν – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу диска; C_1 , C_2 – дійсні сталі.

Враховуючи умови періодичності задачі та властивості функцій $f_1'(\lambda)$, $f_2'(\lambda)$ [4]

$$u\left(\lambda + \frac{2\pi k}{N}\right) + i \cdot v\left(\lambda + \frac{2\pi k}{N}\right) = (u(\lambda) + i \cdot v(\lambda)) e^{\frac{i2\pi k}{N}}, \quad \lambda \in [\beta_1; \beta_2], \quad k = \overline{1, N-1};$$

$$f_1'\left(\lambda + \frac{2\pi k}{N}\right) + i \cdot f_2'\left(\lambda + \frac{2\pi k}{N}\right) = (f_1'(\lambda) + i \cdot f_2'(\lambda)) e^{\frac{i2\pi k}{N}}, \quad \lambda \in [\beta_1; \beta_2], \quad k = \overline{1, N-1},$$

співвідношення (3) можна записати у вигляді

$$u(\lambda) = \left[\frac{N \cos \lambda}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} (f_1'(t) \sin t - f_2'(t) \cos t) dt + (1-\nu) \int_{\beta_1}^{\lambda} f_1'(t) dt - \frac{2}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \left(f_1'(t) \sin \frac{2\pi k}{N} + f_2'(t) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda-t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| dt - \frac{2M_0}{\pi} \sin \lambda + C_1 \right] \frac{1}{2Eh};$$

$$v(\lambda) = \left[\frac{N \sin \lambda}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} (f_1'(t) \sin t - f_2'(t) \cos t) dt + (1-\nu) \int_{\beta_1}^{\lambda} f_2'(t) dt + \frac{2}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda-t}{2} \right| dt - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \left(f_2'(t) \sin \frac{2\pi k}{N} - f_1'(t) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda-t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| dt + \frac{2M_0}{\pi} \cos \lambda + C_2 \right] \frac{1}{2Eh}, \quad (4)$$

де $C_1 = -\frac{(1-\nu)}{2} \left(f_1(\beta_2) - f_2(\beta_2) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right)$; $C_2 = -\frac{(1-\nu)}{2} \left(f_2(\beta_2) + f_1(\beta_2) \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right)$.

Підстановка (4) в граничні умови (1), (2) призводить до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій $f_1'(\lambda)$ і $f_2'(\lambda)$. Крім цієї системи повинні виконуватися умови граничної рівноваги кожного штампа

$$f_2(\beta_2) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} f_2'(t) dt = -P_0; \quad f_1(\beta_2) = \int_{\beta_1}^{\beta_2} f_1'(t) dt = -F_1;$$

$$\frac{F_1 \sqrt{r^2 - d^2} - M_1}{r} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} S_{\rho\lambda}(t) dt = -\frac{M_0}{NR}, \quad (5)$$

які служать для визначення невідомих величин U_0 , F_1 , M_1 .

Зведення отриманої системи інтегральних рівнянь до стандартного проміжку інтегрування $[-1; 1]$ реалізовано заміною змінних

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2} &= \frac{b_2 - b_1}{2} x + \frac{b_2 + b_1}{2}; \quad \operatorname{tg} \frac{t}{2} = \frac{b_2 - b_1}{2} s + \frac{b_2 + b_1}{2}; \\ b_1 &= \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_1}{2} \right); \quad b_2 = \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_2}{2} \right), \quad \lambda, t \in [\beta_1; \beta_2], \quad x, s \in [-1; 1], \end{aligned} \quad (6)$$

яка призводить до нових невідомих функцій $\Phi_1(x)$ і $\Phi_2(x)$, пов'язаних із функціями $f_1'(\lambda)$ і $f_2'(\lambda)$ співвідношеннями

$$\Phi_j(x) = f_j'(\lambda) \frac{4(b_2 - b_1)}{4 + ((b_2 - b_1)x + b_2 + b_1)^2}, \quad (j = 1, 2). \quad (7)$$

В результаті побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій $\Phi_1(x)$ і $\Phi_2(x)$

$$\begin{aligned} &\frac{N}{\pi} \int_{-1}^1 (\Phi_1(s) \sin t - \Phi_2(s) \cos t) ds + \\ &+ \cos \lambda \left[(1 - \nu) \int_{-1}^x \Phi_1(s) ds - \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \Phi_2(s) \ln \left| (x - s) \frac{(b_2 - b_1)}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \cos \frac{t}{2} \right| ds - \right. \\ &\left. - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\Phi_1(s) \sin \frac{2\pi k}{N} + \Phi_2(s) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda - t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| ds \right] + \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &+ \sin \lambda \left[(1 - \nu) \int_{-1}^x \Phi_2(s) ds + \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \Phi_1(s) \ln \left| (x - s) \frac{(b_2 - b_1)}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \cos \frac{t}{2} \right| ds - \right. \\ &\left. - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\Phi_2(s) \sin \frac{2\pi k}{N} - \Phi_1(s) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda - t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| ds \right] = \\ &= (U_0 - D_1(\lambda)) 2Eh \cos \lambda - C_1 \cos \lambda - C_2 \sin \lambda, \quad \lambda \in [\beta_1; \beta_2], \quad x \in [-1; 1]; \\ &(1 - f \cdot \operatorname{tg} \lambda) \Phi_1(x) + (\operatorname{tg} \lambda + f) \Phi_2(x) = 0, \quad \lambda \in [\beta_1; \beta_2], \quad x \in [-1; 1]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\int_{-1}^1 \Phi_2(s) ds = -P_0; \quad \int_{-1}^1 \Phi_1(s) ds = -F_1; \quad \frac{F_1 \sqrt{r^2 - d^2} - M_1}{r} = \int_{\beta_1}^{\beta_2} S_{\rho\alpha}(t) dt = -\frac{M_0}{NR}, \quad (10)$$

де

$$C_1 = \frac{(1 - \nu)}{2} \cdot \left(F_1 - P_0 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right); \quad C_2 = \frac{(1 - \nu)}{2} \cdot \left(P_0 + F_1 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right).$$

Якщо розв'язок задачі (8), (9), (10) стане відомий, то компоненти напруженого стану на контурі γ визначаються за формулами [4]

$$\begin{aligned} T_\rho(\lambda) &= \Phi_2(x) \cdot \frac{4 - ((b_2 - b_1)x + b_2 + b_1)^2}{4(b_2 - b_1)} - \Phi_1(x) \cdot \frac{(b_2 - b_1)x + b_2 + b_1}{b_2 - b_1}; \\ S_{\rho\alpha}(\lambda) &= f \cdot T_\rho(\lambda), \quad \lambda \in [\beta_1; \beta_2], \quad x \in [-1; 1]; \\ T_\lambda(\lambda) &= T_\rho(\lambda) - \frac{N \cdot f}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} T_\rho(t) \operatorname{ctg} \left(\frac{N(\lambda - t)}{2} \right) dt, \quad \lambda \in [0; 2\pi]. \end{aligned} \quad (11)$$

Розглянемо тепер випадок $r < R$. Якщо зусилля P_0 забезпечує повне контактування поверхонь, то можна говорити про контактну задачу для однозв'язних симетричних штампів з кутовими точками [3, 4].

Система прямокутних і полярних координат вводиться аналогічно попередньому випадку (Рис. 3). Внутрішні межі несиметричних зон контакту характеризуються дуговими координатами β_1, β_2 . Тоді повна зона контакту може бути визначена наступним чином

$$L \equiv [-\alpha_0; \beta_1] \cup [\beta_2; \alpha_0] \cup \left[\frac{2\pi}{N} - \alpha_0; \frac{2\pi}{N} + \beta_1 \right] \cup \left[\frac{2\pi}{N} + \beta_2; \frac{2\pi}{N} + \alpha_0 \right] \cup \dots \cup \left[\frac{2\pi(N-1)}{N} - \alpha_0; \frac{2\pi(N-1)}{N} + \beta_1 \right] \cup \left[\frac{2\pi(N-1)}{N} + \beta_2; \frac{2\pi(N-1)}{N} + \alpha_0 \right].$$

Тут $\alpha_0 = \arcsin(d/R)$ – величина полярного кута точки диска, що співпадає із кутовою точкою штампа.

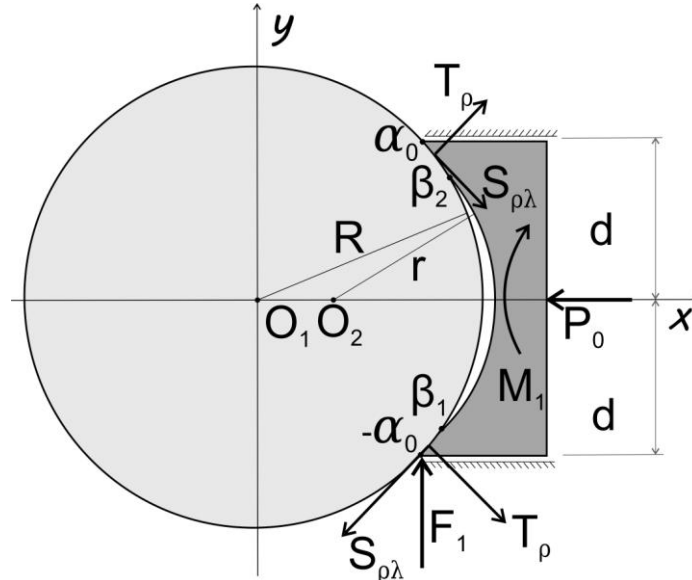


Рис. 3. Розрахункова схема для окремого штампа

Передача обертального моменту від системи напрямних до штампа реалізується силою реакції F_1 в крайній точці однієї із напрямних, що відповідає зовнішній межі зони контакту $-\alpha_0$, та моментом M_1 деякої пари сил.

Як і в попередньому випадку, умови дотику взаємодіючих тіл обираються у вигляді рівності нормальних зміщень спільних точок контактуючих поверхонь. В силу припущення про нерухомість точок контуру γ , що не контактують зі штампами, гранична умова (1) матиме вигляд

$$u(\lambda) + tg \lambda \cdot v(\lambda) = U_0 - D_2(\lambda), \quad \lambda \in L; \tag{12}$$

$$D_2(\lambda) = \sqrt{r^2 - R^2 \sin^2 \lambda} - R \cos \lambda + \sqrt{R^2 - d^2} - \sqrt{r^2 - d^2}, \quad \lambda \in L.$$

Тут величина $D_2(\lambda)$ має той самий зміст, що і $D_1(\lambda)$ у граничній умові (1).

Вирази для компонент вектора зміщення контурних точок диска із врахуванням характеру зони контакту матимуть таку саму структуру, як і співвідношення (4). Підстановка їх у граничні умови (12) із врахуванням (2) призводить до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій $f_1'(\lambda)$ і $f_2'(\lambda)$. Крім цієї системи повинні виконуватися умови граничної рівноваги кожного штампа

$$f_2(\alpha_0) = \int_{-\alpha_0}^{\beta_1} f_2'(t) dt + \int_{\beta_2}^{\alpha_0} f_2'(t) dt = -P_0; \quad f_1(\alpha_0) = \int_{-\alpha_0}^{\beta_1} f_1'(t) dt + \int_{\beta_2}^{\alpha_0} f_1'(t) dt = -F_1; \tag{13}$$

$$\frac{F_1 \sqrt{r^2 - d^2} - M_1}{r} = \int_{-\alpha_0}^{\beta_1} S_{\rho\lambda}(t) dt + \int_{\beta_2}^{\alpha_0} S_{\rho\lambda}(t) dt = -\frac{M_0}{NR},$$

які служать для визначення невідомих величин U_0 , F_1 , M_1 .

Зведення отриманої системи інтегральних рівнянь до стандартного проміжку інтегрування $[-1; 1]$ реалізовано заміною змінних

$$tg \frac{\lambda}{2} = \frac{b_1 + a_0}{2} x + \frac{b_1 - a_0}{2}; \quad tg \frac{t}{2} = \frac{b_1 + a_0}{2} s + \frac{b_1 - a_0}{2};$$

$$\operatorname{tg} \frac{\tilde{\lambda}}{2} = \frac{a_0 - b_2}{2} \tilde{x} + \frac{a_0 + b_2}{2}; \quad \operatorname{tg} \frac{\tilde{t}}{2} = \frac{a_0 - b_2}{2} \tilde{s} + \frac{a_0 + b_2}{2}; \quad (14)$$

$$a_0 = \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_0}{2} \right); \quad b_1 = \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_1}{2} \right); \quad b_2 = \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_2}{2} \right),$$

$$\lambda, t \in [-\alpha_0; \beta_1], \quad \tilde{\lambda}, \tilde{t} \in [\beta_2; \alpha_0], \quad x, s, \tilde{x}, \tilde{s} \in [-1; 1],$$

яка призводить до нових невідомих функцій $\Phi_1(x)$, $\Phi_2(x)$, $\tilde{\Phi}_1(\tilde{x})$, $\tilde{\Phi}_2(\tilde{x})$. Ці функції визначені на різних частинах ділянки контакту і пов'язані із $f_1'(\lambda)$ та $f_2'(\lambda)$ співвідношеннями

$$\begin{aligned} \Phi_j(x) &= f_j'(\lambda) \frac{4(b_1 + a_0)}{4 + ((b_1 + a_0)x + b_1 - a_0)^2}, \quad (j=1,2), \quad \lambda \in [-\alpha_0; \beta_1], \quad x \in [-1; 1]; \\ \tilde{\Phi}_j(\tilde{x}) &= f_j'(\tilde{\lambda}) \frac{4(a_0 - b_2)}{4 + ((a_0 - b_2)\tilde{x} + a_0 + b_2)^2}, \quad (j=1,2), \quad \tilde{\lambda} \in [\beta_2; \alpha_0], \quad \tilde{x} \in [-1; 1]. \end{aligned} \quad (15)$$

У результаті побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій $\Phi_1(x)$, $\Phi_2(x)$, $\tilde{\Phi}_1(\tilde{x})$, $\tilde{\Phi}_2(\tilde{x})$

$$\begin{aligned} & \frac{N}{\pi} \int_{-1}^1 (\Phi_1(s) \sin t - \Phi_2(s) \cos t) ds + \frac{N}{\pi} \int_{-1}^1 (\tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \sin \tilde{t} - \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \cos \tilde{t}) d\tilde{s} + \\ & + \cos \lambda \left[(1 - \nu) \int_{-1}^x \Phi_1(s) ds - \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \Phi_2(s) \ln \left| (x-s) \frac{(b_1 + a_0)}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \cos \frac{t}{2} \right| ds - \right. \\ & - \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \ln \left| \left(\frac{b_1 + a_0}{2} x + \frac{b_1 - a_0}{2} - \frac{a_0 - b_2}{2} \tilde{s} - \frac{a_0 + b_2}{2} \right) \cos \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{s} - \\ & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\Phi_1(s) \sin \frac{2\pi k}{N} + \Phi_2(s) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda - t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| ds - \\ & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \sin \frac{2\pi k}{N} + \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda - \tilde{t}}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| d\tilde{s} \left. \right] + \\ & + \sin \lambda \left[(1 - \nu) \int_{-1}^x \Phi_2(s) ds + \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \Phi_1(s) \ln \left| (x-s) \frac{(b_1 + a_0)}{2} \cos \frac{\lambda}{2} \cos \frac{t}{2} \right| ds + \right. \\ & + \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \ln \left| \left(\frac{b_1 + a_0}{2} x + \frac{b_1 - a_0}{2} - \frac{a_0 - b_2}{2} \tilde{s} - \frac{a_0 + b_2}{2} \right) \cos \frac{\lambda}{2} \cos \frac{\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{s} - \\ & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\Phi_2(s) \sin \frac{2\pi k}{N} - \Phi_1(s) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda - t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| ds - \\ & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \sin \frac{2\pi k}{N} - \tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\lambda - \tilde{t}}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| d\tilde{s} \left. \right] = \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & = (U_0 - D_2(\lambda)) 2Eh \cos \lambda - C_1 \cos \lambda - C_2 \sin \lambda, \quad \lambda \in [-\alpha_0; \beta_1], \quad x \in [-1; 1]; \\ & (1 - f \cdot \operatorname{tg} \lambda) \Phi_1(x) + (\operatorname{tg} \lambda + f) \Phi_2(x) = 0, \quad \lambda \in [-\alpha_0; \beta_1], \quad x \in [-1; 1]; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{N}{\pi} \int_{-1}^1 (\Phi_1(s) \sin t - \Phi_2(s) \cos t) ds + \frac{N}{\pi} \int_{-1}^1 (\tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \sin \tilde{t} - \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \cos \tilde{t}) d\tilde{s} + \\
 & + \left[(1-\nu) \left(\int_{-1}^1 \Phi_1(s) ds + \int_{-1}^{\tilde{x}} \tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) d\tilde{s} \right) - \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \ln \left| (\tilde{x} - \tilde{s}) \frac{(a_0 - b_2)}{2} \cos \frac{\tilde{\lambda}}{2} \cos \frac{\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{s} - \right. \\
 & - \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \Phi_2(s) \ln \left| \left(\frac{a_0 - b_2}{2} \tilde{x} + \frac{a_0 + b_2}{2} - \frac{b_1 + a_0}{2} s - \frac{b_1 - a_0}{2} \right) \cos \frac{\tilde{\lambda}}{2} \cos \frac{t}{2} \right| ds - \\
 & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\Phi_1(s) \sin \frac{2\pi k}{N} + \Phi_2(s) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\tilde{\lambda} - t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| ds - \\
 & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \sin \frac{2\pi k}{N} + \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\tilde{\lambda} - \tilde{t}}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| d\tilde{s} \left. \right] \cos \tilde{\lambda} + \\
 & + \left[(1-\nu) \left(\int_{-1}^1 \Phi_2(s) ds + \int_{-1}^{\tilde{x}} \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) d\tilde{s} \right) + \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \ln \left| (\tilde{x} - \tilde{s}) \frac{(a_0 - b_2)}{2} \cos \frac{\tilde{\lambda}}{2} \cos \frac{\tilde{t}}{2} \right| d\tilde{s} + \right. \\
 & + \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \Phi_1(s) \ln \left| \left(\frac{a_0 - b_2}{2} \tilde{x} + \frac{a_0 + b_2}{2} - \frac{b_1 + a_0}{2} s - \frac{b_1 - a_0}{2} \right) \cos \frac{\tilde{\lambda}}{2} \cos \frac{t}{2} \right| ds - \\
 & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\Phi_2(s) \sin \frac{2\pi k}{N} - \Phi_1(s) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\tilde{\lambda} - t}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| ds - \\
 & - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{-1}^1 \left(\tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) \sin \frac{2\pi k}{N} - \tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) \cos \frac{2\pi k}{N} \right) \ln \left| \sin \left(\frac{\tilde{\lambda} - \tilde{t}}{2} - \frac{k\pi}{N} \right) \right| d\tilde{s} \left. \right] \sin \tilde{\lambda} =
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 & = (U_0 - D_2(\tilde{\lambda})) 2Eh \cos \tilde{\lambda} - C_1 \cos \tilde{\lambda} - C_2 \sin \tilde{\lambda}, \quad \tilde{\lambda} \in [\beta_2; \alpha_0], \quad \tilde{x} \in [-1; 1]; \\
 & (1 - f \cdot \operatorname{tg} \tilde{\lambda}) \tilde{\Phi}_1(\tilde{x}) + (\operatorname{tg} \tilde{\lambda} + f) \tilde{\Phi}_2(\tilde{x}) = 0, \quad \tilde{\lambda} \in [\beta_2; \alpha_0], \quad \tilde{x} \in [-1; 1];
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 & \int_{-1}^1 \Phi_2(s) ds + \int_{-1}^1 \tilde{\Phi}_2(\tilde{s}) d\tilde{s} = -P_0; \quad \int_{-1}^1 \Phi_1(s) ds + \int_{-1}^1 \tilde{\Phi}_1(\tilde{s}) d\tilde{s} = -F_1; \\
 & \frac{F_1 \sqrt{r^2 - d^2} - M_1}{r} = \int_{-\alpha_0}^{\beta_1} S_{\rho\lambda}(t) dt + \int_{\beta_2}^{\alpha_0} S_{\rho\lambda}(t) dt = -\frac{M_0}{NR},
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

де

$$C_1 = \frac{(1-\nu)}{2} \cdot \left(F_1 - P_0 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right), \quad C_2 = \frac{(1-\nu)}{2} \cdot \left(P_0 + F_1 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right).$$

Компоненти напруженого стану на контурі γ через функції $\Phi_1(x)$, $\Phi_2(x)$, $\tilde{\Phi}_1(\tilde{x})$, $\tilde{\Phi}_2(\tilde{x})$ визначаються за формулами

$$\begin{aligned}
 T_\rho(\lambda) &= \Phi_2(x) \cdot \frac{4 - ((b_1 + a_0)x + b_1 - a_0)^2}{4(b_1 + a_0)} - \Phi_1(x) \cdot \frac{(b_1 + a_0)x + b_1 - a_0}{b_1 + a_0}, \quad \lambda \in [-\alpha_0; \beta_1]; \\
 T_\rho(\tilde{\lambda}) &= \tilde{\Phi}_2(\tilde{x}) \cdot \frac{4 - ((a_0 - b_2)\tilde{x} + a_0 + b_2)^2}{4(a_0 - b_2)} - \tilde{\Phi}_1(\tilde{x}) \cdot \frac{(a_0 - b_2)\tilde{x} + a_0 + b_2}{a_0 - b_2}, \quad \tilde{\lambda} \in [\beta_2; \alpha_0]; \\
 S_{\rho\lambda}(\lambda) &= f \cdot T_\rho(\lambda), \quad \lambda \in [-\alpha_0; \beta_1] \cup [\beta_2; \alpha_0]; \\
 T_\lambda(\lambda) &= T_\rho(\lambda) - \frac{N \cdot f}{\pi} \left(\int_{-\alpha_0}^{\beta_1} T_\rho(t) \operatorname{ctg} \left(\frac{N(\lambda - t)}{2} \right) dt + \int_{\beta_2}^{\alpha_0} T_\rho(t) \operatorname{ctg} \left(\frac{N(\lambda - t)}{2} \right) dt \right), \quad \lambda \in [0; 2\pi].
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Висновки та перспективи подальших досліджень:

- запропонована модель дозволяє розв'язувати практичні задачі по оптимізації технічних систем, які передбачають фрикційну передачу обертального моменту від системи жорстких штампів до пружних тіл із круговими циліндричними поверхнями;
- уточнення граничних умов дотику взаємодіючих тіл враховує можливу різницю кривин контактуючих поверхонь та особливості передачі обертального моменту;
- побудована система сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами може бути розв'язана числово-аналітичними методами, зокрема комбінованим методом механічних квадратур та граничної колокації;
- числова реалізація системи рівнянь дозволяє встановити: положення і розміри ділянок контакту; компоненти напруженого стану на контурі пружного тіла; граничне значення обертального моменту, що передається силами тертя без проковзування при заданій величині притискного зусилля; величину поступального зміщення штампів.

Список використаних джерел:

1. Панасюк В.В. Деякі контактні задачі теорії пружності / В.В. Панасюк, М.Й. Теплий. – Київ: Наук. думка, 1975. – 195 с.
2. Теплый М.И. Контактные задачи для областей с круговыми границами / М.И. Теплый. – Львов: Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1983. – 176 с.
3. Сяський В.А. Вплив тертя на розподіл напружень при контакті гладких циліндричних тіл і штампів з кутовими точками / Сяський В.А. // Волинський математичний вісник. – 1999. – Вип. 6. – С. 127-134.
4. Сяський В.А. Контактна взаємодія пружного круглого диска із системою жорстких штампів з кутовими точками при наявності сил тертя / Сяський Володимир Андрійович // «Наука, освіта, суспільство очима молодих» : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції студентів та молодих науковців : Ч. 2. – Рівне: РВВ РДГУ. – 2012. – С. 31-33.

Рецензенти:

Кундрат Микола Михайлович, професор кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки НУВГП, докт. тех. наук, професор;

Бомба Андрій Ярославович, завідувач кафедри інформатики та прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету, докт. тех. наук, професор.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2016.

УДК 624.041

В.М. Фомін, М.Г. Сур'янінов*Одеська державна академія будівництва та архітектури***ПЛОСКИЙ ЗГИН ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ З УРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНОЇ Й
ГЕОМЕТРИЧНОЇ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ І ПЛАСТИЧНОСТІ БЕТОНУ ПРИ СКЛАДНОМУ
НАВАНТАЖЕННІ**

Досліджений плоский згин залізобетонних балок з урахуванням фізичної й геометричної нелінійності й пластичності бетону при складному навантаженні з використанням відповідного диференціального рівняння. Пропонується алгоритм визначення коефіцієнтів цього рівняння. Визначена залежність збільшень головного вектора й головного моменту внутрішніх сил у поперечному перерізі балки, викликаних збільшенням зовнішнього навантаження, від збільшень кута повороту поперечного перерізу, і їх похідних по дуговій координаті із застосуванням асоційованого закону пластичного плину бетону. Визначені прогини балки шляхом розв'язання побудованого диференціального рівняння.

Ключові слова: залізобетонна балка, плоский згин, фізична й геометрична нелінійності, пластичність бетону, складне навантаження, асоційований закон плину.

В.М. Фомин, Н.Г. Сурьянинов**ПЛОСКИЙ ИЗГИБ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ И
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И ПЛАСТИЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ
СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Исследован плоский изгиб железобетонных балок с учетом физической и геометрической нелинейности и пластичности бетона при сложном нагружении с использованием соответствующего дифференциального уравнения. Предлагается алгоритм определения коэффициентов этого уравнения. Определена зависимость приращений главного вектора и главного момента внутренних сил в поперечном сечении балки, вызванных приращением внешней нагрузки, от приращений угла поворота поперечного сечения, и их производных по дуговой координате с применением ассоциированного закона пластического течения бетона. Определены прогибы балки путем решения построенного дифференциального уравнения.

Ключевые слова: железобетонная балка, плоский изгиб, физическая и геометрическая нелинейности, пластичность бетона, сложное нагружение, ассоциированный закон течения.

V.M. Fomin, N. Suryaninov**FLAT BEND OF THE FERROCONCRETE BEAM TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL
AND GEOMETRICAL NOT LINEARITIES AND PLASTICITY OF CONCRETE AT
DIFFICULT LOADING**

The flat bend of ferroconcrete beams taking into account physical and geometrical nonlinearity and plasticity of concrete at difficult loading with use of the corresponding differential equation is investigated. The algorithm of determination of coefficients of this equation is offered. Dependence of increments of the main vector and the main moment of the internal forces in the cross section of a beam caused by an increment of external loading, on increments of an angle of rotation of cross section, and their derivatives is determined by arc coordinate with application of the associated law of the plastic current of concrete. Beam deflections are determined by a solution of the constructed differential equation.

The algorithm allowing to define deflections of ferroconcrete beams at a step-by-step method of the solution of problems of a flat bend at difficult and intensive loading is offered.

Keywords: ferroconcrete beam, flat bend, physical and geometrical nonlinearity, plasticity of concrete, difficult loading, the associated law of the current.

Постановка проблеми. Исследование поведения железобетонных конструкций с учетом нелинейной работы и пластических свойств материалов на динамические (в частности, сейсмические) воздействия является сложной задачей. Во многих странах на основе метода конечных элементов разработаны программные комплексы по нелинейному динамическому расчету конструкций. В ряде работ отечественных ученых [2,3,6–8] рассмотрены статические и динамические задачи для массивных железобетонных сооружений с учетом нелинейно упругих и пластических свойств бетона и предложены их решения на основе метода конечных элементов.

Следует отметить, что порядок системы разрешающих уравнений метода конечных элементов достаточно высок, особенно в случаях учета нелинейных и пластических свойств материалов. Требуется разбиение элементов железобетонных рам на большое количество мелких конечных элементов, поскольку деформационные свойства бетона различны в сжатой и растянутой зонах. Кроме того, необходимо указать, находится ли данный элементарный объем в стадии нагружения или разгрузки.

Целью нашего исследования является разработка альтернативных методов нелинейного динамического расчета конструкций, в частности, метода граничных элементов, для применения которого необходимо наличие дифференциальных уравнений изгиба.

Результаты исследований.

1. Вывод дифференциального уравнения изгиба

Рассмотрим деформацию балки постоянного прямоугольного поперечного сечения, подверженной действию сил, лежащих в одной из плоскостей симметрии его поперечного сечения. В этом случае стержень будет испытывать не только поперечный изгиб, но и продольную деформацию растяжения или сжатия.

Выберем в недеформированном состоянии балки систему координат x_1, x_2, x_3 так, как показано на рис.1, причем ось x_1 направим вдоль оси балки (т.е. через центры тяжести поперечных сечений). Выберем материальную точку K балки, положение которой в недеформированном состоянии определяется тремя материальными координатами x_1, x_2, x_3 .

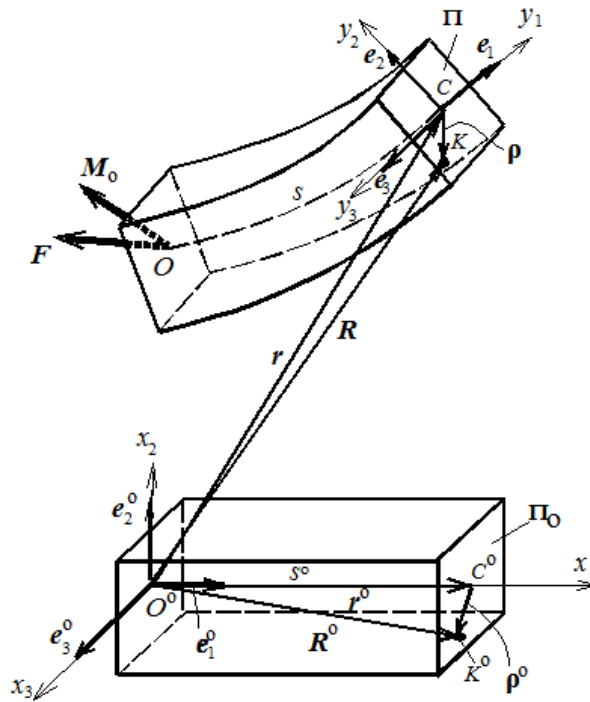


Рис. 1. - Выбор системы координат

Положение точки K определим при помощи ее радиус-вектора $\mathbf{R}(s^0, x_2, x_3)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(s^0, x_2, x_3) &= \mathbf{r}(s^0) + \boldsymbol{\rho}(s^0, x_2, x_3), \\ \boldsymbol{\rho}(s^0, x_2, x_3) &= \sum_{n=1}^3 y_n(s^0, x_2, x_3) \mathbf{e}_n. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{r}(s^0)$ — радиус-вектор точки K после деформации; $y_n(s^0, x_2, x_3)$ ($n=1,2,3$) — скалярные функции координат s^0 , x_2 и x_3 ; \mathbf{e}_1 — единичный вектор касательной к деформированной оси балки в точке K ; \mathbf{e}_2 и \mathbf{e}_3 — два взаимно перпендикулярных орта в плоскости Π , перпендикулярной вектору \mathbf{e}_1 , проведенные аналогично векторам \mathbf{e}_2^0 и \mathbf{e}_3^0 . При этом, очевидно, что $\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_3^0$.

Из (1) следует, что выполнение гипотезы плоских сечений не предполагается, т.к. первое слагаемое в правой части формулы для $\boldsymbol{\rho}(s^0, x_2, x_3)$ дает смещение точки K в направлении, перпендикулярном плоскости Π , т.е. представляет депланацию сечения.

Пренебрежем деформацией балки в направлении вектора \mathbf{e}_3^0 (т.е. будем рассматривать случай, когда размеры поперечного сечения и нагрузка позволяют принять предположение, что балка находится в состоянии, близком к плоской деформации). Тогда функции $y_n(s^0, x_2, x_3)$ ($n = 1, 2$) будут функциями только координат s^0 и x_2 , а $y_3 = x_3$. Очевидно,

$$y_1(s^0, x_2) = u_1(s^0, x_2), y_2(s, x_2) = x_2 + u_2(s^0, x_2). \quad (2)$$

u_n ($n = 1, 2$) — перемещения точки K вдоль осей y_i ($i = 1, 2$).

Построим тензор \mathbf{T} , именуемый в [10] *градиентом движения*, пользуясь диадным представлением его как двойного тензора

$$\mathbf{T} = \sum_{i=1}^3 \mathbf{R}_i \mathbf{R}_i^0. \quad (3)$$

Здесь

$$\mathbf{R}_i = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial x_i}, \quad \mathbf{R}_i^0 = \frac{\partial \mathbf{R}^0}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Разложим векторы \mathbf{R}_i и \mathbf{R}_i^0 по векторам базисов \mathbf{e}_k ($k = 1, 2, 3$) и \mathbf{e}_k^0 ($k = 1, 2, 3$) соответственно:

$$\mathbf{R}_i = \sum_{k=1}^3 R_{ik} \mathbf{e}_k, \quad \mathbf{R}_i^0 = \sum_{k=1}^3 R_{ik}^0 \mathbf{e}_k^0. \quad (5)$$

Кроме того, разложим векторы \mathbf{e}_k^0 по векторам базиса \mathbf{e}_m ($m = 1, 2, 3$)

$$\mathbf{e}_k^0 = \sum_{m=1}^3 \beta_{km} \mathbf{e}_m. \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в (3) и учитывая ортонормированность векторов \mathbf{e}_k^0 ($k = 1, 2, 3$), будем иметь

$$\mathbf{T} = \sum_{m,l=1}^3 T_{ml} \mathbf{e}_m \mathbf{e}_l, \quad T_{ml} = \sum_{i,k=1}^3 \beta_{km} R_{ik}. \quad (7)$$

Учитывая, что $\frac{d\mathbf{r}^0}{ds^0} = \mathbf{e}_1^0$, из (5) получаем

$$R_{ik}^0 = 0 \quad (i \neq k), \quad R_{ii}^0 = 1 \quad (i, k = 1, 2, 3). \quad (8)$$

Принимая во внимание, что [10]

$$\frac{d}{ds^0} = \lambda_s \frac{d}{ds} \quad (\lambda_s = \frac{ds}{ds^0}), \quad \frac{d\mathbf{e}_1}{ds} = \phi' \mathbf{e}_2, \quad \frac{d\mathbf{e}_2}{ds} = -\phi' \mathbf{e}_1 \quad (\phi' = \frac{d\phi}{ds}), \quad (9)$$

находим из (1), что

$$\mathbf{R}_1 = \lambda_s [(1 - y_2 \phi') \mathbf{e}_1 + y_1 \phi' \mathbf{e}_2], \quad \mathbf{R}_2 = y_{1,2} \mathbf{e}_1 + y_{2,2} \mathbf{e}_2, \quad \mathbf{R}_3 = \mathbf{e}_3, \quad (10)$$

где $y_{1,2} = dy_1 / dx_2$, $y_{2,2} = dy_2 / dx_2$, ϕ — угол между \mathbf{e}_1 и \mathbf{e}_1^0 .

Заметим, что λ_s называется *кратностью удлинения оси стержня* [10], и характеризует степень удлинения или сжатия оси стержня в данном сечении.

Из (10) получаем

$$R_{11} = \lambda_s (1 - y_2 \phi'), \quad R_{12} = \lambda_s y_1 \phi', \quad R_{21} = y_{1,2}, \quad R_{22} = y_{2,2}, \quad R_{33} = 1, \quad (11)$$

а остальные коэффициенты R_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$) равны нулю.

Нетрудно убедиться в том, что

$$\beta_{11} = \cos \phi, \quad \beta_{12} = -\sin \phi, \quad \beta_{21} = \sin \phi, \quad \beta_{22} = \cos \phi, \quad \beta_{33} = 1, \quad (12)$$

а остальные β_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$) равны нулю.

Подставляя (9), (11) и (12) в (7), находим

$$\begin{aligned} T_{11} &= \lambda_s [(1 - y_2 \phi') \cos \phi + y_1 \phi' \sin \phi], \quad T_{12} = y_{1,2} \cos \phi + y_{2,2} \sin \phi, \\ T_{21} &= \lambda_s [-(1 - y_2 \phi') \sin \phi + y_1 \phi' \cos \phi], \quad T_{22} = -y_{1,2} \sin \phi + y_{2,2} \cos \phi, \\ T_{33} &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

Остальные величины T_{ik} ($i, k = 1, 2, 3$) равны нулю.

Используя формулы [10]

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\mathbf{T} + \mathbf{T}^*) - \mathbf{I}, \quad \boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}(\mathbf{T} - \mathbf{T}^*) \quad (14)$$

(\mathbf{T}^* — тензор, сопряженный тензору \mathbf{T} , \mathbf{I} — единичный тензор), получаем тензоры линейных деформаций и вращения. С их помощью определяются элементы тензора конечных деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$ [10]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ii} &= e_{ii} + \frac{1}{2}[e_{ii}^2 + (e_{ik} - \omega_{ik})^2 + (e_{im} - \omega_{im})^2]; \\ \varepsilon_{ij} &= e_{ij} + \frac{1}{2}[e_{ii}(e_{ij} + \omega_{ij}) + e_{jj}(e_{ij} - \omega_{ij}) + (e_{ik} - \omega_{ik})(e_{jk} - \omega_{jk})]; \\ &(i < j, \quad k \neq i, \quad m \neq i, \quad m \neq k, \quad k \neq j). \end{aligned} \quad (15)$$

(e_{ij} — элементы тензора линейных деформаций, ω_{ij} — элементы тензора вращения).

Заметим, что $\lambda_s = \frac{ds}{ds^0} = \frac{ds - ds^0 + ds^0}{ds^0} = 1 + \varepsilon_s$. Из (13) - (15) получаем

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{2}(\lambda_s^2 - 1 - 2\lambda_s^2 y_2 \phi'), \quad \varepsilon_{22} = \frac{1}{2}(y_{1,2}^2 + y_{2,2}^2 - 1), \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2}\lambda_s y_{1,2}. \quad (16)$$

При выводе (16) предполагалось, что слагаемыми, содержащими выражения типа $(x_2 \phi')^2$ можно пренебречь, т.е. что радиус кривизны оси балки значительно больше размеров ее поперечного сечения. Учитывая, что $\varepsilon_s \ll 1$, (16) можно представить так:

$$\varepsilon_{11} = -y_2 \phi', \quad \varepsilon_{22} = \frac{1}{2}(y_{1,2}^2 + y_{2,2}^2 - 1), \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} y_{1,2}. \quad (17)$$

Остальные элементы тензора конечных деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}$ равны нулю.

В теории пластического течения [4,5,9] приращения деформаций представляются в виде суммы упругих и пластических составляющих:

$$d[\boldsymbol{\varepsilon}] = d[\boldsymbol{\varepsilon}_e] + d[\boldsymbol{\varepsilon}_p]. \quad (18)$$

Здесь $[\boldsymbol{\varepsilon}]$ — вектор деформаций, т.е. вектор с элементами

$$[\boldsymbol{\varepsilon}]_1 = \varepsilon_{1,1}, \quad [\boldsymbol{\varepsilon}]_2 = \varepsilon_{2,2}, \quad [\boldsymbol{\varepsilon}]_3 = \varepsilon_{1,2}. \quad (19)$$

В соответствии с ассоциированным законом течения приращение пластической деформации может быть представлено в следующем виде:

$$d[\boldsymbol{\varepsilon}]_p = \mathfrak{G} \frac{\partial \Phi([\boldsymbol{\sigma}], \chi)}{\partial [\boldsymbol{\sigma}]}, \quad (20)$$

где Φ — функция нагружения

$$\Phi([\boldsymbol{\sigma}], \chi) = \Phi_l([\boldsymbol{\sigma}]) + h(\chi) \quad (21)$$

($\Phi_l([\boldsymbol{\sigma}])$ — функция, определяющая предельную поверхность $\Phi_l([\boldsymbol{\sigma}]) = 0$ в пространстве напряжений, $h(\chi)$ — функция упрочнения, χ — параметр упрочнения), \mathfrak{G} — коэффициент, определяющий величину приращения пластических деформаций, $[\boldsymbol{\sigma}]$ — вектор напряжений, т.е. вектор с элементами

$$[\boldsymbol{\sigma}]_1 = \sigma_{1,1}, \quad [\boldsymbol{\sigma}]_2 = \sigma_{2,2}, \quad [\boldsymbol{\sigma}]_3 = \sigma_{1,2}. \quad (22)$$

По закону Гука

$$d[\boldsymbol{\varepsilon}]_e = \mathbf{D}_e^{-1} d[\boldsymbol{\sigma}].$$

Матрица \mathbf{D}_e для линейно упругого изотропного материала в случае плоской деформации имеет следующий вид:

$$D_e = \frac{2G_0}{1-\mu_0} \begin{bmatrix} 1 & \mu_0 & 0 \\ \mu_0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\mu_0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Здесь G_0 — начальный модуль сдвига, $\mu_0 = \nu_0 / (1 - \nu_0)$, ν_0 — начальный коэффициент Пуассона.

Подставляя (23) и (20) в (18), будем иметь

$$d[\varepsilon] = D_e^{-1} d[\sigma] + \vartheta \frac{\partial \Phi([\sigma], \chi)}{\partial [\sigma]}. \quad (24)$$

Следуя далее [4,8], получаем

$$d[\sigma] = D_{ep} d[\varepsilon], \quad (25)$$

где

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \frac{\partial \Phi}{\partial [\sigma]} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial [\sigma]} \right]^T D_e}{\left[\frac{\partial \Phi}{\partial [\sigma]} \right]^T D_e \frac{\partial \Phi}{\partial [\sigma]} - \frac{\partial \Phi}{\partial \chi} [\sigma]^T \frac{\partial \Phi}{\partial [\sigma]}}. \quad (26)$$

Будем строить функцию нагружения:

$$\Phi([\sigma], \chi) = \Phi_l([\sigma]) + h(\chi) \quad (27)$$

($\Phi_l([\sigma])$ — функция, определяющая предельную поверхность и условие прочности $\Phi_l([\sigma]) = 0$ в пространстве напряжений, $h(\chi)$ — функция упрочнения).

Используем приведенное в [1] условие прочности:

$$\Phi_l([\sigma]) = 0, \quad (28)$$

где $\Phi_l([\sigma])$ в случае плоской деформации имеет следующий вид:

$$\Phi_l([\sigma]) = (\sigma_{1,1} - \sigma_{2,2})^2 - 2(R_c - R_p)(\sigma_{1,1} - \sigma_{2,2}) + 4\sigma_{1,2}^2 - \frac{1}{3}(R_c - R_p)^2. \quad (29)$$

Представим приращение возможной работы напряжений на пластических деформациях как приращение параметра упрочнения χ :

$$\partial \chi = \sigma_0 \partial \varepsilon_{p,0} + \tau_0 \partial \gamma_{p,0}$$

($\partial \varepsilon_{p,0}$ и $\partial \gamma_{p,0}$ — приращения объемных пластических деформаций и пластических деформаций октаэдрического сдвига).

Примем в качестве функции упрочнения следующую функцию:

$$h(\chi) = -\Phi_l([\sigma(\chi)]). \quad (30)$$

Здесь $\Phi_l([\sigma])$ имеет вид (29), но при этом предполагается, что элементы вектора $[\sigma]$ являются функциями параметра упрочнения,

Учитывая, что

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \chi} = - \frac{\partial \Phi_l}{\partial \sigma_0} \frac{\partial \sigma_0}{\partial \chi} - \frac{\partial \Phi_l}{\partial \tau_0} \frac{\partial \tau_0}{\partial \chi},$$

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial \chi} = \frac{\partial \sigma_0}{\sigma_0 \partial \varepsilon_{p,0} + \tau_0 \partial \gamma_{p,0}} = \frac{K_p H_p}{\sigma_0 H_p + \tau_0 K_p}, \quad \frac{\partial \tau_0}{\partial \chi} = \frac{\partial \tau_0}{\sigma_0 \partial \varepsilon_{p,0} + \tau_0 \partial \gamma_{p,0}} = \frac{G_p}{\tau_0}$$

($K_p = \frac{\partial \sigma_0}{\partial \varepsilon_{p,0}}$ — пластический объемный модуль, $H_p = \frac{\partial \sigma_0}{\partial \gamma_{p,0}}$ — пластический модуль дилатации),

находим

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \chi} = - \frac{K_p H_p}{\sigma_0 H_p + \tau_0 K_p} \frac{\partial \Phi_l}{\partial \sigma_0} - \frac{G_p}{\tau_0} \frac{\partial \Phi_l}{\partial \tau_0}. \quad (31)$$

Следуя далее [8], приходим к следующим соотношениям:

$$G_p = \frac{G_0 G}{G_0 - G}, \quad G = \frac{G_0}{\lambda} \xi'(\eta), \quad (32)$$

$(\xi'(\eta) = \lambda(1 - B\eta^2 - 2C\eta^3)/(1 + A\eta + B\eta^2 + C\eta^3)^2$, G_0 – начальный модуль сдвига бетона, $\eta = \gamma_0 / \hat{\gamma}_0$, $\hat{\gamma}_0$ – абсцисса вершины диаграммы $\tau_0 = \tau_0(\gamma_0)$, формулы для определения параметров A, B, C, λ приведены в [8]),

$$K_p = \frac{K_0 K}{K_0 - K}, K = \frac{K_0}{\lambda} f_2(\zeta) \xi'(\eta), H_p = f_1(\eta) f_2(\zeta) \frac{R_p}{R_c \hat{\gamma}_0 (1 - \zeta)^2} \quad (33)$$

(K_0 – начальный объемный модуль упругости бетона, $\eta = \varepsilon_0 / \hat{\varepsilon}_0$, $f_1(\eta) = \hat{\sigma}_0 \xi(\eta)$, $\xi(\eta) = \lambda \eta / (1 + A\eta + B\eta^2 + C\eta^3)$, $\hat{\varepsilon}_0, \hat{\sigma}_0$ – координаты вершины диаграммы $\sigma_0 = \sigma_0(\varepsilon_0)$, $\zeta = \gamma_0 / \hat{\gamma}_0$, $f_2(\zeta) = \exp(R_p \zeta / R_c (1 - \zeta))$).

Соотношения (28)–(33) позволяют определить все элементы матрицы D_{ep} .

Введем обозначения

$$\xi_1 = \phi, \xi_2 = \phi'. \quad (34)$$

Частные производные какой-либо функции f по величинам, представленным в (34), будем обозначать так:

$$f_r^{(1)} = \frac{\partial f}{\partial \xi_r} \quad (r = 1, 2). \quad (35)$$

Тогда

$$d\beta_{i,k} = \sum_{r=1}^2 (\beta_{i,k})_r^{(1)} d\xi_r \quad (i, k = 1, 2).$$

Здесь

$$\beta_{11}^{(1)} = -\sin \phi, \beta_{12}^{(1)} = -\cos \phi, \beta_{21}^{(1)} = \cos \phi, \beta_{22}^{(1)} = -\sin \phi.$$

(остальные из коэффициентов $(\beta_{i,k})_r^{(1)}$ ($i, k = 1, 2, 3; r = 1, 2, \dots, 6$) равны нулю).

Будем разыскивать функции $u_1(s^0, x_2)$ и $u_2(s^0, x_2)$ в следующем виде:

$$u_1(s^0, x_2) = a_1(s^0)x_2 + a_2(s^0)x_2^2 + a_3(s^0)x_2^3, u_2(s^0, x_2) = a_4(s^0)x_2 + a_5(s^0)x_2^2 + a_6(s^0)x_2^3.$$

Тогда

$$y_1 = a_1 x_2 + a_2 x_2^2 + a_3 x_2^3, y_2 = x_2 + a_4 x_2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_2^3, \\ y_{1,2} = \frac{\partial y_1}{\partial x_2} = a_1 + 2a_2 x_2 + 3a_3 x_2^2, y_{2,2} = \frac{\partial y_2}{\partial x_2} = 1 + a_4 + 2a_5 x_2 + 3a_6 x_2^2,$$

Введем аналогично (35) обозначения

$$f_j^{(2)} = \frac{\partial f}{\partial a_j} \quad (j = 1, 2, \dots, 6). \quad (36)$$

Тогда

$$dy_k = \sum_{j=1}^6 (y_k)_j^{(2)} da_j, dy_{k,2} = \sum_{j=1}^6 (y_{k,2})_j^{(2)} da_j \quad (k = 1, 2).$$

где $(y_1)_j^{(2)} = x_2^j, (y_{1,2})_j^{(2)} = jx_2^{j-1}$ ($j = 1, 2, 3$); $(y_2)_j^{(2)} = x_2^{j-3}, (y_{2,2})_j^{(2)} = (j-3)x_2^{j-4}$ ($j = 4, 5, 6$) (неуказанные здесь коэффициенты $(y_k)_j^{(2)}$ и $(y_{k,2})_j^{(2)}$ ($k = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 6$) равны нулю).

Переходим теперь к определению приращений деформаций $d[\varepsilon]$. Из (17) получаем

$$d\varepsilon_{11} = -dy_2 \phi' - y_2 d\phi', d\varepsilon_{22} = y_{1,2} dy_{1,2} + y_{2,2} dy_{2,2}, d\varepsilon_{12} = 0.5 dy_{1,2},$$

что может быть записано так:

$$d\varepsilon_{11} = -\sum_{j=1}^6 \phi' (y_2)_j^{(2)} da_j - y_2 d\phi', d\varepsilon_{22} = \sum_{j=1}^6 y_{1,2} (y_{1,2})_j^{(2)} da_j + \sum_{j=1}^6 y_{2,2} (y_{2,2})_j^{(2)} da_j, d\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 (y_{1,2})_j^{(2)} da_j.$$

Отсюда с использованием обозначений (35) и (36) получаем

$$d[\varepsilon]_m = \sum_{r=1}^2 ([\varepsilon]_m)_r^{(1)} d\xi_r + \sum_{j=1}^6 ([\varepsilon]_m)_j^{(2)} da_j \quad (m = 1, 2, 3), \quad (37)$$

где

$$\begin{aligned}
 ([\varepsilon]_1)_2^{(1)} &= -y_2, ([\varepsilon]_1)_j^{(2)} = -\xi_2(y_2)_j^{(2)}, ([\varepsilon]_2)_j^{(2)} = y_{1,2}(y_{1,2})_j^{(2)} + y_{2,2}(y_{2,2})_j^{(2)}, \\
 ([\varepsilon]_3)_j^{(2)} &= \frac{1}{2}(y_{1,2})_j^{(2)} \quad (j = 1, 2, \dots, 6)
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

(остальные величины из $([\varepsilon]_m)_r^{(1)}$ ($m = 1, 2, 3; r = 1, 2$) и $([\varepsilon]_m)_j^{(2)}$ ($m = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 6$) равны нулю).

Из (37) получаем

$$\begin{aligned}
 d[\sigma]_i &= \sum_{r=1}^2 ([\sigma]_i)_r^{(1)} d\xi_r + \sum_{j=1}^6 ([\sigma]_i)_j^{(2)} da_j, ([\sigma]_i)_r^{(1)} = \sum_{k=1}^3 D_{ep,i,k} ([\varepsilon]_k)_r^{(1)}, \\
 ([\sigma]_i)_j^{(2)} &= \sum_{k=1}^3 D_{ep,i,k} ([\varepsilon]_k)_j^{(2)} \quad (i, k = 1, 2, 3; r = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 6).
 \end{aligned}$$

Представление dM и dQ в виде функций приращений угла φ и их производных.

Запишем граничные условия на гранях балки

$$d\sigma_{22} = d\sigma_{12} = 0 \text{ при } x_2 = \pm h/2$$

или в обозначениях (22)

$$d[\sigma]_2 = d[\sigma]_3 = 0 \text{ при } x_2 = \pm h/2, \tag{39}$$

(b и h — размеры поперечного сечения балки). Подставляя сюда $d[\sigma]$ с учетом (37) и (38), получаем

$$\sum_{r=1}^2 W_{i,r}^{(1)} d\xi_r + \sum_{j=1}^6 W_{i,j}^{(2)} da_j = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4), \tag{40}$$

где

$$W_{1,r}^{(1)} = ([\sigma]_2)_r^{(1)} \left(-\frac{h}{2}\right), W_{2,r}^{(1)} = ([\sigma]_2)_r^{(1)} \left(\frac{h}{2}\right), W_{3,r}^{(1)} = ([\sigma]_3)_r^{(1)} \left(-\frac{h}{2}\right), W_{4,r}^{(1)} = ([\sigma]_3)_r^{(1)} \left(\frac{h}{2}\right)$$

(аналогичные формулы справедливы и для $W_{i,j}^{(2)}$ ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 6$)).

Из равенства

$$Q = Q_{\sigma} + Q_a$$

(Q — главных вектор внутренних сил, приложенных к поперечному сечению, Q_{σ} — главный вектор внутренних сил в бетоне, Q_a — в арматуре) следует

$$dQ = dQ_{\sigma} + dQ_a.$$

Проекция dQ_{σ} и dQ_a на оси y_i ($i = 1, 2$), ортами которых являются вектора e_i ($i = 1, 2$), определяются по формулам

$$\begin{aligned}
 dQ_{\sigma,m} &= b \int_{-h/2}^{h/2} d\sigma_{1,m}(x_2) dx_2 \quad (m = 1, 2) \\
 dQ_{a,1} &= E_a \sum_{k=1}^{n_a} d\varepsilon_{1,1}(x_{2,k}) S_k, dQ_{a,2} = G_a \sum_{k=1}^{n_a} d\varepsilon_{1,2}(x_{2,k}) S_k.
 \end{aligned}$$

Здесь E_a , G_a — модуль упругости и модуль сдвига арматуры (она полагается идеально упругой), n_a — количество стержней, $x_{2,k}$ — координаты x_2 центра тяжести его сечения стержня с номером k , S_k — площадь его сечения.

Используя (37), проекции вектора dQ на оси y_i ($i = 1, 2, 3$) можно записать так:

$$dQ_i := \sum_{r=1}^2 (Q_i)_r^{(1)} d\xi_r + \sum_{j=1}^6 (Q_i)_j^{(2)} da_j \quad (i = 1, 2), \tag{41}$$

где

$$\begin{aligned}
 (Q_1)_r^{(1)} &= b \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{1,1})_r^{(1)}(x_2, x_3) dx_2 + E_a \sum_{k=1}^{n_a} \sum_{r=1}^6 (\varepsilon_{1,1})_r^{(1)}(x_{2,k}, x_{3,k}) S_k, \\
 (Q_i)_r^{(1)} &= b \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{1,i})_r^{(1)}(x_2, x_3) dx_2 + G_a \sum_{k=1}^{n_a} (\varepsilon_{1,i})_r^{(1)}(x_{2,k}, x_{3,k}) S_k \quad (i = 2, 3).
 \end{aligned}$$

Для $(Q_i)_j^{(2)}$ ($j = 1, 2, \dots, 6$) имеют место аналогичные формулы.

Из условий равновесия сегмента балки, изображенного на рис. 1, имеем

$$dQ + dF = 0,$$

а так как dF предполагается заданным в системе координат $x_1x_2x_3$, причем лежащим в плоскости x_1x_2 (т.е. $dF = \sum_{i=1}^2 dF_i^0 e_i^0$), то согласно (6) находим, что

$$dQ_m = -\sum_{k=1}^2 \beta_{m,k} dF_k \quad (m = 1, 2). \quad (42)$$

Используя (41) эти равенства можно записать так:

$$\sum_{r=1}^2 (Q_m)_r^{(1)} d\xi_r + \sum_{j=1}^6 (Q_m)_j^{(2)} da_j + \sum_{k=1}^2 \beta_{m,k} dF_k = 0 \quad (m = 1, 2). \quad (43)$$

Равенства (40) и (43) можно записать в виде единой системы уравнений

$$\sum_{j=1}^6 \Psi_{i,j} da_j = \sum_{r=1}^2 \Phi_{i,r} d\xi_r + \sum_{k=1}^2 P_{i,k} dF_k \quad (i = 1, 2, \dots, 6), \quad (44)$$

если положить $\Psi_{i,j} = W_{i,j}^{(2)}$ ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 6$), $\Psi_{i,j} = (Q_{i-4})_j^{(2)}$ ($i = 5, 6; j = 1, 2, \dots, 6$), $\Phi_{i,r} = -W_{i,r}^{(1)}$ ($i = 1, 2, 3, 4; r = 1, 2$), $\Phi_{i,r} = -(Q_{i-4})_r^{(1)}$ ($i = 5, 6; r = 1, 2$), $P_{i,k} = 0$ ($i = 1, 2, 3, 4; k = 1, 2$), $P_{i,k} = -\beta_{i-4,k}$ ($i = 5, 6; k = 1, 2$).

Обозначим решение системы (44) с правой частью, равной $[\Phi]^{(r)}$ ($[\Phi]^{(r)}$ — столбец, элементами которого являются $\Phi_{i,r}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)), через $a_i^{(r)}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$), а с правой частью $[P]^{(k)}$ — через $b_i^{(k)}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$). Очевидно, решение системы (44) имеет следующий вид:

$$da_i = \sum_{r=1}^2 a_i^{(r)} d\xi_r + \sum_{k=1}^2 b_i^{(k)} dF_k \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (45)$$

Построение дифференциального уравнения изгиба. Нетрудно убедиться в том, что для приращений момента внутренних усилий относительно оси y_3 имеют место следующее равенство:

$$dM_{вн,3} = dM_{б,3} + dM_{a,3}$$

($dM_{б,3}$ — приращение момента внутренних усилий в бетоне, $dM_{a,3}$ — в арматуре), причем

$$dM_{б,3} = -b \int_{-h/2}^{h/2} d\sigma_{1,1}(x_2) x_2 dx_2, \quad dM_{a,3} = -E_a \sum_{k=1}^{n_a} d\varepsilon_{1,1}(x_{2,k}, x_{3,k}) x_{2,k} S_k$$

(b — ширина поперечного сечения балки, E_a — модуль упругости арматуры (она полагается идеально упругой), n_a — количество стержней, $x_{2,k}$ и $x_{3,k}$ — координаты центра тяжести поперечного сечения стержня арматуры с номером k , S_k — площадь его сечения).

Приращение момента внутренних сил dM_3 можно представить так:

$$dM_3 := \sum_{r=1}^2 (M_3)_r^{(1)} d\xi_r + \sum_{j=1}^6 (M_3)_j^{(2)} da_j, \quad (46)$$

где

$$(M_3)_r^{(1)} = -b \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{1,1})_r^{(1)}(x_2) x_2 dx_2 - E_a \sum_{k=1}^{n_a} (\varepsilon_{1,1})_r^{(1)}(x_{2,k}, x_{3,k}) x_{2,k} S_k.$$

Аналогичные формулы могут быть записаны и для $(M_3)_j^{(2)}$ ($j = 1, 2, \dots, 6$).

Используя (45) находим, что

$$dM_3 = \sum_{r=1}^2 (M_3)_r^{(3)} d\xi_r + \sum_{k=1}^2 (M_3)_k^{(4)} dF_k, \quad (47)$$

где $(M_3)_r^{(3)} = (M_3)_r^{(1)} + \sum_{j=1}^6 (M_3)_j^{(2)} a_j^{(r)}$, $(M_3)_k^{(4)} = \sum_{j=1}^6 (M_3)_j^{(2)} b_j^{(k)}$.

Аналогично может быть представлено равенство (41):

$$dQ_i = \sum_{r=1}^2 (Q_i)_r^{(3)} d\xi_r + \sum_{k=1}^2 (Q_i)_k^{(4)} dF_k \quad (i = 1, 2), \quad (48)$$

в котором $(Q_i)_r^{(3)} = (Q_i)_r^{(1)} + \sum_{j=1}^6 (Q_i)_j^{(2)} a_j^{(r)}$, $(Q_i)_k^{(4)} = \sum_{j=1}^6 (Q_i)_j^{(2)} b_j^{(k)}$.

Воспользуемся соотношением [10]

$$dM'_3 = -dQ_2. \quad (49)$$

Из (47) находим

$$dM'_3 = \sum_{r=1}^2 [(M_3)_r^{(3)}]' d\xi_r + \sum_{r=1}^2 (M_3)_r^{(3)} d\xi'_r + \sum_{k=1}^2 [(M_i)_k^{(4)}]' dF_k. \quad (50)$$

Используя (48) и (50), равенство (49) можно записать так:

$$(M_3)_2^{(3)} d\xi'_2 + \{ (M_3)_1^{(3)} + [(M_3)_2^{(3)}]' + (Q_2)_2^{(3)} \} d\xi_2 + \{ [(M_3)_1^{(3)}]' + (Q_2)_1^{(3)} \} d\xi_1 + \\ + \sum_{k=1}^2 \{ [(M_i)_k^{(4)}]' + (Q_2)_k^{(4)} \} dF_k = 0,$$

т.е.

$$Xd\phi'' + Yd\phi' + Zd\phi + U = 0, \quad (51)$$

где

$$X = (M_3)_2^{(3)}, Y = (M_3)_1^{(3)} + [(M_3)_2^{(3)}]' + (Q_2)_2^{(3)},$$

$$Z = [(M_3)_1^{(3)}]' + (Q_2)_1^{(3)}, U = \sum_{k=1}^2 \{ [(M_i)_k^{(4)}]' + (Q_2)_k^{(4)} \} dF_k.$$

Равенство (51) представляет собой дифференциальное уравнение для нахождения приращений угла ϕ поворота поперечного сечения балки, вызванных приращениями силы F и момента M_0 . Из условий равновесия отрезка балки имеем

$$dM_3 + M_3(dF) + dM_0 = 0.$$

Здесь $M_3(dF)$ — момент приращения силы F относительно оси y_3 , dM_0 — приращение проекции момента M_0 на эту ось. При $s = 0$ это равенство будет выглядеть так

$$(M_3)_2^{(3)}(0)d\phi'(0) + (M_3)_1^{(3)}(0)d\phi(0) + \sum_{k=1}^2 (M_3)_k^{(4)}(0)dF_k + dM_0 = 0. \quad (52)$$

Это соотношение представляет собой одно из начальных условий для уравнения (51). Оставшееся начальное условие определяется из условия закрепления левого конца балки.

В результате решения уравнения (51) определяем $d\phi$ как функцию s . Прибавляя его к найденному значению угла ϕ на предыдущем шаге, получаем новое значение этого угла:

$$\phi(s) = \phi_{пред}(s) + d\phi(s),$$

С помощью соотношения

$$x'_{C,2}(s) = tg \phi(s) \quad (53)$$

можно определить координаты точек изогнутой оси балки.

Выводы. С целью иллюстрации проведенного решения рассмотрим квазистатический изгиб жестко защемленной железобетонной колонны прямоугольного сечения $1 \text{ м} \times 0,3 \text{ м}$ и длиной 10 м , вызванного действием силы $F_2(t) = 9 \sin \frac{2\pi}{T} t$ (κH) (t в секундах, $T = 25 \text{ с}$), параллельной оси x_2 , а также постоянной продольной сжимающей силы $F_1 = 600 \text{ кН}$. Армирование — двенадцать стержней диаметром 10 мм , материал — сталь марки А-III. Характеристики бетона: $E_0 = 2,8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $R_c = 19 \text{ МПа}$, $R_p = 1,9 \text{ МПа}$.

На рис. 3 представлен график изменения прогиба конца колонны с течением времени (прогиб в метрах, время в секундах). Заметно накопление остаточных деформаций.

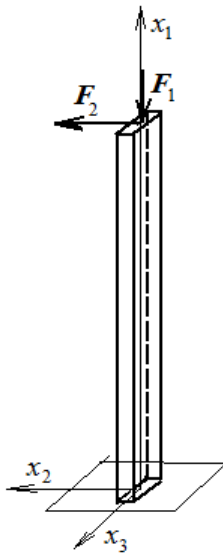
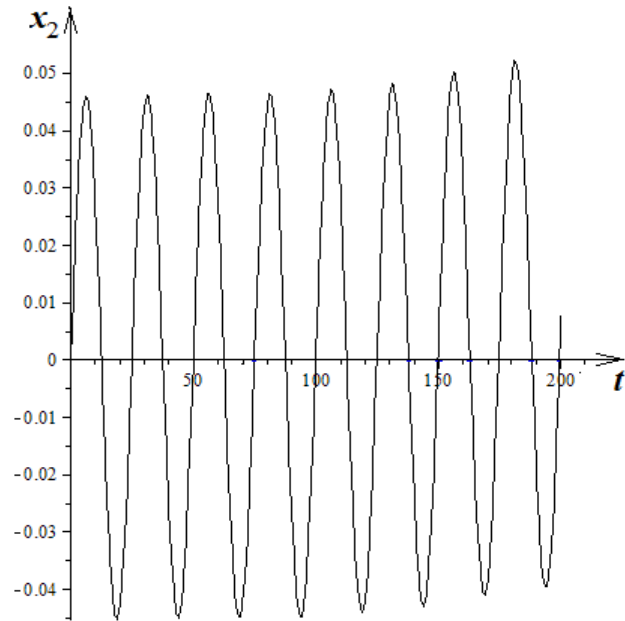


Рис. 2. - Схема колонны

Рис. 3. - График изменения координаты x_2 центра верхнего сечения колонны.

Список использованной литературы:

1. *Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А.* Теория пластичности бетона и железобетона. — М.: Стройиздат, 1974. — 316 с.
2. *Гришин А.В., Дорофеев В.С.* Нелинейная динамика конструкций, взаимодействующих с деформируемой средой. — Одесса: Астропринт, 2001. — 135 с.
3. *Гришин А.В., Федорова Е.Ю.* Нелинейные динамические задачи расчета портовых гидротехнических сооружений. — Одесса: ОНМУ, 2002. — с. 125.
4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 543 с.
5. *Ивлев Д.Д., Быковцев Г.И.* Теория упрочняющегося пластического тела. — М.: Наука, 1971. — 231 с.
6. *Клованич С.Ф.* Метод конечных элементов в нелинейной механике грунтов и бетонов // Строительные конструкции: межвед. н.-т. сб.: вып. 61: т.1. — Киев: НИИСК, 2004. — с. 123-141.
7. *Клованич С.Ф., Безушко Д.И.* Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных плит с использованием изопараметрического конечного элемента // Строительная механика и расчет сооружений. — №2. — 2008. — с. 67-71.
8. *Клованич С.Ф.* Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Библиотека журнала «Світ геотехніки», вып. 9. — Запорожье: ООО ИПО «Запорожье», 2009. — 400 с.
9. *Клюшников В.Д.* Математическая теория пластичности. — М.: Издательство МГУ, 1979. — 207 с.
10. *Черных К.Ф.* Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах. — Л.: Машиностроение, 1986. — 336 с.

Стаття надійшла до редакції 01.08.2016

УДК 620.197

Г.В. Чумало¹, Б.М. Дацко¹, В.Р. Івашків¹, Р.М. Юркевич², В.С. Лужецький³¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів,²Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів³Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, Дрогобич**ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНОЇ КОРОЗІЇ РІЗНОРОДНИХ СТАЛЕЙ У СІРКОВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Досліджено швидкість контактної корозії гальванопар, які найчастіше використовують в нафтогазовій промисловості: сталь 20 – 08X18H10T, 09Г2С – 08X18H10T та сталь 20 – 09Г2С в модельній морській воді, модельній морській воді, насиченій сірководнем та розчині NACE за різного співвідношення площі анода та катода. Показано, що у гальванопарі сталь 20 - 09Г2С немає чіткого розмежування катод – анод. Встановлено тенденцію до зростання контактної корозії зі зростанням агресивності середовища (наявність сірководню та підвищення кислотності) для всіх гальванопар, що досліджувались. Показано, що контакт нержавіючої сталі і сталі 20 чи 09Г2С у сірководневих середовищах є небезпечним, оскільки збільшує швидкість контактної корозії у модельній морській воді, насиченій сірководнем у ~ 6,7 рази, а в розчині NACE у ~ 14 разів порівняно із швидкістю корозії у модельній морській воді. Аналогічна тенденція до зростання швидкості корозії за наявності сірководню спостерігається для сталей 20 та 09Г2С.

Ключові слова: сталь, гальванопара, швидкість корозії, сірководень.

Табл. 1. Рис. 7. Літ. 2.

**Г.В. Чумало, Б.М. Дацко, В.Р. Івашків, Р.М. Юркевич, В.С. Лужецький
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ КОРРОЗИИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ
В СЕРОВОДОРОДНЫХ СРЕДАХ**

Исследована скорость контактной коррозии гальванопар, которые чаще всего используют в нефтегазовой промышленности: сталь 20 - 08X18H10T, 09Г2С - 08X18H10T и сталь 20 - 09Г2С в модельной морской воде, модельной морской воде, насыщенной сероводородом и растворе NACE при разном соотношении площадей анода и катода. Показано, что в гальванопаре сталь 20 - 09Г2С нет четкого разграничения катод - анод. Установлена тенденция к росту контактной коррозии с увеличением агрессивности среды (наличие сероводорода и повышение кислотности) для всех гальванопар, что исследовались. Показано, что контакт нержавеющей стали и стали 20 или 09Г2С в сероводородных средах опасно, поскольку увеличивает скорость контактной коррозии в модельной морской воде, насыщенной сероводородом в ~ 6,7 раза, а в растворе NACE в ~ 14 раз по сравнению со скоростью коррозии в модельной морской воде. Аналогичная тенденция к росту скорости коррозии при наличии сероводорода наблюдается для сталей 20 и 09Г2С.

Ключевые слова: сталь, гальванопара, скорость коррозии, сероводород.

**H.V. Chumalo, B.M. Datsko, V.R. Ivashkiv, R.M. Yurkevych, V.S. Luzhetskyy
INVESTIGATION OF CONTACT CORROSION OF THE DIFFERENT TYPES OF
STEELS IN HYDROGEN SULFIDE ENVIRONMENTS**

The rate of contact corrosion of different types of steels that most commonly used in the oil and gas industry: 20 steel – 08Cr18Ni10Ti steel, 09Mn2Si steel – 08Cr18Ni10Ti steel and 20 steel - 09Mn2Si steel in model sea water, model sea water, saturated of hydrogen sulfide and NACE solution at the different ratio of anode and cathode area have been studied. It is shown that in the galvanic couples steel 20 - 09Mn2Si no clear distinction cathode - anode. It was shown the tendency to increase the contact corrosion with increasing aggressiveness of the environment (the presence of hydrogen sulfide and increasing the acidity) for all galvanic couples that were investigated. It has been shown that the contact of stainless steel and 20 steel or 09Mn2S steel in hydrogen sulfide environments 09Mn2S is dangerous, since it increases the contact corrosion rate in a model sea water saturated with hydrogen sulphide in ~ 6.7 times and in NACE solution in ~ 14 times as compared to the corrosion rate in the model seawater. A similar tendency to growth the rate of corrosion in the presence of hydrogen sulfide was observed for steels 20 and 09Mn2Si.

Key words: steel, galvanic couples, corrosion rate, hydrogen sulfide

Постановка проблеми. Оскільки сучасне обладнання, конструкції виготовляють переважно з різномірних матеріалів, то часто проявляється контактна корозія [1-3], особливо в хімічній, нафтогазовій та нафтопереробній промисловості. Слід відзначити, що контактної корозії не можна позбутися навіть тоді, коли конструкція виготовляється із однорідних металів, якщо використовується болтове з'єднання, паяння, зварка, тощо.

Тому актуальним залишається вивчення корозійно-електрохімічних властивостей різномірних сталей за їх контакту в агресивних середовищах. Це дозволить усунути небезпеку контактної корозії ще на стадії проектування.

Мета роботи - встановити вплив сірководню на корозійно-електрохімічні властивості різномірних сталей за їх контакту та різного співвідношення площ зразків.

Матеріали та методи досліджень. Досліджували швидкість контактної корозії масовим методом. Використовували зразки у вигляді пластин ($20 \times 30 \times 4$ мм). Пронумерувавши та зваживши, зразки розміщували в електролітичній комірці та закріплювали в клеммах один навпроти одного (рис. 1). Для досліджень обрано гальванопари, які найчастіше зустрічаються в нафтогазовій промисловості: сталь 20 – 08X18H10T, 09Г2С – 08X18H10T та сталь 20 – 09Г2С. Гальванопари розміщували в окремих комірках. Окрім цього досліджували швидкості корозії сталей 20 та 09Г2С. Співвідношення площ різномірних зразків ($S_1:S_2$): 1:1; 1:2 та 2:1. Дослідження проведено у модельній морській воді (ММВ), ММВ, насиченій сірководнем, та розчині NACE (5%-ий водний розчин NaCl + 0,5%-ий CH_3COOH , насичення H_2S , pH 3...4, $22 \pm 3^\circ \text{C}$).

З'єднавши попарно пластини, відзначали початок досліду. Через 360 годин всі зразки виймали, промивали проточною водою, висушували та видаляли продукти корозії. Зразки зі сталі 20 та 09Г2С (аноди) зважували та розраховували швидкість корозії. Електрохімічні дослідження виконано за допомогою потенціостата П-5827М.

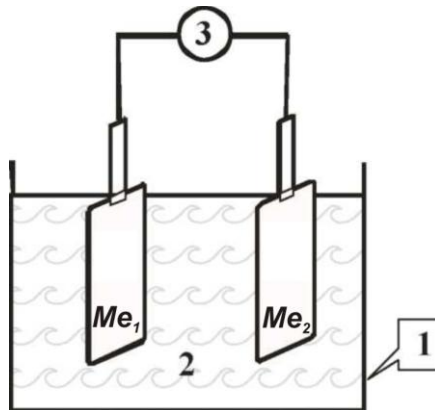


Рис. 1. – Схема моделі корозійного гальванічного елемента:
1 - склянка; 2 – розчин; 3 – мікроамперметр.

Результати досліджень та їх обговорення.

Встановлено, що швидкість корозії сталей 20 та 09Г2С зростає з підвищенням агресивності середовища (рис. 2). Електрохімічні дослідження (табл.) показали, що потенціал корозії сталі 09Г2С у ММВ є дещо від'ємніший ніж сталі 20, отже у даному середовищі сталь 09Г2С може бути анодом. У ММВ, насиченій сірководнем, та розчині NACE потенціали корозії обох сталей практично однакові. Візуально встановлено, що на обох зразках (сталь 09Г2С та сталь 20) за їх контакту відбувається пухиріння від наводнювання та утворюються продукти корозії в усіх досліджуваних середовищах, тобто в досліджених сталях не проходить чіткого розмежування катодних та анодних процесів.

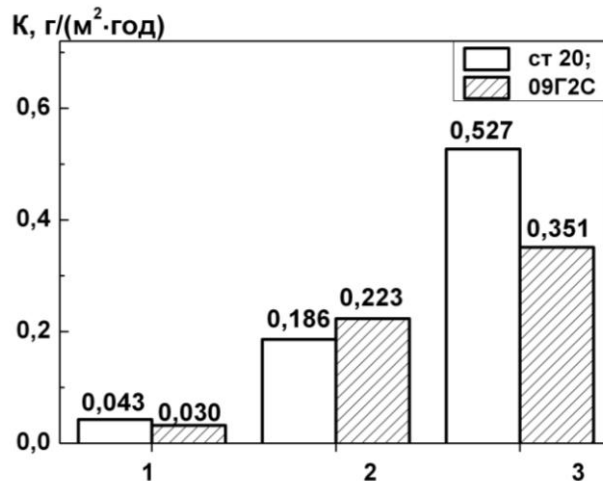


Рис.2. – Швидкість корозії сталей 20 та 09Г2С за відсутності контакту:
1 – ММВ; 2 – ММВ, насичена H_2S ; 3 – розчин NACE.

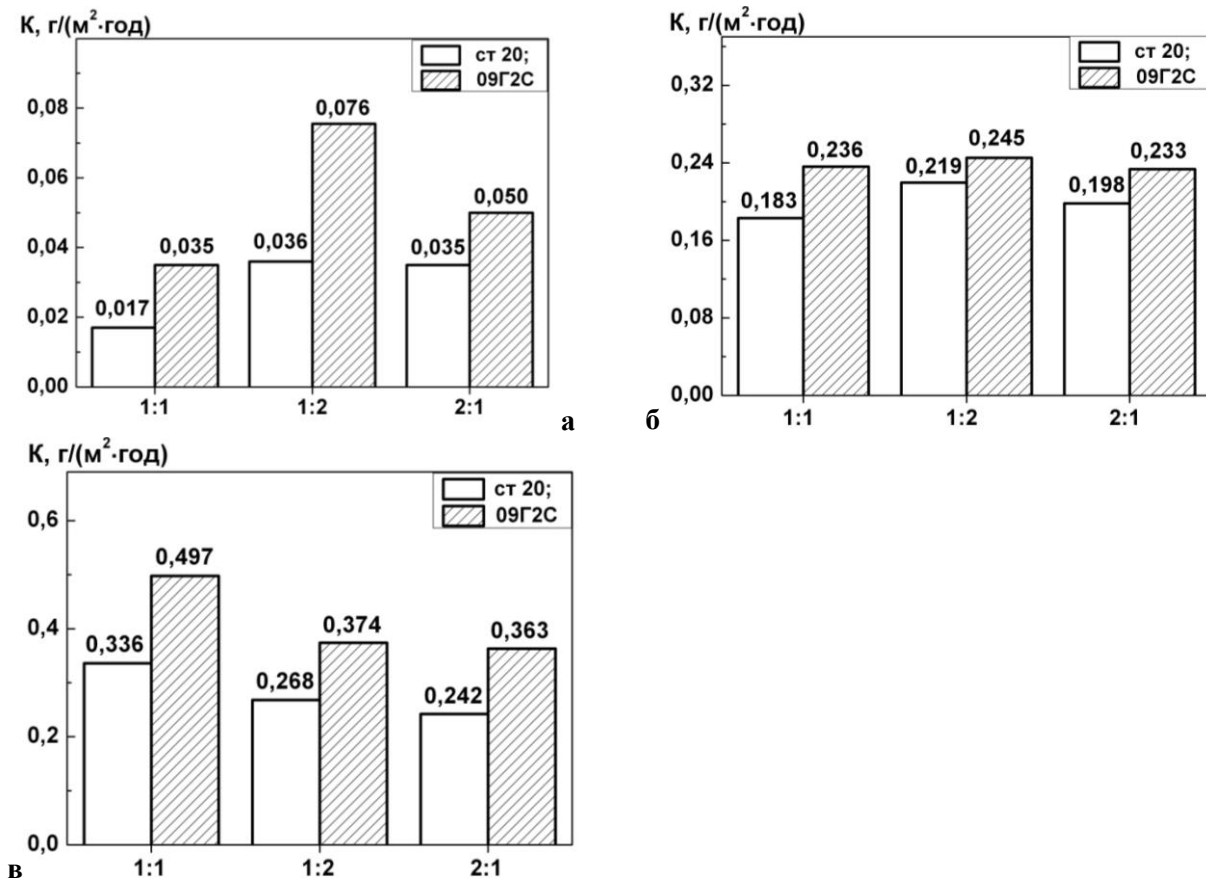


Рис. 3. – Швидкість корозії сталей 20 та 09Г2С за контакту та різних співвідношень площ анода та катода: а – ММВ; б – ММВ насичена H₂S; в – розчин NACE

В ММВ контакт сталей 20 та 09Г2С призводить до зменшення швидкості корозії малоуглецевої сталі в $\sim 1,2 \dots 2,5$ рази та збільшення в $\sim 1,2 \dots 2,5$ рази низьколегованої залежно від співвідношення площ зразків (рис.3а). Швидкість корозії досліджуваної гальванопари у ММВ, насиченій сірководнем, за усіх співвідношень площ зразків ($S_{20}:S_{09Г2С} - 1:1, 1:2, 2:1$) відрізняються незначно порівняно з їх показниками корозії без контакту (рис.2,3б). У стандартному розчині NACE за контакту ($S_{20}:S_{09Г2С} - 1:1$) швидкість корозії сталі 20 зменшується в $\sim 1,6$ рази, а 09Г2С зростає в $\sim 1,4$ рази (рис.3в).

У гальванопарі 09Г2С – 08X18H10Т анодом є сталь 09Г2С. За співвідношення $S_a : S_k = 1:1$ швидкість її корозії найнижча в ММВ, у ММВ + H₂S_{нас.} в $\sim 3,4$ рази, а розчині NACE в $\sim 12,4$ разів вища, ніж у ММВ (рис.4). Встановлено, що у ММВ за контакту зразків зі сталі 09Г2С та 08X18H10Т однакової площі швидкість корозії низьколегованої сталі зростає в $\sim 2,0$ рази порівняно з такою за відсутності контакту. У ММВ, насиченій сірководнем, швидкість корозії низьколегованої сталі у контакті зі сталлю 08X18H10Т практично така ж як і за відсутності контакту. У розчині NACE швидкість корозії низьколегованої сталі за контакту зі сталлю 08X18H10Т зростає в $\sim 2,1$ рази порівняно з такою за відсутності цього контакту (рис.2,4в).

Із збільшенням площі катода в два рази, порівняно з площею анода, швидкість контактної корозії зростає: у ММВ в 1,6 рази; у ММВ, насиченій сірководнем, в 1,13 рази та розчині NACE в 1,14 рази порівняно зі швидкістю корозії за співвідношення площ $S_{09Г2С} : S_{08X18H10Т} - 1:1$. При зменшенні площі катода в два рази порівняно з площею анода спостерігається тенденція до зниження швидкості контактної корозії: в 1,1 рази у ММВ; в 1,1 рази у ММВ, насиченій сірководнем та 1,4 рази у розчині NACE (рис.4).

У гальванопарі сталь 20 – 08X18H10Т анодом є сталь 20. У ММВ швидкість корозії цієї сталі найнижча і складає 0,065 г/(м²·год.); у ММВ + H₂S(нас.) цей показник вищий в $\sim 1,7$ рази, а в розчині NACE він в $\sim 10,5$ разів перевищує швидкість корозії в ММВ (рис.4).

За контакту зразків зі сталі 20 та 08X18H10Т однакової площі швидкість корозії вуглецевої сталі у ММВ зростає в $\sim 1,6$ рази, а в розчині NACE швидкість корозії сталі 20 за контакту зі сталлю 08X18H10Т зростає в $\sim 1,3$ рази порівняно з такою за відсутності контакту.

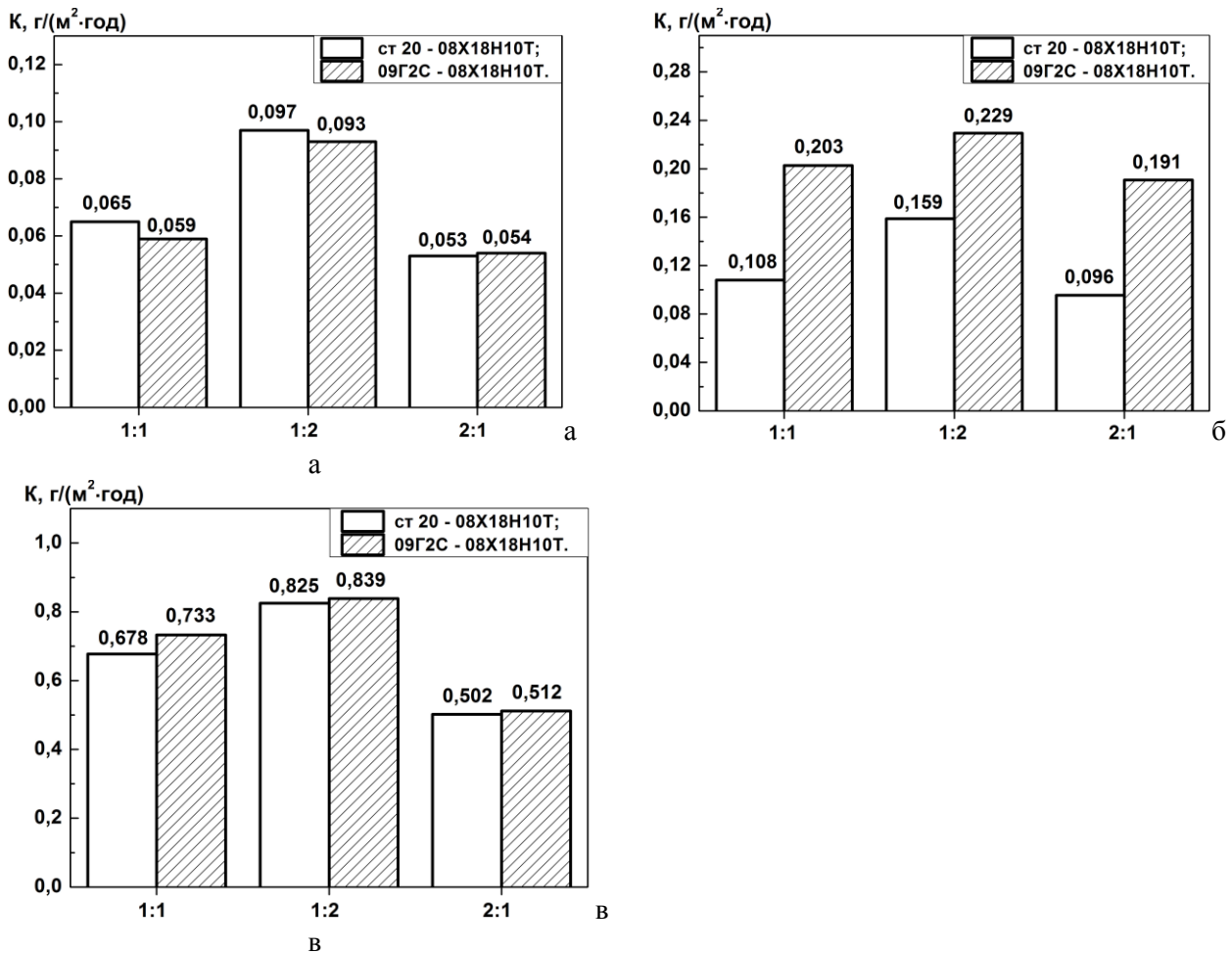


Рис. 4.– Швидкість корозії сталей 20 та 09Г2С за контакту зі сталлю 08X18H10Т та різних співвідношень площ анода та катода: а – ММВ; б – ММВ насичена H_2S ; в – розчин NACE.

Зі зростанням площі катода в два рази відносно площі анода швидкість корозії сталі 20 в ММВ зростає в $\sim 1,5$ рази, в ММВ, насиченій сірководнем у $\sim 1,9$ рази та розчині NACE в $\sim 1,2$ рази порівняно з такою за співвідношення площі анода та катода 1:1. Зі зменшенням площі катода в два рази порівняно з площею анода спостерігається тенденція до зниження швидкості контактної корозії. У ММВ, ММВ, насиченій сірководнем, та розчині NACE вона складає відповідно $0,053 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$, $0,096 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ та $0,502 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$, що в 1,2 ; 1,13 та 1,6 рази менше, ніж при співвідношенні площі катода та анода 1:1.

Короткотривалі електрохімічні дослідження підтверджують тенденцію до зростання контактної корозії зі зростанням концентрації сірководню.

Таблиця 1

Потенціали корозії сталей та гальванопар у різних середовищах

Сталі	Середовище		
	ММВ	ММВ+ H_2S	NACE
	E, мВ		
Ст20	- 0,632	- 0,687	- 0,635
09Г2С	- 0,652	- 0,690	- 0,642
08X18H10Т- Ст20	- 0,605	- 0,675	- 0,605
08X18H10Т- 09Г2С	- 0,632	- 0,680	- 0,615
Ст20- 09Г2С	- 0,655	- 0,695	- 0,652

Електрохімічними дослідженнями встановлено (рис.5), що у ММВ на катодних кривих спостерігається граничний дифузійний струм кисневої деполяризації. Відповідно, у ММВ швидкість корозії, як самих сталей 09Г2С та сталі 20, так і їхніх гальванопар із сталлю 08Х18Н10Т визначається швидкістю катодного процесу, яка залежить від швидкості дифузії кисню в розчині до поверхні електрода

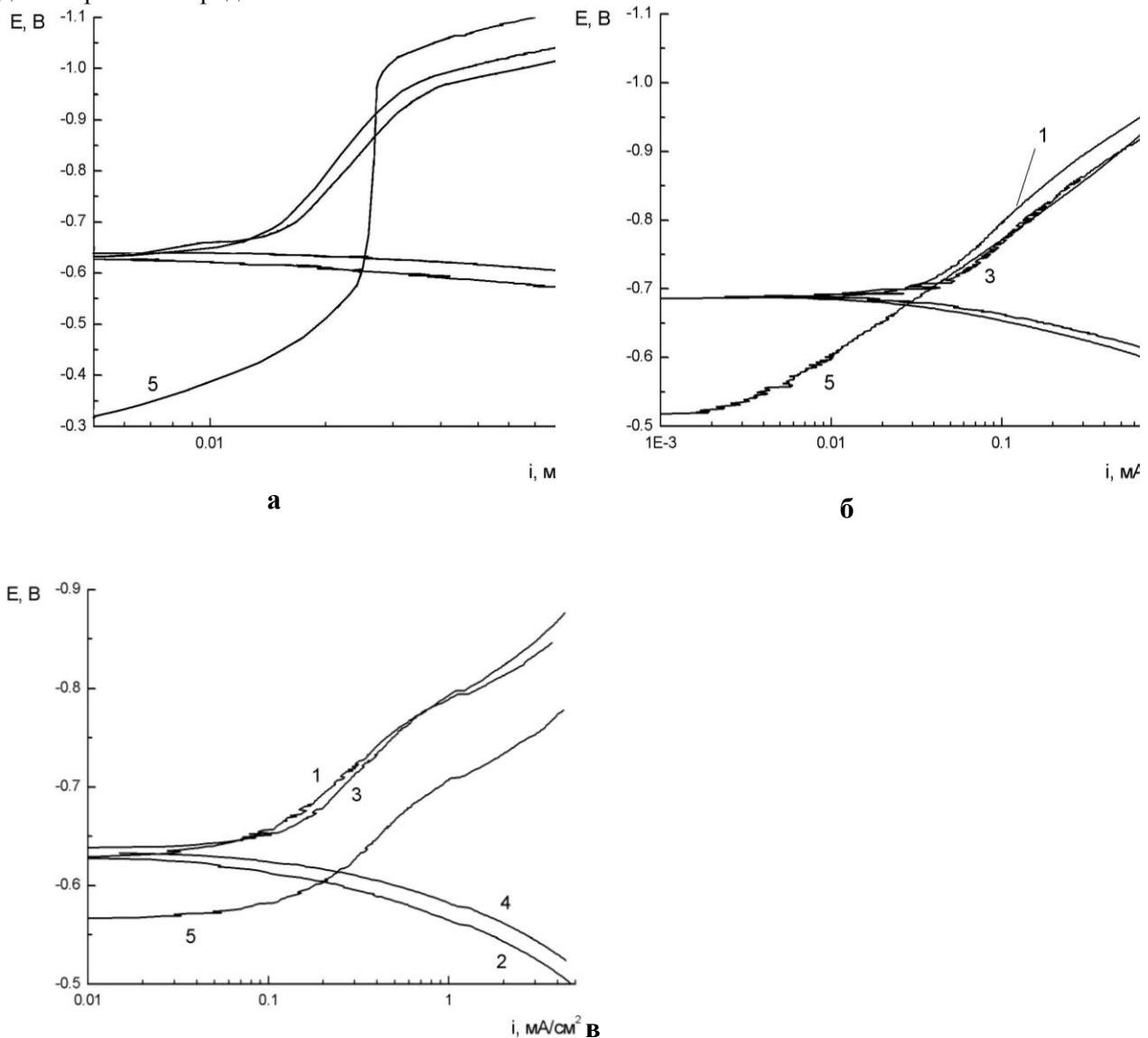


Рис.5. – Поляризаційні криві сталі 20 (1,2), 09Г2С (3, 4) та 08Х18Н10Т (5) за температури 20°C і швидкості розгортки 1 мВ/с : а– ММВ; б– ММВ, в – розчин NACE.

У сірководневих розчинах для досліджених сталей характерна воднева деполяризація (рис.5). Це зумовлено підкисленням середовищ та відсутністю у них кисню. Зростання ефективності катодного процесу у ММВ, насиченій сірководнем, та розчині NACE призводить до зростання як швидкості корозії сталей у цих середовищах так і швидкості корозії гальванопар.

Як вже згадувалось, згідно з даними таблиці для сталі 09Г2С спостерігається від'ємніший потенціал корозії, ніж для сталі 20, отже теоретично ця сталь у гальванопарі сталь 20 - 09Г2С може бути анодом. Однак у реальних умовах на обох електродах гальванопари сталь 20- 09Г2С спостерігалось пухиріння від наводнювання та зменшення маси електродів. На цих сталях поперемінно протікають катодні і анодні процеси. Контакт нержавіючої сталі і будь якої із вказаних сталей є небезпечним у досліджуваних середовищах, оскільки швидкість корозії гальванопар 08Х18Н10Т- сталь 20 та 08Х18Н10Т- 09Г2С зростає у ~ 2 рази порівняно із швидкостями корозії сталей зокрема, що є анодами.

Висновки. Встановлено тенденцію до зростання контактної корозії зі зростанням агресивності середовища: ММВ – ММВ+H₂S насичення – розчин NACE для всіх гальванопар, що

досліджувались. Аналогічна тенденція спостерігається для сталей 20 та 09Г2С за відсутності контакту.

Показано, що у гальванопарі сталь 20 - 09Г2С немає чіткого розмежування катод – анод, тому подання цих сталей не повинно викликати загрозу контактної корозії.

Показано, що контакт нержавіючої сталі і сталі 20 чи 09Г2С у досліджуваних середовищах є небезпечним, оскільки збільшує швидкість контактної корозії.

Спостерігається загальна тенденція до зростання швидкості контактної корозії при збільшенні площі катода та її зниження при зменшенні площі катода.

Література:

1. *Петров Л. Н.* Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л. Н. Петров, Н. Г. Сопрунок. – Киев: Наукова думка, 1991. – 214 с.
2. *Розенфельд И. Л.* Коррозия и защита металлов / И. Л. Розенфельд. – Москва: Металлургия, 1970. – 448 с.
3. *Коррозия:* Справ. изд. / Под. ред. Л. Л. Шрайера: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

СИРОТЮК Андрій Михайлович, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. спроб. відділу фізичних основ руйнування та міцності матеріалів в агресивних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України;

ТКАЧУК Юлія Миколаївна, доцент кафедри матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування Луцького національного технічного університету, канд. техн. наук, доцент.

Стаття надійшла до редакції 25.08.2016.

УДК 513.88:517.44. 539.3

Полетаев Г.С.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ОБЩЕЕ СВОЙСТВО РЕШЕНИЙ РОДСТВЕННЫХ РИМАНА-ГИЛЬБЕРТА-ПРИВАЛОВА ЗАДАЧ СО ВЗАИМНО ОБРАТНЫМИ РАЦИОНАЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Для двух таких задач со взаимно обратными правильно факторизуемыми рациональными коэффициентами установлены свойство и формулы, связывающие решения, соответствующие единице в правой части уравнений. Метод основан на теореме, вытекающей из результатов автора для соответствующих абстрактных уравнений в кольце со специальной факторизационной парой подколец. Используются проекторы на подкольца, факторизация коэффициентов, разложения в суммы простейших рациональных дробей. Процедура свободна от аппарата теории интеграла типа Коши, требования гёльдеровости функций, индекса.

Ключевые слова: Задача Римана, уравнение, факторизация, кольцо, проектор, факторизационная пара.
Лит. 19

Г.С. Полетаев

ЗАГАЛЬНА ВЛАСТИВІСТЬ РІШЕНЬ СПОРІДНЕНИХ РИМАНА-ГІЛЬБЕРТА-ПРИВАЛОВА ЗАДАЧ, З ВЗАЄМНО ОБЕРНЕНИМИ РАЦІОНАЛЬНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ

Для двох таких задач, з взаємно оберненими правильно факторизуємими раціональними коефіцієнтами встановлені властивості та формули, зв'язуючи рішення відповідні одиниці у правій частині рівнянь. Результат базується на теоремі, що випливає із встановлених автором для відповідних абстрактних рівнянь у кільці з спеціальною факторизаційною парою підкілець. Використовуються проектори на підкільця, факторизація коефіцієнтів, розклади раціональних функцій в суми простих раціональних дробів. Процедура вільна від апарату інтеграла типу Коші, вимоги гольдеровості функції, індексу.

Ключові слова: Задача Рімана, рівняння, факторизація, кільце, проектор, факторизаційна пара.
Лит. 19.

G.S. Poletaev

GENERAL PROPERTY THE SOLUTIONS RELATED RIEMANN-HILBERT-PRIVALOV PROBLEMS WITH MUTUALLY INVERSE RATIONAL COEFFICIENTS

For two such tasks with mutually inverse and correctly factorizable rational coefficients are established general property and linking formulas solution. Namely, the respective units on the right side of equations. The method is based on the theorem, derived from the author's results for the respective abstract equations in ring, with special factorization pair of subrings. The projections are used on a subrings and factorization of coefficient, decomposition into a sum of simple rational fractions. Procedure is free from the theory of Cauchy integral, Holder requirements, and index.

Keywords: The Riemann problem, equation, factorization, ring, projection, factorization pair.
Ref. 19.

1. Постановка проблемы. Сообщение продолжает [1]. Известна важность теории задачи Римана (Римана-Гильберта, Римана-Гильберта-Привалова) и связанных с нею уравнений для аналитических функций [1-11]. Эта задача возникает или используется в теоретических и прикладных разделах математики, механики, их приложений. В том числе, в теории упругости, задачах о кручении. Возникает в теории некоторых видов дифференциальных и интегродифференциальных уравнений, интегральных уравнений типа свёртки, при изучении соответствующих дифференциальных уравнений математической физики. Важная роль теории уравнений, в частности, из задачи Римана – Гильберта и родственных обосновывает необходимость поиска новых общих упрощающих методов исследования, установления условий разрешимости, представления решений в замкнутой форме, при их существовании, а также их общих свойств. В том числе, точных методов, минимально опирающихся на теорию функций комплексного переменного, свободных от аппарата теории интеграла типа Коши. Эти уравнения, в соответствующей постановке, связаны с уравнениями задачи о нахождении рациональных функций с полюсами из полуплоскостей по линейному соотношению между искомыми [1, 9-15]. Стало быть, установление общих свойств решений задач нахождения рациональных функций с полюсами из разных полуплоскостей по рассматриваемым ниже уравнениям является актуальным.

2. Анализ исследований и публикаций. Существующие, точные методы исследования задачи Римана – Гильберта восходят, в частности, к работам И.И. Привалова, Ф.Д. Гахова, Ю.И. Черского, М.Г. Крейна и другим. На связь теории интегральных уравнений на полупрямой с

ядром, зависящим от разности аргументов и этой задачей, впервые обратил внимание И.М. Рапопорт (1948). Среди работ, связанных с теорией задачи Римана-Гильберта, но посвящённых абстрактным уравнениям в ассоциативных кольцах со специальной парой подколец, а также реализациям их в конкретных кольцах, укажем [1, 9-15]. В силу отмеченного в [3] (с. 114), со ссылкой на книгу Н.И. Мусхелишвили (1945), можно заключить, что, обычно, эту задачу решали в предположении выполнения для соответствующих функций дополнительного условия Гёльдера на контуре. Использовался аппарат теории интеграла типа Коши, понятие индекса. В целом, основанные на применении теории функций комплексной переменной, аппарата теории интеграла типа Коши, подходы приводят к необходимости преодоления значительных аналитических трудностей. Не всегда оправданных. Новые идеи и результаты других возможных подходов к исследованию, в иных предположениях и без требования гёльдеровости функций, заложены в [3]. Можно также пытаться применить соответствующие результаты из [1, 9-18].

Публикации, в том числе [7], подтверждают сохранение интереса к использованию задачи Римана. Наряду с другими, важен случай, когда в такого типа задаче Римана-Гильберта-Привалова коэффициенты являются рациональными функциями [2-4, 19], например, этот случай возникает в связи с исследованием дифференциальных уравнений с кусочно-постоянными коэффициентами на оси и его редукцией. В рассматриваемой ситуации, от задачи Римана-Гильберта-Привалова можно перейти к родственной задаче, поставленной далее в п. 4. При этом, считая искомыми функции, принадлежащими соответствующим подмножествам рациональных. Однако, свободных от использования аппарата интегралов типа Коши, достаточно простых и исчерпывающих, строго изложенных методов исследования такого типа задач не известно. До [1] отсутствовала, соответствующая предположениям, теорема существования с удобным представлением решений в замкнутой форме. Поэтому, поиски путей упрощения элементов исследования и общих свойств решений рассматриваемой в статье ниже родственной задачи актуальны. В том числе и общих свойств таких задач со взаимно обратными коэффициентами.

3. Цель статьи. Целью работы является сообщение об установлении одного общего свойства задач родственных задачам типа Римана -Гильберта -Привалова. Свойство обнаружено при проекторном подходе к исследованию, упрощающем теорию таких родственных задач со взаимно обратными коэффициентами. Их постановка приводится ниже. Именно, задач о нахождения двух рациональных функций с полюсами из разных полуплоскостей по линейным уравнениям, на сомкнутой вещественной оси, с правильно факторизуемыми взаимно обратными коэффициентами, вида:

$$A(x)X^+(x) + Y_-(x) = B(x); x \in \{-\infty; \infty\} \text{ »}, \quad (1)$$

$$A^{-1}(x)X_1^+(x) + Y_{1-}(x) = B(x); x \in \{-\infty; \infty\} \text{ »}. \quad (2)$$

Здесь и далее, $A^{-1}(x) := [A(x)]^{-1}, x \in \{-\infty; \infty\}$, $A^{-1}(z) := [A(Z)]^{-1}, z \in C$.

Цель достигается посредством использования соответствующих результатов, общей теоремы существования с формулами решений из [1, 9, 10, 12-15]. В качестве контура здесь выступает сомкнутая вещественная ось [3]. Результаты развивают и дополняют [1, 15].

Ниже будем использовать основные положения, обозначения и определения из [1].

4. Общие положения, обозначения и определения

4.1. В сообщении к изучению рассматриваемых ниже задач применяется решение нелинейной задачи факторизации по подкольцам и другие положения.

Используя [9-11, 14, 17, 18], напомним следующее.

Определение. Всякое кольцо R с единицей e , рассматриваемое вместе с его фиксированной факторизационной парой подколец (R^+, R^-) [$\equiv (R^-, R^+)$] будем называть «кольцом с факторизационной парой». Кратко, кольцом с **ФП**.

Будем говорить, что элемент $a \in R$ допускает в коммутативном кольце R факторизацию по факторизационной паре (R^+, R^-) , если есть элементы $r^+ \in R^+, s^0 \in R^0, t^- \in R^-$ такие, что:

$$a = r^+ s^0 t^-. \quad (*)$$

Факторизация (*) называется: правильной факторизацией (п.ф.), если $r^+ \in R^+, s^0 \in R^0, t^- \in R^-$ – правильные элементы [9-14]; – нормированной факторизацией (н.ф.), если $t^0 = r^0 = e$;

– нормированной правильной факторизацией (н.п.ф.), если она является (п.ф.) и $t^0 = r^0 = e$. Известно [11, 9, 10, 17, 18], что правильную факторизацию элемента из R по ФП (R^+, R^-) можно нормировать. Нормированная правильная факторизация единственна.

4.2. Кольцо \mathfrak{R}_r с факторизационной парой $(\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-)$

Обозначим через \mathfrak{R}_r совокупность всех рациональных функций, вообще, комплексного переменного $z \in C$, все полюсы которых конечны и невещественны. Пределы функций из \mathfrak{R}_r на бесконечности конечны. Пусть $\mathfrak{R}_r^+ (\mathfrak{R}_r^-)$ – совокупности функций из \mathfrak{R}_r , все полюсы которых расположены внутри нижней (верхней) полуплоскости $\Pi_- (\Pi_+)$, соответственно (Ср. [3]; с.13,14). Проверяется, что \mathfrak{R}_r – кольцо с мультипликативной единицей $e = f(z) := 1, z \in C$ относительно обычных операций сложения и умножения функций, а $\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-$ – его подкольца с единицей. Проекторы на подкольца: $\mathfrak{R}_r \rightarrow \mathfrak{R}_r^\mp$ обозначим P^\mp , соответственно. Эти проекторы коммутирующие. Проектор P^+ (проектор P^-) каждой функции из \mathfrak{R}_r ставит в соответствие часть её разложения в сумму простейших дробей первого и второго типов, получающуюся удалением из неё всех слагаемых с полюсами из Π_+ (из Π_-), соответственно. Полагаем:

$$P^0 = P^+P^-, P_+ = P^+ - P^0, P_- = P^- - P^0, \mathfrak{R}_r^{\mp,0} = P^{\mp,0}(\mathfrak{R}_r), \text{ где } \mathfrak{R}_r^0 = \mathfrak{R}_r^+ \cap \mathfrak{R}_r^-.$$

Можно показать, что \mathfrak{R}_r является кольцом с факторизационной парой $(\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-)$.

4.3. Постановка задач и формульное выражение общего свойства решений, соответствующих единице в правой части

4.3.1. Будем рассматривать вопрос о свойствах, выражающих связь между решениями следующих двух задач в случае, когда правая часть краевых условий равна единице.

Задача 1. «Для заданных рациональных функций – коэффициентов $A(x), B(x), -\infty < x < \infty$ найти пару рациональных функций $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in \mathfrak{R}_r^-$, все полюсы первой из которых, при существовании, расположены в нижней, а второй – в верхней полуплоскостях, соответственно, и удовлетворяющих на сомкнутой вещественной оси линейному уравнению:

$$A(x)X^+(x) + Y_-(x) = B(x); x \in \{-\infty; \infty\}, \tag{1}$$

где все известные функции определены на сомкнутой вещественной оси, причём предполагаем, что при $x = +\infty$ и при $x = -\infty$ каждая из них имеет совпадающие между собой конечные значения, равные соответствующим пределам. »

Задача 2. «Для заданных рациональных функций – коэффициентов $A(x), B(x), -\infty < x < \infty$ найти пару рациональных функций $X_1^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_{1-}(z) \in \mathfrak{R}_r^-$, все полюсы первой из которых, при существовании, расположены в нижней, а второй – в верхней полуплоскостях, соответственно, и удовлетворяющих на сомкнутой вещественной оси линейному уравнению:

$$A^{-1}(x)X_1^+(x) + Y_{1-}(x) = B(x); x \in \{-\infty; \infty\}, \tag{2}$$

где все известные функции определены на сомкнутой вещественной оси, причём предполагаем, что при $x = +\infty$ и при $x = -\infty$ каждая из них имеет совпадающие между собой конечные значения, равные соответствующим пределам. »

4.3.2. **Главный результат.** При решении рассматриваемого вопроса в \mathfrak{R}_r , когда коэффициенты порождаются функциями из \mathfrak{R}_r , будем исходить из очевидной возможности продолжения каждой из функций и, следовательно, соотношений (1), (2) полностью на всю комплексную плоскость, заменой в этих уравнениях вещественного переменного x комплексной переменной z , не выходя из соответствующего подкласса рациональных функций. Так вместо (1), (2) возникает уравнения, соответственно:

$$A(z)X^+(z) + Y_-(z) = B(z), z \in C; \tag{3}$$

$$A^{-1}(z)X_1^+(z) + Y_{1-}(z) = B(z); z \in C, \tag{4}$$

где, по предположению, $A(z), B(z) \in \mathfrak{R}_r$, $z \in C$, - известные функции;

$X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in (\mathfrak{R}_r)_-, Z_1^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_{1-}(z) \in (\mathfrak{R}_r)_-$; $z \in C$ - искомые; C - расширенная комплексная плоскость. Учитывая возможность реализации в кольце $R = \mathfrak{R}_r$ с ФП $(\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-)$ результатов из [9, 10], или [13, 14], непосредственно, при соответствующих предположениях, можно убедиться в справедливости следующего утверждения, установленного в [1].

Теорема. Пусть функция $A(z) \in \mathfrak{R}_r$ не имеет вещественных нулей и

$$\lim_{z \rightarrow \infty} A(z) = const \neq 0.$$

Если, при этом, $A^{-1}(z)$ допускает нормированную правильную факторизацию по факторизационной паре $(\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-)$:

$$A^{-1}(z) = \Gamma^+(z)S^0(z)T^-(z); z \in C,$$

тогда уравнение (3) и Задача 1., относительно $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in (\mathfrak{R}_r)_-$, при любой правой части $B(z) \in \mathfrak{R}_r$ имеет единственное решение. Его можно найти по формулам:

$$X^+(z) = \Gamma^+(z)S^0P^+[T^-(z)B^+(z)], \quad (5)$$

$$Y_-(z) = B_-(z) + T^-(z)P_-[T^-(z)B^+(z)],$$

где

$$T^-(z) := (T^-(z))^{-1}.$$

Заметим, что всякая, являющаяся решением (3), пара рациональных функций $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in (\mathfrak{R}_r)_-$, сужением на сомкнутую вещественную ось, порождает решение уравнения (1):

$$X^+(x) = X^+(z) \downarrow_{z=x}, \quad Y_-(x) = Y_-(z) \downarrow_{z=x}; x \in \{-\infty; \infty\}. \quad (6)$$

Следовательно, доставляет и решение *Задачи 1.*

Меняя ролями $A(x)$ и $A^{-1}(x)$ заключаем, что, при условиях Теоремы, уравнение (4) и Задача 2., относительно неизвестных $X_1^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_{1-}(z) \in (\mathfrak{R}_r)_-$; $z \in C$ при любой правой части $B(z) \in \mathfrak{R}_r$ имеет единственное решение. Его можно найти по формулам:

$$\begin{aligned} X_1^+(z) &= (\Gamma^+(z)S^0)^{-1}P^+[(T^-(z))^{-1}B^+(z)], \\ Y_{1-}(z) &= \{B_-(z) + T^-(z) \cdot P_-[(T^-(z))^{-1}B^+(z)]\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Следствие 1. При условиях теоремы, соответствующие правой части $B(z) = 1; z \in C$ решения уравнений (3), (4) и *Задач 1., 2.* обозначаем и получаем из (5), (7), соответственно, в виде:

$$X^+(z) := X_e^+(z) = \Gamma^+S^0, Y_-(z) := Y_{e-}(z) = (T^-(z))^{-1}T_-(z), \quad (8)$$

$$X_1^+(z) := X_{e1}^+(z) = (\Gamma^+S^0)^{-1}, Y_{1-}(z) := Y_{e1-}(z) = T^-(z)P_-[(T^-(z))^{-1}]. \quad (9)$$

Имеет место такое свойство решений уравнений (3), (4), а, стало быть, и аналогичное свойство уравнений (1), (2) и *Задач 1., 2.*, соответствующих единице в правой части.

Общее свойство. При условиях Теоремы, произведения: 1) - составляющих

$X_e^+(z), X_{e1}^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+$, а также 2) - разности между единицей и составляющей $Y_{e-}(z)$ на разность между единицей и составляющей $Y_{e1-}(z)$ -решений уравнений (3), (4) и *Задач 1., 2.* при правой части, равной единице, $B(z) = 1; z \in C$, соответственно, - равны единице.

Формульным выражением свойства являются следующие соотношения:

$$X_e^+(z)X_{e1}^+(z) = 1, \tag{10}$$

$$[1 - Y_{e-}(z)] \cdot [1 - Y_{e1-}(z)] = 1.$$

Действительно. Первое из соотношений (10) вытекает из формул (8), (9) очевидным образом. Второе доказывается вычислениями, с учётом (8), (9):

$$\begin{aligned} [1 - Y_{e-}(z)] \cdot [1 - Y_{e1-}(z)] &= [1 - (T^-(z))^{-1}T_-(z)] \cdot [1 - T^-(z)((T^-(z))^{-1})_-] = \\ &= [1 - (T^-(z))^{-1}T_-(z)] \cdot [1 - T^-(z)((T^-(z))^{-1})_-] = \\ &= (T^-(z))^{-1}[(T^-(z) - T_-(z)) \cdot ((T^-(z))^{-1})_- - ((T^-(z))^{-1})_-]T^-(z) = \\ &= (T^-(z))^{-1} \cdot 1 \cdot 1 \cdot T^-(z) = 1; z \in \square. \end{aligned}$$

Свойство доказано.

Следствие 2. При условиях теоремы, зная решение уравнения (3) (*Задачи 1.*) с правой частью $B(\cdot) = 1$, можно найти решение уравнения (4) и *Задачи 2.* с той же правой частью $B(\cdot) = 1$, по формулам:

$$X_{e1}^+(z) = (X_e^+(z))^{-1}, \tag{11}$$

$$Y_{e1-}(z) = -Y_{e-}(z) \cdot [1 - Y_{e-}(z)]^{-1}.$$

4.4. Иллюстративные примеры

Решим *Задачи 1., 2.*, поставленную по краевым условиям на сомкнутой вещественной оси, заданным уравнениями (1), (2) при:

$$A(x) = \frac{x^2 + 9}{2x^2 + 2}; \quad A^{-1}(x) = \frac{2x^2 + 2}{x^2 + 9}; \quad B(x) = 1.$$

Тогда,

$$A^{-1}(z) = \frac{z+i}{z+3i} \cdot 2 \cdot \frac{z-i}{z-3i}.$$

Отсюда,

$$S^0 = 2; \quad \Gamma^+ = \frac{z+i}{z+3i}; \quad T^-(z) = \frac{z-i}{z-3i}; \quad [T^-(z)]^{-1} = \frac{z-3i}{z-i}.$$

По формулам (8), находим решение *Задачи 1.:*

$$X_e^+(z) = 2 \cdot \frac{z+i}{z+3i}; \quad Y_{e-}(z) = \frac{2i}{z-i}. \tag{12}$$

Теперь, с помощью (11), (12), вычисляем решение *Задачи 2.:*

$$\begin{aligned} X_{e1}^+(z) &= \frac{1}{2} \cdot \frac{z+3i}{z+i}; \\ Y_{e1-}(z) &= -\frac{2i}{z-i} \cdot [1 - \frac{2i}{z-i}]^{-1} = -\frac{2i}{z-3i}. \end{aligned}$$

Подстановкой, соответственно, в (3), (4) проверяется, что это действительно решения.

Такой же результат для решения *Задачи 2.* можно получить, используя (9), непосредственно.

Выводы и перспективы

При сделанных предположениях, от задачи Римана-Гильберта-Привалова можно перейти к родственной задаче, считая искомые функции, принадлежащими соответствующим подмножествам рациональных. Для таких родственных задач с правильно факторизуемыми рациональными взаимно обратными коэффициентами, установлено и выражено формулами общее свойство. Оно характеризует связь между решениями рассматриваемых задач, соответствующими единице в правой части исходных условий на сомкнутой вещественной оси. Использование установленного свойства в изученной ситуации, позволило, в случае указанной

единичной правой части, исчерпать вопрос нахождения решения уравнения (4) и *Задачи 2.* со взаимно обратным коэффициентом по известному решению уравнения (3) и, стало быть, *Задачи 1.* Исчерпать в явном виде формулами (11), минуя процедуру факторизации. Решения, соответствующие единице в правых частях рассмотренных уравнений и задач играет в их теории важную роль. В перспективе - при описании и непосредственном нахождении с их помощью решений рассматриваемых уравнений и задач с весьма произвольной правой частью.

Литература

1. Войтик Т.Г., Полетаев Г.С., Яценко С.А. Метод нахождения рациональных функций с полюсами из разных полуплоскостей по уравнению с правильно факторизуемым коэффициентом // НАУКОВІ НОТАТКИ. – Вип. 54. - Луцьк, 2016. – С. 65 – 70.
2. Гахов Ф.Д. Краевые задачи.-М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит.,1963.-640 с.
3. Крейн М. Г. Интегральные уравнения на полупрямой с ядрами, зависящими от разности аргументов // Успехи мат. наук. – 1958. – 13, вып. 5(83). – С. 3 – 120.
4. Мусхелишвили Н.И. Сингулярные интегральные уравнения. - М.:Наука, 1968.-512 с.
5. Гахов Ф.Д., Черский Ю.И. Уравнения типа свертки. - М.: Наука, 1978. -296с.
6. Мхитарян С.М. О некотор. плоских контакт. задачах теор. упруг. с учётом сил сцепл. и связ. с ними интегр. и диффер. уравн.// Изв. АН Армянской ССР. Механика.-1968.-XXI, №5-6.-С. 3-20.
7. Акопян В.Н., Даштоян Л.Л. Замк. реш. некот. смеш. задач для ортогр. плоскости с разрезом// Совр. пробл. мех. деформ. тв. тела, диффер. и нтегр. уравн. Тез. докл. МНК. Одесса, 2013.- С. 12.
8. Черский Ю.И., Керекеша П.В., Керекеша Д.П. Метод сопряжения аналитических функций с приложениями. Одесса: Астропринт, 2010.-552 с.
9. Полетаев Г.С. Об уравнениях и системах одного типа в кольцах с факторизационными парами. – Киев, 1988. – 20 с. – (Препринт / АН УССР. Институт математики:88.31).
10. Полетаев Г. С. Об однопроекторн. II порядка уравн. с правильно факторизуемыми коэфф. в кольце с факторизационной парой // Вест. Херсон. гос. техн. ун-та.–2000.-№2 (8). – С. 191–195.
11. McNabb A., Schumitzky A. Factorization of Operators I: Algebraic Theory and Examples // J. Funct. Anal. – 1972. – 9, № 3. – P. 262 – 295.
12. Полетаев Г. С., Войтик Т.Г., Яценко С.А. Нахождение двух рациональных функций с полюсами из полуплоскостей по линейному уравнению с правильно факторизуемым коэффициентом // Глушковські читання. НТУУ «КПІ», Київ.- С. 74-77.
13. Полетаев Г.С. Подвид двупроекторных первого порядка уравнений с правильно факторизуемым коэффициентом в кольце с факторизационной парой // XII International Conference DYNAMICAL SYSTEM MODELLING AND STABILITY INVESTIGATION. MODELLING & STABILITY. ABSTRACTS OF CONFERENCE REPORTS. Kiev, Ukraine. May 27-29, 2015. ВІСНИК Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. - С. 46.
14. Полетаев Г.С. Метод решения абстрактных уравнений с двумя неизвестными из подколец факторизационной пары // Математика в сучасному технічному університеті. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції 24-25 грудня 2015 року. Київ. – 2016. – С. 85-88.
15. Войтик Т.Г., Полетаев Г. С., Яценко С.А. Проекторный поход к нахождению двух рациональных линейно связанных на оси функций с полюсами из разных полуплоскостей // Необратимые процессы в природе и технике. Труды восьмой Всероссийской конференции 27-29 января 2015г. Москва. Часть II. МГТУ им. Н.Э. Баумана.- С. 125-129.
16. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц.-М.: "Наука", Главная редакция физ.-матем. лит., 1988.-549 с.
17. Полетаев Г. С. Абстрактный аналог парного уравнения типа свертки в кольце с факторизационной парой // Укр. матем. журн. – 1991, т. 43, № 9. – С. 1201 – 1213.
18. Полетаев Г. С. Некот. рез-ты о парн. ур. в кольцах с факторизационными парами//Вісн. Харк. націон. ун-ту.- 2002, № 582. – Сер. “Матем., прикл. мат. і мех. ”. – Вып.52. – С. 143 – 149.
19. Попов Г.Я., Керекеша П.В., Круглов В.Е. Метод факторизации и его численная реализация. Учебное пособие. Редактор: проф. Попов Г.Я.-Одесса: Одесский гос. университет, 1976.-82 с.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2016.