

НАУКОВІ НОТАТКИ

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

**Випуск 68
2019**

Луцьк 2019

РЕДАКЦІЙНА РАДА

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 4 від 26.12.2019 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:

Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

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

ISSN: 24-15-39-66

© Луцький національний технічний університет, 2019 р.

ШАНОВНІ ДОПISУВАЧІ, КОЛЕГИ!

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

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

Статті друкуються українською, англійською або російською мовами.

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

Наша адреса:

43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

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

Веб-сайт збірника: [**http: //notatki.com.ua**](http://notatki.com.ua)

З повагою,

*Відповідальний редактор,
професор Луцького НТУ*

В.Д. Рудь

ЗМІСТ

Зміст	4
Бабаян А.А. Дослідження процесу пресування спечених тонкостінних труб в конічній матриці спрощеним методом.....	6
Габрусєв Г.В., Габрусєва І.Ю., Пиндус Т.Б. Тиск параболічного штамп на попередньо напружений шар.....	13
Дудніков А.А., Дудніков І.А., Горбенко О.В., Келемеш А.О., Бурлака О.А. Процес і механізм абразивного зношування.....	19
Ковалєвський С.В., Ковалєвська О.С. Ідентифікація об'єктів машинобудування за кількома кількісними ознаками одночасно.....	23
Ковальчук С.Б. Задача термопружності для композитного бруса із плоскою віссю довільної форми у природній системі координат.....	30
Козбур Г.В., Шкодзінський О.К. Осесиметричні пластичні деформації тонкостінного циліндра.....	41
Колупаєв Б.Б. Математичне моделювання теплопровідності лінійних гнучколанцюгових полімерів.....	50
Крутий Ю.С., Сур'янінов М.Г., Сорока М.М., Карнаухова Г.С. Скінченно-елементний аналіз осесиметричного згину руглих суцільних пластин на змінній пружній основі.....	55
Куда О.А., Отиченко О.М., Сич О.Є. Структура та властивості модифікованої міддю кераміки на основі біогенного гідроксиапатиту медичного призначення.....	62
Мащенко В.А., Кривцов В.В., Квасніков В.П. Частотно-температурні вимірювання динамічного модуля пружності конструкційного полівінілхлориду.....	68
Михайлов А.О., Михайлов О.В., Штерн М.Б. Моделювання процесу зворотнього видавлювання пористих заготовок.....	74
Роїк Т.А., Віцюк Ю.Ю. Антифрикційний композиційний матеріал на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі для деталей друкарських машин.....	79
Рубець А.В. Система моніторингу для прогнозування використання ресурсів у розподілених системах.....	86
Савчук П.П., Матрунчик Д.М., Кашицький В.П., Садова О.Л., Петрук Г.Ю. Структурування епоксиполімерів під впливом електромагнітного поля.....	91
Саржанов Б.О. Новий спосіб підвищення якості покриттів при відновленні деталей методом електроерозійного легування.....	96
Семенова І.О. Розробка методики планування бюджету в галузі інформаційної безпеки.....	103
Сур'янінов М.Г., Неутов С.П., Корнєєва І.Б. Експериментальні дослідження несучої здатності моделі залізобетонної пустотної плити перекриття.....	107
Сяський А., Кот В., Вороницька В. Математична модель міжфазної тріщини в пластинці з підсиленням круговим контуром при її згині.....	113
Федорчук-Мороз В.І., Вісин О.О. Формування культури безпеки праці у професійній освіті... ..	120
Фурс Т.В. Технологічні особливості одержання монокристалів PbI_2	125
Фурс Т.В. Вплив технологічних домішок на процес кристалізації PbI_2 з розплаву.....	131
Челтонов М.М., Кириченко О.Л. Дослідження переробки продуктів утилізації твердого ракетного палива.....	135
Чигвінцева О.П., Кабат О.С., Бойко Ю.В. Вивчення трибологічних властивостей органопластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-1.....	142
Чумало Г.В., Харченко Є.В., Кичма А.О., Палюх В.М. Лабораторні дослідження впливу робочих параметрів сірководневих середовищ на швидкість корозії трубних сталей.....	147
Яременко В.С., Худяков А.С. Модель мультиагентної системи для семантичного аналізу текстів.....	152

CONTENT

<i>Contents</i>	4
Babayan A.A. Investigating the process of pressing the sintered thin-wall pipe in a conical matrix by a simplified method.....	6
Habrusiev H., Habrusieva I., Pyndus T. Pressure of parabolic punch on prestressed layer.....	13
Dudnikov A., Dudnikov I., Gorbenko O., Kelemesh A., Burlaka O. Process and mechanism of abrasive wear.....	19
Kovalevskyy S.V., Kovalevska O.S. Identification of mechanical engineering objects at the same time.....	23
Kovalchuk S. Problem of thermoelasticity of the composite bar with a plain axis of an arbitrary shape in the natural coordinate system.....	30
Kozbur H.V., Shkodzinsky O.K. Axisymmetric plastic deformations of a thin-walled cylinder.....	41
Kolupaev B. Mathematical modeling of thermal conductivity of linear flexible chain polymers.....	50
Krutii Yu.S., Surianinov M.H., Soroka M.M., Karnauhova G.S. Finite-element analysis of the axisymmetric bending of round continuous plates on a variable elastic basis.....	55
Kuda O., Otychenko O., Sych O. Structure and properties of copper modified ceramics based on biogenic hydroxyapatite for medical application.....	62
Mashchenko V., Krivtsov V., Kvasnikov V. Frequency-temperature measurements of the dynamic module of elasticity of constructional on polyvinyl chloride.....	68
Mikhailov A.O., Mikhailov O.V., Shtern M.B. Modeling the process of back extrusion of porous blanks.....	74
Roik T.A., Vitsiuk Iu.Iu. Antifriction composite material based on tool steel grinding waste for parts of printing machines.....	79
Rubets A. Full monitoring system for forecasting the use of resources in distributed systems.....	86
Savchuk P., Matrunchyk D., Kashytskyi V., Sadova O., Petruk G. Structuring of epoxy polymers under the influence of electromagnetic field.....	91
Sarzhhanov B.A. A new method for increasing the quality of coatings when restoring parts by the method of electroerosion alloying.....	96
Semenova I.O. Development of budget planning methods in the information security.....	103
Surianinov M.H., Neutov S.P., Korneieva I.B. Experimental studies of the bearing capacity of model reinforced concrete empty floor slabs.....	107
Siaskyi A., Kot V., Voronytska V. The mathematical model of an interphase fracture in a plate with a reinforced circular profile during its bending.....	113
Fedorchuk-Moroz V., Visyn E. Shaping safety culture in professional education.....	120
Furs T.V. Technological features of producing PbI ₂ single crystals.....	125
Furs T.V. Influence of technological impurities on the crystallization of PbI ₂ from melt.....	131
Cheltonov M.M., Kyrychenko A.L. Research processing of solid propellant disposal products.....	135
Chigvintseva O.P., Kabat O.S., Boyko Yu.V. Study of tribological properties of organoplastic based aromatic polyamides phenylone C-1.....	142
Chumalo H.V., Kharchenko Ye.V., Kychma A.O., Palyukh V.V. Laboratory studies of the influence of working parameters of hydrogen sulfide environment on pipe steel corrosion rate.....	147
Yaremenko V.S., Khudiakov A.S. Model of multiagent system for semantic text analysis.....	152

УДК 539.374, 621.762 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.1

А.А. Бабаян

Национальный политехнический университет Армении

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ СПЕЧЕННОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ В КОНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ УПРОЩЕННЫМ МЕТОДОМ

Процессы прессования и волочения труб в одной и той же конической матрице различаются схемами нагружения. При решении задач для этих процессов наблюдаются определенные сходства и различия. Учитывая, что процесс волочения упрощенным методом изучен в более полном объеме, для исследования процесса прессования спеченной тонкостенной трубы в конической матрице был проведен сравнительный анализ решения задачи указанным выше упрощенным методом процесса волочения.

Дана оценка деформированного и напряженного состояний волоченных и прессованных труб. Обосновывается упрощение основного уравнения равновесия для решения задачи волочения труб в случае отсутствия контактного трения, а для решения задачи прессования труб выбирается более простое условие пластичности. Обсуждаются условие пластичности и основное уравнение равновесия для решения задачи прессования труб.

Для определения пористости при прессовании спеченных труб используется формула деформационной теории пластичности пористых материалов. Численные расчёты производились в программной среде MS EXCEL для начальной пористости материала трубы 10, 20 и 30%. Определяются безразмерные меридиональные, окружные и средние напряжения в трубах, а также величины изменения интенсивности деформаций и текущей пористости материалов зависимости от параметра безразмерного радиуса.

Ключевые слова: тонкостенная труба, прессование и волочение, спеченный материал, пористость, безразмерные напряжения.

А.А. Babayan

INVESTIGATING THE PROCESS OF PRESSING THE SINTERED THIN-WALL PIPE IN A CONICAL MATRIX BY A SIMPLIFIED METHOD

The processes of pressing and drawing pipes in the same conical matrix differ in the loading patterns. Some similarities and differences in solving these problems are observed. Considering that the drawing process, using the simplified method is studied quite completely, to study the pressing process, a comparative analysis of the case for solving the drawing problem, using the simplified method is carried out.

The stress and strain states of the pressed and drawing pipes are evaluated. The simplification of the main equilibrium equation for solving the problem of drawing the tubes in the absence of contact friction, and to solve the problem on the tube pressing a simpler plasticity condition is chosen is justified. For solving the pressing problems, the basic equilibrium equation and the plasticity conditions are discussed.

At pressing sintered tubes, to determine the porosity, the equation of the deformation theory of plasticity of porous materials is used. Numerical calculations were performed in the MS EXCEL software environment with an initial porosity of the pipe material of 10, 20 and 30%.

The dimensionless meridian, circumferential and average stresses of the pipe, as well as the change in the strain intensity and the current porosity, depending on the pipe dimensionless radius parameter are determined.

Key words: thin-walled tube, pressing and drawing, sintered material, porosity, material substance, dimensionless stresses.

А.А. Бабаян

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ СПЕЧЕНИХ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ В КОНІЧНІЙ МАТРИЦІ СПРОЩЕНИМ МЕТОДОМ

Процеси пресування і волочіння труб в одній і тій же конічній матриці розрізняються схемами навантаження. При вирішенні завдань для цих процесів спостерігаються певні подібності та відмінності. З огляду на те, що процес волочіння спрощеним методом вивчений в більш повному обсязі, для дослідження процесу пресування спеченої тонкостінної труби в конічній матриці був проведений порівняльний аналіз рішення задачі зазначеним вище спрощеним методом процесу волочіння.

Дана оцінка деформованого і напруженого станів пресованих труб та труб отриманих методом волочіння. Обґрунтовується спрощення основного рівняння рівноваги для вирішення завдання волочіння труб в разі відсутності контактного тертя, а для вирішення завдання пресування труб вибирається більш проста умова пластичності. Обговорюється умова пластичності та основне рівняння рівноваги для вирішення завдання пресування труб.

Для визначення пористості при пресуванні спечених труб використовується формула деформаційної теорії пластичності пористих матеріалів. Чисельні розрахунки проводилися в програмному середовищі MS EXCEL для початкової пористості матеріалу труби 10, 20 і 30%. Визначаються безрозмірні меридіональні, окружні та середні напруги в трубах, а також величини зміни інтенсивності деформацій і поточної пористості матеріалів залежності від параметра безрозмірного радіусу.

Ключові слова: тонкостінна труба, пресування і волочення, спечений матеріал, пористість, безрозмірні напруги.

Введение. В [1] изучено напряженно-деформированное состояние спеченных тонкостенных труб из материалов различной пористости в процессе волочения в конической матрице при отсутствии и наличии трения. В этой работе степень деформирования трубы предлагается определять не только по интенсивности деформаций ε_i , используемых для сплошных материалов, но и по эквивалентным деформациям ε_{eq} , применяемым для пористых материалов, для чего было получено уравнение, учитывающее компоненты напряжённого состояния. Численные расчёты, проведенные с помощью данных ε_i и ε_{eq} в программной среде MS EXCEL, для матрицы с конусностью 14° в случаях отсутствия и наличия пористости показывают, что при небольших деформациях их значения достаточно близки друг к другу, при пластической деформации – до $\varepsilon_i \approx 0.5$ (рис.1). Следовательно, в этих случаях вместо ε_{eq} можно использовать легко определяемые данные ε_i . При этом получено множество значений безразмерных меридиональных $\bar{\sigma}_m$ и окружных $\bar{\sigma}_\theta$ напряжений труб, а также множество значений изменения окружной деформации ε_θ , интенсивности деформаций ε_i и пористости ν в зависимости от относительного радиуса трубы r/r_0 , где r_0 – средний начальный радиус трубы у входа в матрицу.

Отметим, что решение [1], в отличие от исследований, проведённых в [2,3] с применением уравнений теории течения пористых материалов, является более простым и легко применимо на практике. Следовательно, проводимые в этом направлении исследования весьма актуальны.

Целью работы является исследование процесса прессования спеченной тонкостенной трубы в конической матрице путем проведения сравнительного анализа упрощённого метода волочения.

Оценка деформированного и напряженного состояний трубы. В обоих случаях труба с начальным средним радиусом r_0 (рис.2), проходя сквозь коническую матрицу, утончается, приобретая радиус r_1 . Допустим, что толщина стенки трубы не изменяется.

Основной деформацией сжимающей трубы является окружная:

$$\bar{\varepsilon}_\theta = \ln \left(\frac{r}{r_0} \right), \quad (1)$$

где r – текущий средний радиус. В этом случае значения главных деформаций будут: $\varepsilon_1 = \bar{\varepsilon}_m = -\bar{\varepsilon}_\theta$, $\varepsilon_2 = \bar{\varepsilon}_v = 0$ и $\varepsilon_3 = \bar{\varepsilon}_\theta$ (где $\bar{\varepsilon}_m$ и $\bar{\varepsilon}_v$ – логарифмические деформации по меридиональным и нормальным к поверхности трубы направлениям), а интенсивность деформаций ε_i определяется по следующей формуле [4]:

$$\varepsilon_i = (\sqrt{2/3}) \sqrt{(\bar{\varepsilon}_m - \bar{\varepsilon}_v)^2 + (\bar{\varepsilon}_v - \bar{\varepsilon}_\theta)^2 + (\bar{\varepsilon}_\theta - \bar{\varepsilon}_m)^2} = (2/\sqrt{3}) |\bar{\varepsilon}_\theta| = (1.155) \ln(r_0/r). \quad (2)$$

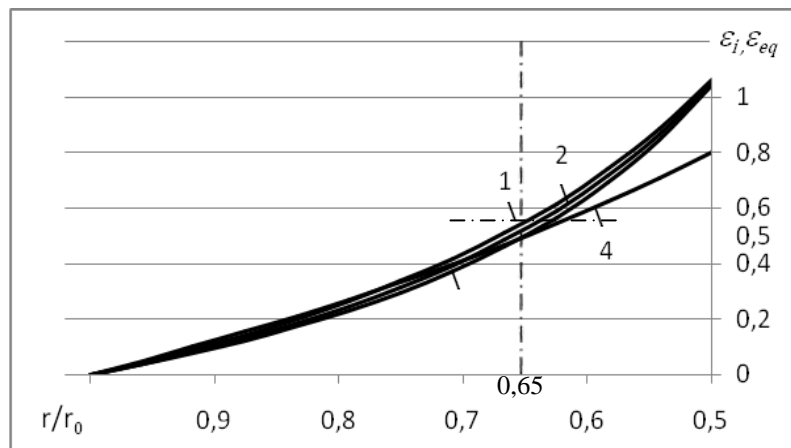


Рис. 1. Графики ε_i и ε_{eq} при разной степени деформации трубы, при небольших деформациях ($r/r_0=0,65$ слева) значения ε_i и ε_{eq} достаточно близки

Напряженное состояние во всех точках трубы плоское, а меридиональное σ_m и окружное σ_θ напряжения являются главными напряжениями:

- при волочении: $\sigma_1 = \sigma_m$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$; (3)

- при прессовании: $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = \sigma_m$, $\sigma_3 = \sigma_\theta$. (4)

Как видим, при волочении трубы меридиональное напряжение положительное (растягивающее), а при прессовании - отрицательное (сжимающее).

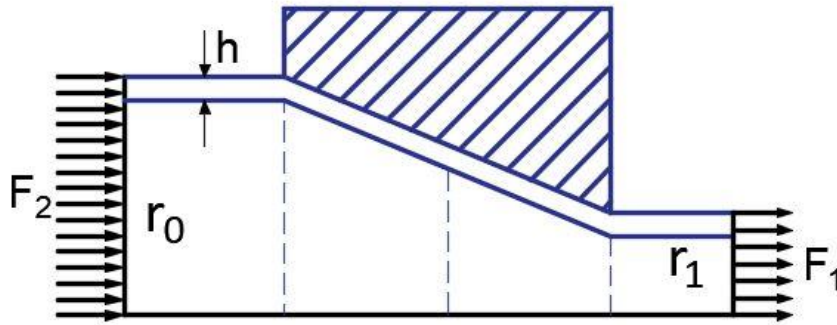


Рис. 2. Расчетная схема деформирования трубы: в случае воздействия только силы F_1 происходит волочение, а в случае воздействия только силы F_2 - прессование

Уравнения равновесия (УР) и условия пластичности (УП) при решении задач волочения и прессования трубы. УР при деформировании тонкостенной цилиндрической трубы в конической матрице следующие [4]:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r h) - \sigma_\theta h + \frac{p_m r}{\sin \alpha} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = -\frac{p_v}{h}, \quad (6)$$

Где $\rho_\theta = r / \cos \alpha$ - радиус кривизны сечения трубы конической поверхностью, перпендикулярной к дуге меридионала; r - радиус окружности в сечении плоскостью, перпендикулярной коси трубы; h - толщина стенки трубы; p_m и p_v - интенсивности распределенной контактной нагрузки на внешнюю поверхность трубы соответственно в меридиональном и нормальном направлениях; α - угол между касательной к меридиану и осью трубы.

Для составления УП используем упрощенный метод из [5]:

1. При волочении для трубы используем следующее приближенное УП Мизеса [1, 5]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k \sigma_T, \quad (7)$$

где с учетом (3) получено

$$\sigma_m - \sigma_\theta = k \sigma_T, \quad (7a)$$

k - коэффициент Лодэ; σ_T - предел текучести материала.

2. При прессовании, учитывая приближенное УП Мизеса (4), уравнение (7) примет следующий вид [6]:

$$\sigma_\theta = -k \sigma_T. \quad (7b)$$

Особенности решения задачи при волочении трубы. При волочении трубы решение уравнений равновесия (5) и (7a) представляется в следующем виде [5]:

$$\frac{d\sigma_m}{\sigma_m \mu \cot \alpha - k \sigma_T (1 + \mu \cot \alpha)} = \frac{dr}{r}, \quad (8)$$

после интегрирования которого для определения безразмерного меридионального напряжения $\bar{\sigma}_m$ получим

$$\bar{\sigma}_m = \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha}\right) \left\{1 - \left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \cot \alpha}\right\}, \quad (9)$$

где μ - коэффициент трения;

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_m}{k \sigma_T}. \quad (10)$$

Отметим, что решить задачу с помощью (9) при отсутствии трения ($\mu = 0$) невозможно, так как μ находится в знаменателе. Для этого необходимо преобразовать его.

Введём обозначение:

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \cot \alpha} = a \quad (11)$$

и логарифмируем его:

$$-\mu \cot \alpha \left(\ln \frac{r_0}{r}\right) = \ln a.$$

В результате получим

$$a = \exp\left(-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}\right) \quad (12)$$

Подставив значение a из (12) в (11), получим

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha} = e^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}. \quad (13)$$

Далее, разложив $e^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}$ в ряд и используя два первых члена согласно следующей формуле [7]:

$$e^{-x} = 1 - \frac{x}{1!},$$

получим

$$e^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}} = 1 - \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}{1!}.$$

Следовательно, (13) примет следующий вид:

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{-\mu \operatorname{ctg} \alpha} = 1 - \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}}{1!}.$$

Подставив его в (9), получим

$$\bar{\sigma}_m = \left(1 + \frac{1}{\mu \operatorname{ctg} \alpha}\right) \left(\mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r}\right).$$

Далее преобразуем ее к виду

$$\bar{\sigma}_m = \mu \operatorname{ctg} \alpha \ln \frac{r_0}{r} + \ln \frac{r_0}{r}. \quad (14)$$

В случае отсутствия трения, когда $\mu = 0$, из (14) получится приведенная в [5] формула

$$\bar{\sigma}_m = \ln \frac{r_0}{r}. \quad (15)$$

Что касается определения безразмерной величины окружного напряжения $\bar{\sigma}_\theta$ при волочении, то используется формула (7а):

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{k \sigma_T}. \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_m - 1. \quad (17)$$

Значения меридионального σ_m и окружного σ_θ фактических напряжений для различных материалов, имеющих важное практическое значение, определяются на основе (10) и (16):

$$\sigma_m = \bar{\sigma}_m k \sigma_T \text{ и } \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta k \sigma_T. \quad (18)$$

Что касается случая спеченных труб, то вместо (18) необходимо использовать УП пористых материалов, приведенные в [2]. В результате уравнения (18) примут вид

$$\sigma_m = \bar{\sigma}_m (1 - \nu_0)^{n+0.5} k \sigma_T \text{ и } \sigma_\theta = \bar{\sigma}_\theta (1 - \nu_0)^{n+0.5} k \sigma_T. \quad (19)$$

Следовательно, для определения компонентов напряженного состояния при решении задачи волочения спеченной трубы в конической матрице без контактного трения необходимо использовать систему уравнений (15), (17) и (19).

Решение задачи для прессования трубы. Используя уравнения равновесия (5) и (6) и УП (7б), получим следующее дифференциальное уравнение решения задачи:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_m r) + (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \sigma_T = 0,$$

решение которого при граничном условии (когда $r = r_1, \bar{\sigma}_m = 0$) (рис. 2) проводится по следующей формуле определения безразмерного меридионального напряжения $\bar{\sigma}_m$:

$$\bar{\sigma}_m = -(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) (1 - r_1/r). \quad (20)$$

Что касается определения безразмерного окружного напряжения $\bar{\sigma}_\theta$, то для этого используется формула (7б):

$$\bar{\sigma}_\theta = -1. \quad (21)$$

Таким образом, для определения безразмерных компонентов напряженного состояния при прессовании трубы используются формулы (20) и (21).

Определение пористости при прессовании спеченных труб. Для определения пористости при прессовании спеченных труб используется следующая формула определения текущей пористости V деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТПМ) [2, 8]:

$$v = 1 - (1 - \nu_0) \exp\left(-\frac{9\nu_0^m \sigma_0 \varepsilon_{\theta q}}{(1 - \nu_0)^{3m} \sigma_{\theta q}}\right), \quad (22)$$

Где v_0 - начальная пористость материала; m и n - параметры пористости материала; $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ - среднее напряжение.

Предположим, что материал неупрочняемый, т.е. $\sigma_{\text{ср}} = \sigma_{\text{Тв}}$, и в соответствии с [1] эквивалентную деформацию заменим интенсивностью деформаций $\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_i$.

Численные расчеты были произведены в программной среде MS EXCEL. В табл. 1 и 2 приводятся данные изменения компонентов напряженно-деформированного состояния трубы в случаях отсутствия ($\mu = 0, \alpha = 14^\circ, c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1$) и наличия ($\mu = 0.1, \alpha = 14^\circ, c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1.4$) трения и изменения значений начальной пористости ($v_{10}=0.1, v_{20}=0.2$ и $v_{30}=0.3$) материала в конической матрице, в зависимости от его относительного радиуса r/r_0 , приследующих заданных значениях параметров пористости материала: $m = 1, n = 0.25$.

Таблица 1

Данные прессования трубы в случае наличия трения при $c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1.4$

r/r_0	$\bar{\varepsilon}_\theta$	$\bar{\varepsilon}_i$	r_1/r	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{\sigma}_0$	v_1	v_2	v_3
1	0	0	0.6	-0.560	-0.520	0.1	0.2	0.3
0.98	-0.020	0.023	0.612	-0.543	-0.514	0.089	0.179	0.270
0.96	-0.041	0.047	0.625	-0.525	-0.508	0.079	0.158	0.238
0.94	-0.062	0.071	0.638	-0.506	-0.502	0.068	0.137	0.206
0.92	-0.083	0.096	0.652	-0.487	-0.496	0.057	0.114	0.172
0.9	-0.105	0.122	0.667	-0.467	-0.489	0.046	0.092	0.137
0.88	-0.128	0.148	0.682	-0.445	-0.482	0.035	0.069	0.100
0.86	-0.151	0.174	0.698	-0.423	-0.474	0.025	0.046	0.063
0.84	-0.174	0.201	0.714	-0.400	-0.467	0.014	0.023	0.025
0.82	-0.198	0.229	0.732	-0.376	-0.459	0.003	-0.001	-0.014
0.8	-0.223	0.258	0.75	-0.35	-0.450	-0.008	-0.024	-0.054

Таблица 2

Данные прессования трубы в случае отсутствия трения при $c = 1 + \mu \text{ctg} \alpha = 1$

r/r_0	$\bar{\varepsilon}_\theta$	$\bar{\varepsilon}_i$	r_1/r	$\bar{\sigma}_m$	$\bar{\sigma}_0$	v_1	v_2	v_3
1	0	0	0.6	-0.400	-0.467	0.1	0.2	0.3
0.98	-0.020	0.023	0.612	-0.388	-0.463	0.090	0.181	0.273
0.96	-0.041	0.047	0.625	-0.375	-0.458	0.081	0.162	0.245
0.94	-0.062	0.071	0.638	-0.362	-0.454	0.071	0.143	0.215
0.92	-0.083	0.096	0.652	-0.348	-0.449	0.061	0.123	0.185
0.9	-0.105	0.122	0.667	-0.333	-0.444	0.051	0.102	0.153
0.88	-0.128	0.148	0.682	-0.318	-0.439	0.041	0.082	0.120
0.86	-0.151	0.174	0.698	-0.302	-0.434	0.031	0.060	0.086
0.84	-0.174	0.201	0.714	-0.286	-0.429	0.021	0.039	0.051
0.82	-0.198	0.229	0.732	-0.268	-0.423	0.011	0.017	0.015
0.8	-0.223	0.258	0.75	-0.250	-0.417	0.001	-0.005	-0.022

На рис. 3 показаны кривые изменения пористости материалов для тонкостенных труб зависимости от r/r_0 при начальных значениях пористости 10, 20 и 30%.

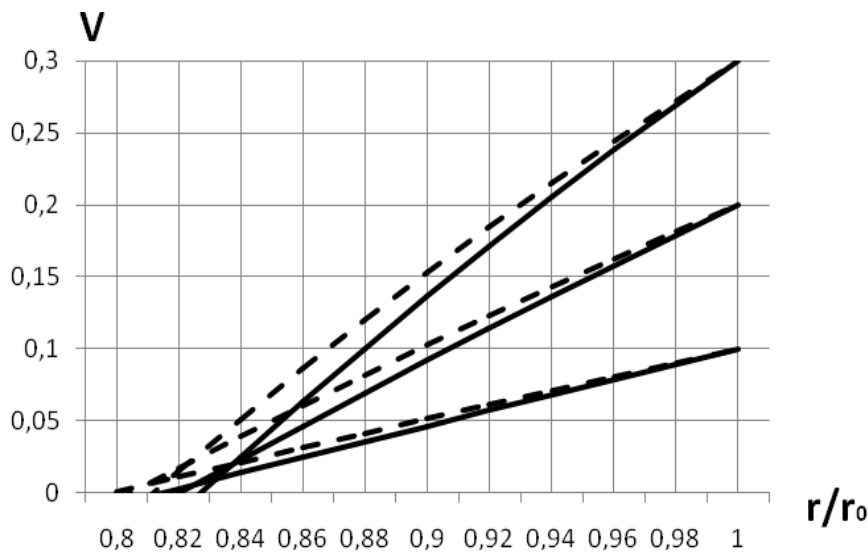


Рис. 3. Кривые изменения начальной пористости $v_0 = 10, 20$ и 30% в зависимости от r/r_0 в случаях: $f = 0$ (пунктир) и $f = 0.1$ (сплошная линия)

Данные табл. 1 и 2, а также рис. 3 показывают, что в случае наличия контактного трения уплотнение материала происходит более интенсивно. Пористость материалов становится нулевой при интенсивности деформаций ε_i в пределах 21,9...25,8%, что соответствует величинам относительных радиусов r/r_0 интервала 0,8275...0,8.

Заключение

1. Исследование напряженно-деформированного состояния процесса прессования труб в конической матрице при отсутствии и наличии трения проводится путем сравнительного анализа упрощенного метода решения задачи волочения.

2. Обосновывается упрощение основного уравнения равновесия при решении задачи волочения трубы в случае отсутствия контактного трения, а при решении задачи прессования выбирается более простое условие пластичности.

3. При прессовании спеченных труб для определения пористости используется формула деформационной теории пластичности пористых материалов. При этом вместо $\varepsilon_{\text{вк}}$ используются легко определяемые данные ε_i , которые при небольших деформациях достаточно близки значениям $\varepsilon_{\text{вк}}$.

4. Численные расчеты производились в программной среде MS EXCEL при начальной пористости материала трубы 10, 20 и 30%. Определены безразмерные меридиональные, окружные и средние напряжения труб, а также величины изменения интенсивности деформаций текущей пористости материала в зависимости от r/r_0 .

5. Графики пористости материала из тонких труб различной пористости показывают, что вид кривых изменений в зависимости от r/r_0 одинаков, и пористость становится нулевой при интенсивности деформаций ε_i в пределах 21,9...25,8%. При этом в случае наличия контактного трения уплотнение материала происходит более интенсивно.

Литература

1. Петросян Г.Л., Маргарян М.А., Варданян Г., Бабаян А.А. Исследование процесса волочения тонкостенной спеченной трубы через коническую матрицу // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. - Ереван, 2019. - Том 72, N1. - С.5-14.
2. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов.- М.: Metallurgia, 1988.-153с.
3. Petrosyan G.L., Hambardzumyan A.F. Investigation of porous materials processing in conic dies // NATO Workshop. Recent Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Process, Kiev, 2000.- IOS Press, Amsterdam. NATO Science. Series III.- 2001.- Vol. 176.- P.204-216.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975.- 400 с.
5. Джонсон У., Меллор П.Б. Теория пластичности для инженеров. - М.: Машиностроение, 1979.- 567 с.
6. Сторожев М.Б., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. -М.: Машиностроение, 1977. -423с.
7. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы.- М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983.- 173 с.
8. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Левонян Г.Л. Усовершенствование инженерного метода использования формулы для определения пористости спеченных материалов // Материалы секции <<Наука и технологии будущего>> Международного конгресса, посвященного 160-летию со дня рождения выдающегося русского инженера В.Г. Шухова, 17-18 апреля 2014 года. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.- С. 211-217.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2019

УДК: 539.3 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.2

Г.В. Габрусев, І.Ю. Габрусєва, Т.Б. Пиндус**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
ТИСК ПАРАБОЛІЧНОГО ШТАМПА НА ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИЙ ШАР**

Наведено розв'язок контактної задачі про взаємодію параболічного штампа із попередньо напруженим шаром. Система парних інтегральних рівнянь, що при цьому отримується, розв'язується за допомогою подання шуканих функцій напружень у вигляді відрізка ряду за функціями Бесселя з невідомими коефіцієнтами та подальшим отриманням скінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь для їх знаходження. На основі отриманого напружено-деформованого стану проаналізовано вплив форми штампа на контактні напруження.

Ключові слова: контактна взаємодія, контактні напруження, параболічний штамп, шар, початкові деформації

Г.В. Габрусев, И.Ю. Габрусєва, Т.Б. Пиндус**ДАВЛЕНИЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ШТАМПА НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫЙ СЛОЙ**

Приведено решение контактної задачі о взаимодействиі параболіческого штампа из предварительно напружєнным слоем. Система парных интегральных уравнений относительно неизвестной функции напряжений решается при помощи представления этой функции отрезком ряда по функциям Бесселя из неизвестными коэффициентами и сведением их к системе линейных алгебраических уравнений для нахождения коэффициентов. На основании полученного напряженно-деформированного состояния проанализировано влияние формы штампа на контактные напряжения.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, контактные напряжения, параболіческий штамп, слой, начальные деформации

H. Habrusiev, I. Habrusieva, T. Pyndus**PRESSURE OF PARABOLIC PUNCH ON PRESTRESSED LAYER**

While designing modern engineering structures in many cases of engineering practice it is important to know the distribution of stresses and strains occurring on bodies contact taking into account initial stresses and strains and contact body shapes. The stress-strain state (SSS) of prestress layer while contacting with parabolic punch is investigated in this paper. The problem is solved within the limits linear elasticity theory. The required SSS is presented in the form of Hankel integral. Satisfaction of the boundary problem conditions results in paired integral equation relatively to the function determining the contact stresses under the die. These equations are solved by means of numerical method. The influence of the die shape and initial layer strains on the contact stresses value and the vertical displacements of the stressed body points is investigated.

Key words: contact interaction, contact stresses, parabolic punch, layer, initial deformation

Актуальність теми. Визначення контактних напружень і деформацій при взаємодії жорстких штампів з пружною плитою є важливим завданням при проектуванні деталей машин та елементів споруд. Зокрема, при оцінці міцності залізобетонних перекриттів, монолітних фундаментних плит у будівництві, дорожнього покриття тощо. Щоб мінімізувати похибку розрахунків, необхідно враховувати максимальну кількість чинників, що впливають на контактну взаємодію. Початкові деформації, від яких безпосередньо залежать контактні напруження та переміщення, є одним із ключових факторів.

Аналіз відомих результатів досліджень. Питаннями взаємодії тіл із наявними залишковими деформаціями займалося багато вчених, зокрема й вітчизняних. У загальному постановка таких задач вимагає залучення апарату нелінійної теорії пружності, проте при досить великих початкових деформаціях можна обмежитися її лінеаризованим варіантом [1].

Незважаючи на збільшення кількості досліджень, присвячених контактній взаємодії тіл з попередньо напруженим станом [2-4], задача про тиск параболічного штампа на закріплену на жорсткій основі попередньо напружену товсту плиту досі не розв'язана для стисливих і нестисливих тіл у загальному вигляді при довільній структурі пружного потенціалу.

Постановка задачі. Постановку та розв'язання задачі проведемо в рамках лінеаризованої теорії пружності. Розглянемо жорсткий штамп утворений обертаням вітки параболи із параметром R та відрізка прямої, яка перпендикулярна до осі параболи і проходить через її вершину, навколо спільної осі, що паралельна до осі параболи. Штамп поступально без обертання та тертя втискується постійною силою P у попередньо напружений шар товщиною h , закріплений на жорсткій основі.

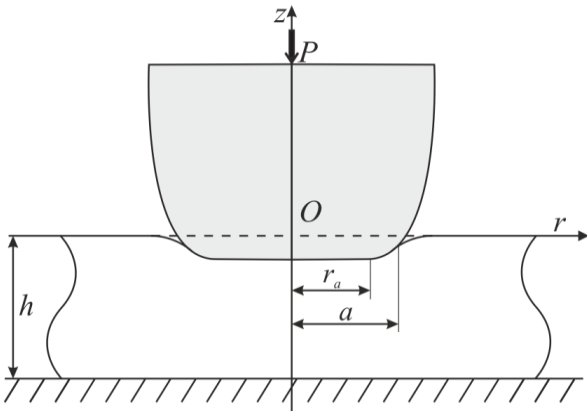


Рис. 1. Схема контактної взаємодії параболічного штампа та шару.

Виберемо циліндричну систему координат (O, r, θ, z) так, щоб координатна площина (r, O, θ) збігалася з верхньою граничною площиною шару, а вісь Oz – з віссю симетрії штампа (рис. 1).

Вважатимемо відомим радіус ділянки контакту a . Виходячи із формулювання задачі, можна описати функцію, обертанням графіка якої навколо осі Oz утворено штамп

$$W(r) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq r_a; \\ \frac{1}{2R}(r - r_a)^2, & r_a < r. \end{cases}$$

Граничні умови поставленої задачі мають вигляд

$$Q_{3r}(r, 0) = 0, \quad 0 \leq r < \infty; \quad (1)$$

$$Q_{33}(r, 0) = 0, \quad a \leq r; \quad (2)$$

$$u_3(r, 0) = \omega(r), \quad 0 \leq r \leq a; \quad (3)$$

$$u_r(r, -h) = 0, \quad 0 \leq r < \infty; \quad (4)$$

$$u_3(r, -h) = 0, \quad 0 \leq r < \infty. \quad (5)$$

Функція $\omega(r)$ описує переміщення точок верхньої граничної площини пружного шару на ділянці його контакту з жорстким штампом. А тому, виходячи із вигляду функції $W(r)$, можна записати:

$$\omega(r) = \begin{cases} \omega(a) - \frac{(a-r)^2}{2R}, & 0 \leq r \leq r_a; \\ \omega(a) - \frac{1}{2R}[(a-r_a)^2 - (r-r_a)^2], & r_a < r \leq a. \end{cases} \quad (6)$$

Розв'язання задачі. Будемо вважати залишкові напруження, наявні у шарі, однорідними. Тому можна використати наступні вирази для компонентів тензора напружень і вектора переміщень [1]

$$Q_{3r}(r, z) = -c_{31} \int_0^{\infty} \alpha^3 \{ A_1 sh(\alpha z) + A_2 [s_0 sh(\alpha z) + \alpha z ch(\alpha z)] + B_1 ch(\alpha z) + B_2 [s_0 ch(\alpha z) + \alpha z sh(\alpha z)] \} J_1(\alpha r) d\alpha; \quad (7)$$

$$Q_{33}(r, z) = c_{33} \int_0^{\infty} \alpha^3 \{ A_1 ch(\alpha z) + A_2 [sch(\alpha z) + \alpha z sh(\alpha z)] + B_1 sh(\alpha z) + B_2 [ssh(\alpha z) + \alpha z ch(\alpha z)] \} J_0(\alpha r) d\alpha;$$

$$u_r(r, z) = - \int_0^{\infty} \alpha^2 \{ A_1 ch(\alpha z) + A_2 [ch(\alpha z) + \alpha z sh(\alpha z)] + B_1 sh(\alpha z) + B_2 [sh(\alpha z) + \alpha z ch(\alpha z)] \} J_1(\alpha r) d\alpha;$$

$$u_3(r, z) = m \int_0^{\infty} \alpha^2 \{ A_1 sh(\alpha z) + A_2 [s_1 sh(\alpha z) + \alpha z ch(\alpha z)] + B_1 ch(\alpha z) + B_2 [s_1 ch(\alpha z) + \alpha z sh(\alpha z)] \} J_0(\alpha r) d\alpha. \quad (8)$$

Константи c_{31} , c_{33} , m , s , s_0 , s_1 залежать від характеру пружного потенціалу та підбираються у кожному випадку окремо [1]. Невідомі функції A_1 , B_1 , A_2 , B_2 визначаються з граничних умов задачі.

На верхній граничній площині шару при $z = 0$ зі співвідношень (7) – (8) отримаємо

$$Q_{33}(r, 0) = c_{33} \int_0^{\infty} \alpha^3 \{A_1 + A_2 s\} J_0(\alpha r) d\alpha; \quad (9)$$

$$Q_{3r}(r, 0) = -c_{31} \int_0^{\infty} \alpha^3 \{B_1 + B_2 s_0\} J_1(\alpha r) d\alpha; \quad (10)$$

$$u_3(r, 0) = m \int_0^{\infty} \alpha^2 \{B_1 + B_2 s_1\} J_0(\alpha r) d\alpha. \quad (11)$$

На нижній граничній площині шару при $z = -h$ маємо

$$u_r(r, -h) = - \int_0^{\infty} \alpha^2 \{A_1 ch(\alpha h) + A_2 [ch(\alpha h) + \alpha h sh(\alpha h)] + \\ - B_1 sh(\alpha h) - B_2 [sh(\alpha h) + \alpha h ch(\alpha h)]\} J_1(\alpha r) d\alpha; \quad (12)$$

$$u_3(r, -h) = m \int_0^{\infty} \alpha^2 \{-A_1 sh(\alpha h) + A_2 [-s_1 sh(\alpha h) - \alpha h ch(\alpha h)] + \\ + B_1 ch(\alpha h) + B_2 [s_1 ch(\alpha h) + \alpha h sh(\alpha h)]\} J_0(\alpha r) d\alpha. \quad (13)$$

Вимагаючи виконання граничної умови (1), із рівності (10) отримуємо співвідношення між функціями B_1 та B_2

$$B_1 + B_2 s_0 = 0; \Rightarrow B_1 = -s_0 B_2. \quad (14)$$

Підставивши (14) у співвідношення (12) – (13) та задовольнивши граничні умови (4) – (5), матимемо систему рівнянь відносно невідомих A_1 та A_2

$$\begin{cases} A_1 ch(\alpha h) + A_2 [ch(\alpha h) + \alpha h sh(\alpha h)] = B_2 [\alpha h ch(\alpha h) + (1 - s_0) sh(\alpha h)]; \\ A_1 sh(\alpha h) + A_2 [s_1 sh(\alpha h) + \alpha h ch(\alpha h)] = B_2 [(s_1 - s_0) ch(\alpha h) + \alpha h sh(\alpha h)]. \end{cases} \quad (15)$$

Розв'язавши (15), отримуємо вирази для A_1 та A_2 через функцію B_2

$$A_1 = \frac{(\alpha h)^2 - s_1 + s_0 ch^2(\alpha h) - s_0 s_1 sh^2(\alpha h)}{(s_1 - 1) ch(\alpha h) sh(\alpha h) + \alpha h} B_2; \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{(s_1 - s_0) ch^2(\alpha h) - (1 - s_0) sh^2(\alpha h)}{(s_1 - 1) ch(\alpha h) sh(\alpha h) + \alpha h} B_2.$$

З урахуванням співвідношень (14) та (16) вирази (9) та (11) набувають вигляду:

$$Q_{33}(r, 0) = c_{33} (s - s_0) \int_0^{\infty} \frac{\alpha^3 B_2}{\Delta(\alpha)} J_0(\alpha r) d\alpha; \quad (17)$$

$$u_3(r, 0) = m (s_1 - s_0) \int_0^{\infty} \alpha^2 B_2 J_0(\alpha r) d\alpha; \quad (18)$$

$$\Delta(\alpha) = \frac{(s_1 - 1) sh(\alpha h) ch(\alpha h) + \alpha h}{(\alpha h)^2 - s_1 + (s_0 + s s_1 - s s_0) ch^2(\alpha h) - (s_0 s_1 + s - s s_0) sh^2(\alpha h)}.$$

Задовольнивши граничну умову (2), на основі (17) матимемо

$$c_{33} (s - s_0) \int_0^{\infty} \frac{\alpha^3 B_2}{\Delta(\alpha)} J_0(\alpha r) d\alpha = 0, \quad a \leq r. \quad (19)$$

Уведемо невідому функцію $x(r)$, $0 \leq r \leq a$, за допомогою якої продовжимо співвідношення (19) на проміжок $0 \leq r < \infty$

$$c_{33}(s-s_0) \int_0^{\infty} \frac{\alpha^3 B_2}{\Delta(\alpha)} J_0(\alpha r) d\alpha = x(r) \eta(a-r), \quad 0 \leq r < \infty, \quad (20)$$

де $\eta(r)$ – функція Гевісайда.

Функція $x(r)$ визначає розподіл контактних напружень під штампом. Урахувавши їх неперервність, а також рівність нулю на границі області контакту (при $r = a$), представимо $x(r)$ у вигляді відрізка узагальненого ряду Фур'є за функціями $J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right)$

$$Q_{33}(r, 0) = x(r) = \sum_{n=1}^N a_n J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right), \quad 0 \leq r \leq a, \quad (21)$$

де λ_n , $n = \overline{1, N}$ – додатні корені функції Бесселя $J_0(\lambda_n) = 0$; a_n – невідомі коефіцієнти.

Застосувавши формулу обернення інтегрального перетворення Ганкеля до співвідношення (20) та врахувавши представлення (21), отримуємо

$$\frac{\alpha^2 B_2}{\Delta(\alpha)} = \frac{1}{c_{33}(s-s_0)} \sum_{n=1}^N a_n \int_0^a r J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right) J_0(\alpha r) dr. \quad (22)$$

Увівши позначення

$$\Psi_n(\alpha) = \int_0^a r J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right) J_0(\alpha r) dr,$$

із (22) отримуємо

$$\alpha^2 B_2 = \frac{\Delta(\alpha)}{c_{33}(s-s_0)} \sum_{n=1}^N a_n \Psi_n(\alpha). \quad (23)$$

Підставивши співвідношення (23) у рівність (18), отримаємо

$$u_z(r, 0) = k_1 \sum_{n=1}^N a_n \int_0^{\infty} \Delta(\alpha) \Psi_n(\alpha) J_0(\alpha r) d\alpha, \quad k_1 = \frac{m(s_1 - s_0)}{c_{33}(s - s_0)}. \quad (24)$$

Вимагаючи виконання граничної умови (3) та врахувавши (24), знаходимо

$$k_1 \sum_{n=1}^N a_n \int_0^{\infty} \Delta(\alpha) \Psi_n(\alpha) \{J_0(\alpha r) - J_0(\alpha a)\} d\alpha = \omega^*(r), \quad (25)$$

$$\omega^*(r) = \begin{cases} -\frac{1}{2R}(r_a - a)^2, & 0 \leq r \leq r_a; \\ \frac{1}{2R}[(r_a - r)^2 - (r_a - a)^2], & r_a < r \leq a. \end{cases}$$

Помноживши співвідношення (25) на $r J_0\left(\frac{\lambda_q}{a} r\right)$ та проінтегрувавши отримані вирази по r від 0 до a , матимемо

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_0^{\infty} \Delta(\alpha) \Psi_n(\alpha) [\Psi_q(\alpha) - K_q J_0(\alpha a)] d\alpha = \frac{w_q}{k_1}, \quad q = \overline{1, N}; \quad (26)$$

$$K_q = \int_0^a r J_0\left(\frac{\lambda_q}{a} r\right) dr; \quad w_q = \int_0^a r \omega^*(r) J_0\left(\frac{\lambda_q}{a} r\right) dr.$$

Уведемо позначення

$$a_n = \frac{1}{2Rk_1} a_n^*, \quad (27)$$

з урахуванням якого із (26) отримуємо систему N лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих a_n^* .

Вираз для визначення фокального параметра R , що входить до співвідношення (27), знаходимо з умови рівноваги штампа

$$2\pi \int_0^a r \sigma_{zz}(r, 0) dr = -P. \quad (28)$$

Підставивши у (28) вирази (21) та (27), визначаємо

$$\frac{1}{2R} = \frac{k_1 P}{2\pi} \frac{-1}{\sum_{n=1}^N a_n^* K_n}, \quad (29)$$

з урахуванням (29), (27) із (21) матимемо формулу для визначення розподілу контактних напружень під штампом

$$Q_{33}(r, 0) = -\frac{P}{2\pi} \frac{\sum_{n=1}^N a_n^* J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right)}{\sum_{n=1}^N a_n^* K_n}. \quad (30)$$

На підставі співвідношень (18) та (27) знаходимо формулу для визначення вертикальних переміщень точок верхньої граничної площини шару

$$u_3(r, 0) = -\frac{k_1 P}{2\pi} \frac{\sum_{n=1}^N a_n^* \int_0^\infty \Delta(\alpha) \Psi_n(\alpha) J_0(\alpha r) d\alpha}{\sum_{n=1}^N a_n^* K_n}. \quad (31)$$

Числовий приклад. На рис. 2 та 3 наведено графіки функцій $\sigma^* = \frac{Q_{33}(r, 0)}{P}$ та

$u^* = \frac{u_3(r, 0)}{P}$, що характеризують розподіл контактних напружень (30) та вертикальних переміщень (31). У якості числового прикладу розглянуто випадок наявності у плиті пружного потенціалу гармонічного типу [1] та наявності в основі штампа плоскої ділянки при $h=1$, $a=1$. Крива 1 відповідає $r_a=0$, крива 2 – $r_a=0.2$, а крива 3 – $r_a=0.5$.

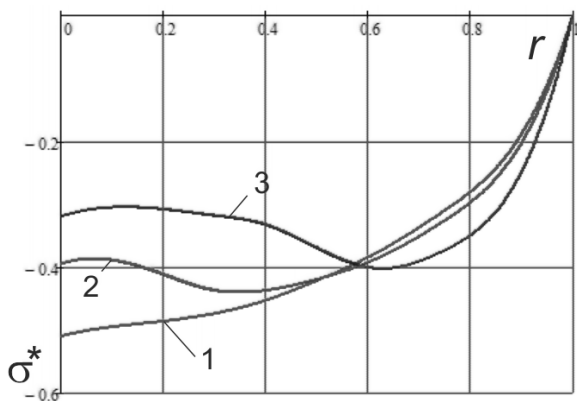


Рис. 2. Розподіл контактних напружень

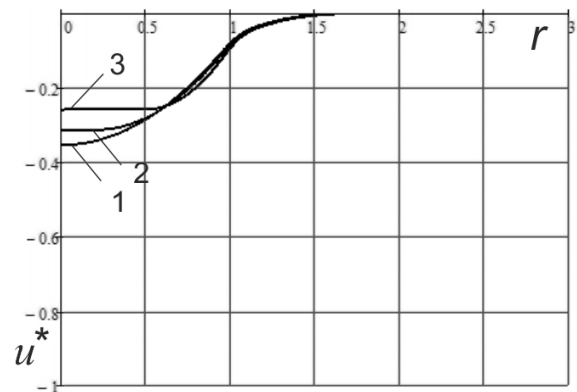


Рис. 3. Вертикальні переміщення

Висновки. У рамках лінеаризованої теорії пружності подано постановку та розв'язання осесиметричної контактної задачі про взаємодію параболічного штампа із попередньо напруженим шаром, закріпленим на жорсткій основі. Проаналізовано вплив наявності в основі жорсткого штампа плоскої ділянки. Встановлено, що форма штампа суттєво впливає на величину та характер розподілу контактних напружень. Зокрема, у параболічних штампах без плоскої ділянки в основі екстремальні значення контактних напружень виникають у центрі області

контакту. Поява плоскої ділянки спричиняє зсув точок екстремуму до краю ділянки контакту та зменшує їх абсолютну величину. Якщо $r_a = 0.2a$ (рис. 1), то абсолютна величина контактних напружень зменшується приблизно на 10%, якщо $r_a = 0.5a$ – на 12%. Вертикальні переміщення при цьому зменшуються на 9% та 11% відповідно. Одержані в роботі результати можуть використовуватися при розробці методик зменшення контактних напружень або вертикальних переміщень при проектуванні різного роду конструкцій.

Список використаної літератури:

1. Гузь О. М. Контактна взаємодія пружних тіл з початковими напруженнями: Навч. посібник / Гузь О. М., Бабич С. Ю., Рудницький В. Б. – К: Вища школа, 1995. – 304 с.
2. Шелестовський Б. Г. Взаємодія кільцевого штампа із попередньо напруженим шаром у випадку потенціалу Бартенєва-Хазановича / Б. Г. Шелестовський, І. Ю. Габрусєва // Вісник ТНТУ. – 2010. – Т. 15, №3. – С. 14 – 22.
3. Gabrusseva I. Yu. Contact interaction of a circular punch with a preliminarily stressed isotropic layer / B.G. Shelestovs`kyi, I.Yu. Gabrusseva // Journal of mathematical sciences. – 2012. – Vol.186, No.1. – P. 48 – 60.
4. Габрусєва І. Ю. Контактна задача для параболічного штампа та попередньо напруженого півпростору / І. Ю. Габрусєва // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – 2015. – Вип. 51. – С. 231 – 236.

Рецензенти:

Окрепкий Богдан Степанович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики Тернопільського національного економічного університету

Марущак Павло Орестович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

Стаття надійшла до редакції 12.11.2019

УДК 621.43 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.3

А.А. Дудніков, І.А. Дудніков, О.В. Горбенко, А.О. Келемеш, О.А. Бурлака
Полтавська державна аграрна академія

ПРОЦЕС І МЕХАНІЗМ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

В роботі досліджений процес і механізм абразивного зношування деталей ґрунтообробних машин з метою підвищення їх надійності

Ключові слова: процес зношування, механізм абразивного зношування, види зношування, інтенсивність, надійність.

А.А. Дудников, И.А. Дудников, А.В. Горбенко, А.А. Келемеш, А.А. Бурлака
Полтавская государственная аграрная академия

ПРОЦЕСС И МЕХАНИЗМ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

В работе исследован процесс и механизм абразивного изнашивания деталей почвообрабатывающих машин с целью повышения их надежности.

Ключевые слова: процесс изнашивания, механизм абразивного изнашивания, виды изнашивания, интенсивность, надежность.

A. Dudnikov, I. Dudnikov, O. Gorbenko, A. Kelemesh, O. Burlaka
Poltava State Agrarian Academy

PROCESS AND MECHANISM OF ABRASIVE WEAR

The work investigated the process and mechanism of abrasive wear of parts of tillage machines in order to increase their reliability.

Keywords: wear; wear process, abrasive wear mechanism, types of wear, intensity, reliability.

Постановка проблеми. Актуальність досліджень обумовлена необхідністю дослідження механізму абразивного зношування деталей сільськогосподарських машин з метою розробки і застосування ефективних технологічних процесів їх довговічності.

Тому досить актуальними є питання проведення досліджень по вивченню механізму абразивного зношування поверхонь деталей гальмування (зменшення) деформаційного і сталого процесів зношування.

У зв'язку з цим дослідження процесу протікання абразивного зношування сприяє зниженню зношуваності деталей машин і підвищенню їх надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контакт поверхонь деталей при наявності частинок, внаслідок чого відбувається абразивне зношування, значно відрізняється від контакту при терті шорстких поверхонь.

Абразивні частини сприяють активізації фізичних, фізико-механічних і хімічних процесів, які змінюють властивості і локальні об'єми поверхневого шару матеріалу деталей, як правило, в сторону зменшення міцності [1, 2].

В літературі представлено ряд досліджень [3, 4, 5] про вплив цілого ряду факторів (склад абразивних частинок, напруження в матеріалі деталей, навколишнє середовище та ін.), які в процесі експлуатації ґрунтообробних машин, погіршують їх технічні характеристики і працездатність.

Слід відмітити, що механізм протікання абразивного зношування матеріалу деталей ґрунтообробних машин досі залишається до кінця не реалізованим.

Актуальними є напрямки по дослідженню механізму абразивного зношування деталей ґрунтообробних машин з метою підвищення їх експлуатаційного ресурсу і якості обробки ґрунту.

Тому проведення досліджень процесу і механізму абразивного зношування деталей ґрунтообробних машин, є актуальним для агропромислового комплексу України [6].

Постановка завдань. Метою роботи є підвищення довговічності деталей ґрунтообробних машин за рахунок дослідження механізму їх абразивного зношування і використання зміцнюючої технології їх відновлення.

Викладення основного матеріалу. Абразивне зношування має широке розповсюдження. Багато робочих органів сільськогосподарських машин (диски копачів бурякозбиральних машин, плужні лемеші, диски сівалок та ін.) виконують свої службові функції в безпосередньому контакті з ґрунтом.

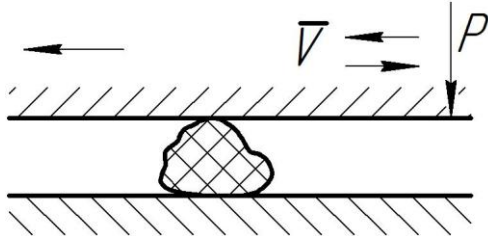
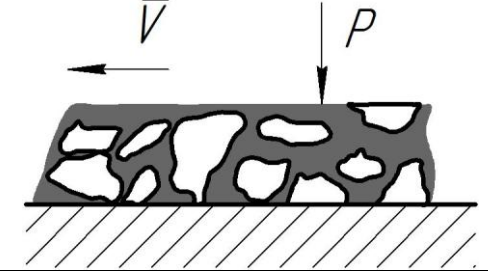
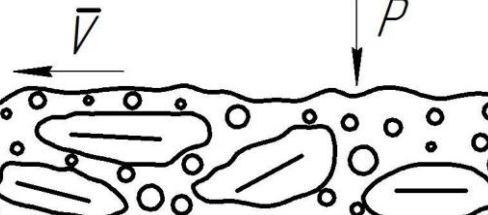
В реальних умовах зношування попадання твердих частин в контакт тертьових деталей і їх участь в розвитку зношування виключити практично неможливо, особливо для сільськогосподарських, будівельних, дорожніх машин.

Види зношування на нашу думку визначаються схемою фрикційного контакту, характером діючих сил і зовнішнім середовищем.

В таблиці 1 представлені схеми контактів і види зношування, які характерні для умов тертя при наявності в зоні тертя абразивних частин.

Таблиця 1.

Схеми контактів і види зношування при наявності абразивних частин

Схема фрикційного контакту	Зовнішнє середовище	Види зношування при наявності твердих частин
	Газ, рідина	Контактно-абразивне зношування при терті ковзання
	Мінеральні частини + рідина + органіка, + газ	Абразивне зношування при терті в об'ємі твердих частин
	Органіка + мінеральні частини + рідина + газ	Абразивне зношування ковзаючим контактом органічних частин

Оцінку абразивної зносостійкості матеріалів проводили при терті по шліфувальному папері з твердістю частин, що більше твердості матеріалу деталі. При випробуванні отримані дані залежності зносостійкості матеріалів від їх твердості, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Зносостійкість матеріалів при зношуванні абразивом

Матеріали	Твердість HV, МПа	Зносостійкість, хв./мм при дослідженні		
		кварц 0,4 мм	корунд 0,2 мм	кварцовий пил
Сталь ст.3	1200	25	9	20
Чавун СЧ 18	1800	23	8	26
Алюмінієвий сплав АЛ 9	1160	8	3	9

В реальних умовах зношування деталей дія абразивних частин створює в поверхневих шарах матеріалу деталей локальні осередки розвитку різних фізичних, фізико-хімічних і хімічних процесів, обумовлених складним напруженим станом мікрооб'ємів матеріалу і дією внутрішнього середовища.

Вказані фактори спонукають до протікання різних процесів: викривлення кристалічної решітки, переміщення дислокацій та ін.[7].

Загальна модель зношування може бути представлена в наступному вигляді:

$$N + F + v_T + R, \quad (1)$$

де N – нормальна складова сили; F – сила тертя; v_T – швидкість ковзання; R – сила різання.

Знак «+» означає одночасність дії факторів.

Нормальна складова сили N_i сила F при швидкості ковзання v_T створює складний напружений стан у мікрооб'ємах матеріалу, що сприяють розвитку локальних процесів зміцнення, зменшення зміцнення і руйнування об'єму матеріалу, поблизу до ділянок фрикційного контакту.

У виразі (1) вказані основні первинні фактори, що визначають розвиток процесів зношування і механізм руйнування мікрооб'ємів матеріалу.

Слід відмітити, що існують і інші первинні фактори, що впливають на розвиток і інтенсивність зношування (залишкові напруження в поверхневих шарах матеріалу деталі, шорсткість поверхні матеріалу, параметри обробки та ін.).

Абразивні частини при терті створюють в поверхневому шарі матеріалу деталі спектр контактних напружень, що ініціюють різні зміни в мікрооб'ємах матеріалу. Більша частина цих змін послаблює матеріал, що призводить до руйнування матеріалу.

В результаті механічної і викликаних цим теплової дії в матеріалі відбуваються дифузійні процеси, структурні і фазові перетворення, що змінюють щільність дислокацій, викривлення кристалічної решітки ґрати, створюються значні внутрішні напруги. Ці зміни впливають на характеристики міцності матеріалу деталей, знижуючи їх опір руйнуванню.

Таким чином, кінцевий акт абразивного зношування представляє собою руйнування продуктів взаємодії вихідного матеріалу деталі із зовнішнім середовищем і продуктами, що утворилися в результаті дії всіх факторів, які притаманні відповідному режиму тертя.

Проведені дослідження зносостійкості (табл. 2) показують, що при зношуванні матеріалів кварцовим пилом ряд зносостійкості змінився, що вказує про різний механізм зношування різними абразивними частинами.

Крупні кварцові частини округлених форм не викликають прямого руйнування матеріалів. Під дією цих частин мікрооб'єми матеріалу деталі деформуються пружно і пластично. Найбільш вірогідним процесом руйнування в цьому випадку, на нашу думку, буде багатоциклічне деформування в пластичній ділянці.

Через великі розміри кварцових частин (0,4 мм) в пластичну деформацію втягуються значні об'єми матеріалу, в яких можуть протікати процеси деформування, що призводять до крихкості і наступного руйнування матеріалу.

При більших об'ємах матеріалу, що деформується механізм його кришення і руйнування може бути суттєво різним. Це визначається різною природою ендогенних процесів, що розвиваються в поверхневому шарі матеріалу.

Ми вважаємо, що існує суттєва різниця між процесом і механізмом зношування.

При всіх видах зношування процеси руйнування мікрооб'ємів матеріалу в феноменологічному відношенні аналогічні: одноактні процеси руйнування в'язкого або крихкого характеру; багатоциклічні процеси руйнування – полікристалічний при пластичному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу або втомлюваний при пружному деформуванні мікрооб'ємів поверхневого шару матеріалу деталі.

Цього недостатньо для розуміння природи зношування оскільки процеси руйнування в залежності від властивостей матеріалів, що зношуються і умов тертя мають різні механізми: пряме руйнування може бути інтеркристалічним і транскристалічним.

Особливо різноманітні механізми руйнування мікрооб'ємів матеріалу при багатоциклічних процесах зношування, в тому числі при дії абразивних частин.

Загальне нагрівання поверхневого шару і деформування матеріалу прискорюють хімічні реакції, створюючи умови для дифузії зі швидкістю значно більшої, ніж при звичайних умовах.

Кожний матеріал по-своєму реагує на комплекс зовнішніх факторів, в зв'язку з чим багатоциклічний процес зношування може мати різний механізм руйнування матеріалу, оскільки поєднання матеріалів і умов зношування по всім зовнішнім факторам не має кількісних меж.

При абразивному зношуванні всіх видів суттєве значення має зменшення міцності матеріалів, що викликане дифузійно-активним воднем.

В умовах тертя, що характерні для деталей і робочих органів сільськогосподарських машин, відбувається інтенсивне наводнення їх поверхневих шарів.

При терті між металом і вологим ґрунтом або між різним матеріалом рослинного походження утворюється дифузійно-активний водень, що легко проникає в глибину металу.

Інтенсивність наводнення залежить від вологості ґрунту.

Водень є одним із найбільш агресивних агентів абразивного зношування деталей і робочих органів сільськогосподарських машин.

Диференціація понять про види, процеси і механізм абразивного зношування допомагає в рішенні деяких триботехнічних завдань.

Розгляд абразивного зношування як складного процесу дозволяє отримати об'єктивні дані про зносостійкість матеріалу і вести пошук нових композицій (табл. 3).

Таблиця 3.

Система досліджень матеріалів і деталей сільськогосподарських машин

Категорія досліджень	Об'єкти досліджень	Умови досліджень	Призначення досліджень	Результати досліджень
1. Імітація	Деталь, її фрагмент	Імітація фрикційної взаємодії деталей або фрагментів (з ґрунтом заданого механічного складу або із штучного середовища, подібного до ґрунту	Аналіз впливу конструктивних, матеріальних і технологічних факторів на формозміну леза; оцінка результатів	Характер формозміни леза; епюри зносу; динаміка зношування; енергетичні показники; умовна конструкційна зносостійкість; умовний ресурс
2. Натурні	Деталь, складальна одиниця	Реальні умови роботи деталі, складальної одиниці	Оцінка ресурсу деталі, складальної одиниці і енергетичних показників роботи	Конструкційна зносостійкість, енергетичні показники; якість виконання агротехнічних вимог; особливості формозміни в різних ґрунтово-кліматичних умовах; характеристика граничного стану

Висновки. Оцінку абразивної зносостійкості матеріалів потрібно виконувати в умовах, які забезпечують відтворення видів і механізмів зношування, що мають місце в реальних умовах роботи деталей.

Список використаних джерел:

1. Дудніков А.А., Келемеш А.О., Семчук Г.І., Єфремов С.Г., Забезпечення якості поверхні деталей при обробці тиском. Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха. Вип. 98. Т.2. 2013. 590 с.
2. Погорілий Л. Перспективні конструкції ґрунтообробних машин. Сільськогосподарська техніка України. 1988. №2. С.6-12.
3. Рибак Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин. Тернопіль : ВАТ «ТВПК», 2003. 323 с.
4. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М. : Машиностроение, 1991. 264 с.
5. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Т.1. Машини та обладнання для обробітку ґрунту. Харків : Око, 2001. 444 с.
6. Білоусько Я.К., Бурилко А.В., Галушко В.О. Проблеми реалізації технічної політики в агропромислового комплексі. Київ : ННЦ ІАЕ, 2007. 16 с.
7. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. М. : Металлургия, 1987. 340 с.

Стаття надійшла до редакції 16.10.2019

УДК [681.518.54+620.19](035) DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.4

С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська*Донбаська державна машинобудівна академія (м.Краматорськ)***ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ ЗА КІЛЬКОМА КІЛЬКІСНИМИ
ОЗНАКАМИ ОДНОЧАСНО**

Показано, що діагностика об'єктів машинобудування передбачає обґрунтування розширення застосовуваних фізичних ефектів, орієнтованих, в першу чергу, на неруйнівного контролю параметрів продукції машинобудування. На підставі досліджень, які показують перспективність експериментальних і теоретичних доказів, доведена доцільність пошуку підтвердження інформативності частотних спектрів резонансних акустичних сигналів досліджуваних об'єктів, порушених широкопалосними резонаторами рівній амплітуди в акустичному діапазоні. Надані приклади застосування широкопалосних випромінювачів наноамплітудних впливів на досліджувані об'єкти з метою акустичної спектроскопії для створення їх ідентифікаційних моделей. Для практичного використання експериментальних результатів для ідентифікації розмірних і фізико-механічних характеристик станів діагностованих об'єктів авторами застосовані нейромережні моделі. Такі моделі служать практичним цілям діагностики станів об'єктів на основі частотних спектрів власних резонансних коливань. Доведено, якщо діагностика об'єкта проводиться щодо опорного сигналу у вигляді широкопалосного впливу постійної амплітуди, то такий підхід дозволяє нормувати вихідні діагностичні сигнали щодо опорного сигналу. Представлені ідентифікаційні моделі, побудовані на нейромережному базисі, показали реальну можливість їх використання для створення системи діагностики об'єктів за кількома кількісними ознаками. Причому, кількість таких ознак, які можна контролювати одночасно, практично, не обмежена. Авторами роботи проведені додаткові дослідження, які показали можливість одночасного контролю не тільки геометричних характеристик об'єктів, а й їх фізико-механічних характеристик, включаючи показники напруженого стану, твердості і т.ін..

Ключові слова: акустичний резонанс, нейронні мережі, п'єзоелектричні елементи, контроль за кількома кількісними ознаками, діагностика.

S.V. Kovalevskyy, O.S. Kovalevska**IDENTIFICATION OF MECHANICAL ENGINEERING OBJECTS AT THE SAME TIME**

It is shown that the diagnostics of engineering facilities involves the justification for the expansion of the applied physical effects, oriented primarily to non-destructive testing of the parameters of engineering products. Based on studies that show the promise of experimental and theoretical evidence, the expediency of finding information on the frequency spectra of the resonant acoustic signals of the studied objects caused by broadband resonators of equal amplitude in the acoustic frequency range is given. Examples of the use of broadband emitters for nano-amplitude impacts on the studied objects with the aim of acoustic spectroscopy and the creation of their identification models are provided. For practical use of experimental results to identify dimensional characteristics of diagnosed objects, the authors applied neural network models. Such models serve the practical purposes of diagnosing the state of objects based on the frequency spectra of natural resonance oscillations. It is proved that if the object is diagnosed relative to the reference signal in the form of a broadband constant amplitude, then this approach allows normalizing the output diagnostic signals relative to the reference. Identification models based on a neural network basis are presented, which showed the real possibility of using them to create a system for diagnosing objects using several quantitative criteria. Moreover, the number of such signs that can be controlled simultaneously is practically unlimited. The authors of the work conducted additional studies that showed the possibility of simultaneous monitoring of not only the geometric characteristics of objects, but also their physical and mechanical characteristics, including indicators of stress state, hardness, etc.

Keywords: acoustic resonance, neural networks, piezoelectric elements, monitoring by several quantitative criteria, diagnostics.

С.В. Ковалевский, Е.С. Ковалевская**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПО НЕСКОЛЬКИМ
КОЛИЧЕСТВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ ОДНОВРЕМЕННО**

Показано, что диагностика объектов машиностроения предполагает обоснование расширения применяемых физических эффектов, ориентированных, в первую очередь, на неразрушающий контроль параметров продукции машиностроения. На основании исследований, которые показывают перспективность экспериментальных и теоретических доказательств, приведена целесообразность поиска подтверждения информативности частотных спектров резонансных акустических сигналов исследуемых объектов, вызванных широкополосными резонаторами равной амплитуды в акустическом диапазоне частот. Предоставлены примеры применения широкополосных излучателей для наноамплитудных воздействий на исследуемые объекты с целью акустической спектроскопии и создания их идентификационных моделей. Для практического использования экспериментальных результатов для идентификации размерных характеристик диагностируемых объектов авторами применены нейросетевые модели. Такие модели служат практическим целям диагностики состояний объектов на основе частотных спектров собственных резонансных колебаний. Доказано, если диагностика объекта проводится относительно опорного сигнала в виде широкополосного воздействия постоянной амплитуды, то такой подход позволяет нормировать выходные диагностические сигналы относительно опорного. Представлены идентификационные модели, построенные на нейросетевом базисе, которые показали

реальную возможность их использования для создания системы диагностики объектов по нескольким количественным признакам. Причем, количество таких признаков, которые можно контролировать одновременно, практически не ограничено. Авторами работы проведены дополнительные исследования, которые показали возможность одновременного контроля не только геометрических характеристик объектов, но и их физико-механических характеристик, включая показатели напряженного состояния, твердости и т.д.

Ключевые слова: акустический резонанс, нейронные сети, пьезоэлектрические элементы, контроль по нескольким количественным признакам, диагностика.

Розвиток методів діагностики об'єктів машинобудування передбачає обґрунтування розширення застосовуваних фізичних ефектів, орієнтованих, в першу чергу, на неруйнівного контролю параметрів продукції машинобудування. У зв'язку з цим особливий інтерес представляють методи, що засновані на обробці інформативних сигналів, які можуть мати місце при збудженні об'єктів діагностики для отримання відгуків у вигляді їх резонансних частотних спектрів [1,2,3]. У роботах [4,5,6] авторів представлені результати досліджень, які показують перспективність експериментальних і теоретичних доказів доцільності шукати подальші підтвердження інформативності частотних спектрів резонансних акустичних сигналів досліджуваних об'єктів, порушених широкосмуговими резонаторами рівній амплітуди в акустичному діапазоні. Мають місце приклади більш широкого застосування широкосмугових випромінювачів наноамплітудних впливів на досліджувані об'єкти з метою акустичної спектроскопії для створення їх ідентифікаційних моделей [7,8].

Основна частина

Для практичного використання експериментальних результатів для ідентифікації розмірних і фізико-механічних характеристик станів діагностованих об'єктів авторами застосовані нейромережні моделі [9, Помилка! Невідомий аргумент ключа.]. такі моделі служать практичним цілям діагностики станів об'єктів на основі частотних спектрів власних резонансних коливань. Ці спектри можуть бути отримані різними способами, починаючи від простих ударних впливів на об'єкт до безконтактних впливів із застосуванням електромагнітних полів.

Для реалізації такого підходу прийняті наступне:

- $W(f)$ – сигнал збудження об'єкта «білим шумом»;

- $R[W(f)]$ – реакція об'єкта на збудження «білим шумом»;

$X_k, X_1, \dots, X_r, \dots$ – властивості і параметри об'єкта (розмірні характеристики, напруження, температура і т. ін.) $R[W(f)] = F\{X_k, X_1, \dots, X_r, \dots\}$

Завданням діагностики і створення еталонної моделі об'єкта є визначення властивостей і параметрів об'єкта $X_k, X_1, \dots, X_r, \dots$ по реакції $R[W(f)]$ (рис.1).

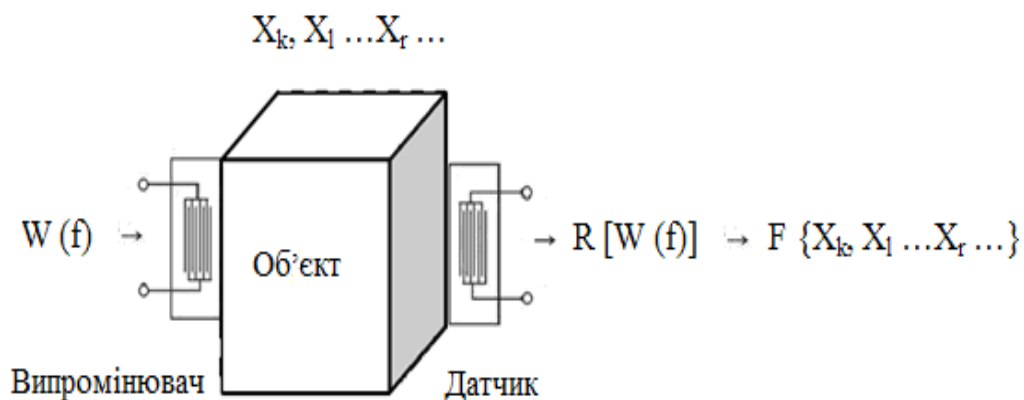


Рис. 1 Інформаційна модель визначення властивостей і параметрів об'єкта: $W(f)$ Object

$\rightarrow \rightarrow R[W(f)] \rightarrow F\{X_k, X_1 \dots X_r \dots\} \rightarrow X_k, X_1 \dots X_r$

Випромінювач і приймач діагностичного пристрою є оборотні п'єзоелектричні елементи, на які подаються і з яких знімаються посилюються сигнали. Оскільки діагностика об'єкта проводиться щодо опорного сигналу у вигляді широкосмугового впливу постійної амплітуди, то такий підхід дозволяє нормувати вихідні діагностичні сигнали щодо опорного сигналу.

Експериментальна частина

Для експериментальних підтверджень взаємозв'язку геометричних параметрів об'єктів і власних частотних спектрів використано набір експериментальних зразків з розмірними характеристиками згідно табл.1.

Таблиця 1

Лінійні розміри експериментальних зразків

	Порядковий номер експериментальних зразків									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a, мм.	7,6	7,6	7,7	7,8	7,8	7,9	7,8	7,8	7,8	7,8
B, мм.	25,3	26	25,3	25,6	26,2	27,2	25,4	27	26,2	25,6
L, мм.	12	12	11,9	12,1	12,1	11,7	12,1	12,2	12	12
d, мм.	5,5	5	5,4	5,1	5,5	5,2	5,2	5,2	5	5,4
e, мм.	18	17,5	18,2	16,4	17	16,2	17,6	18	17,6	15,7

Для кожного зразка отримані акустичні спектри за допомогою діагностичного пристрою, схема якого наведена на рис.2.

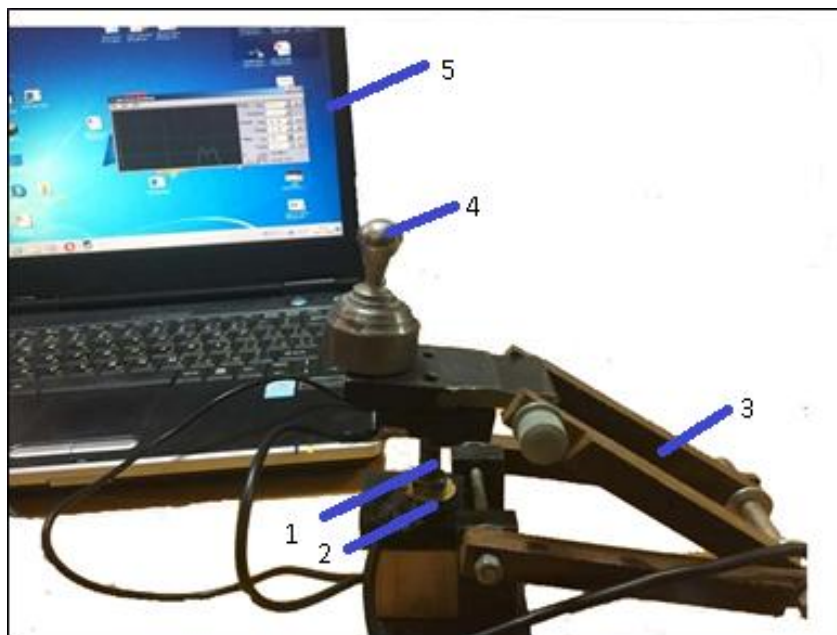


Рис.2 Експериментальний стенд: 1-зразок, 2- п'єзовипромінювач, 3-пристрій навантаження зразку, 4- постійний вантаж зразку, 5 – програмне забезпечення.

Отримані частотні спектри представлені на рис.3. А їх цифрові значення були підготовлені в форматі dbf для створення ідентифікаційної моделі за допомогою програмного пакета Neuro Pro 0,25.

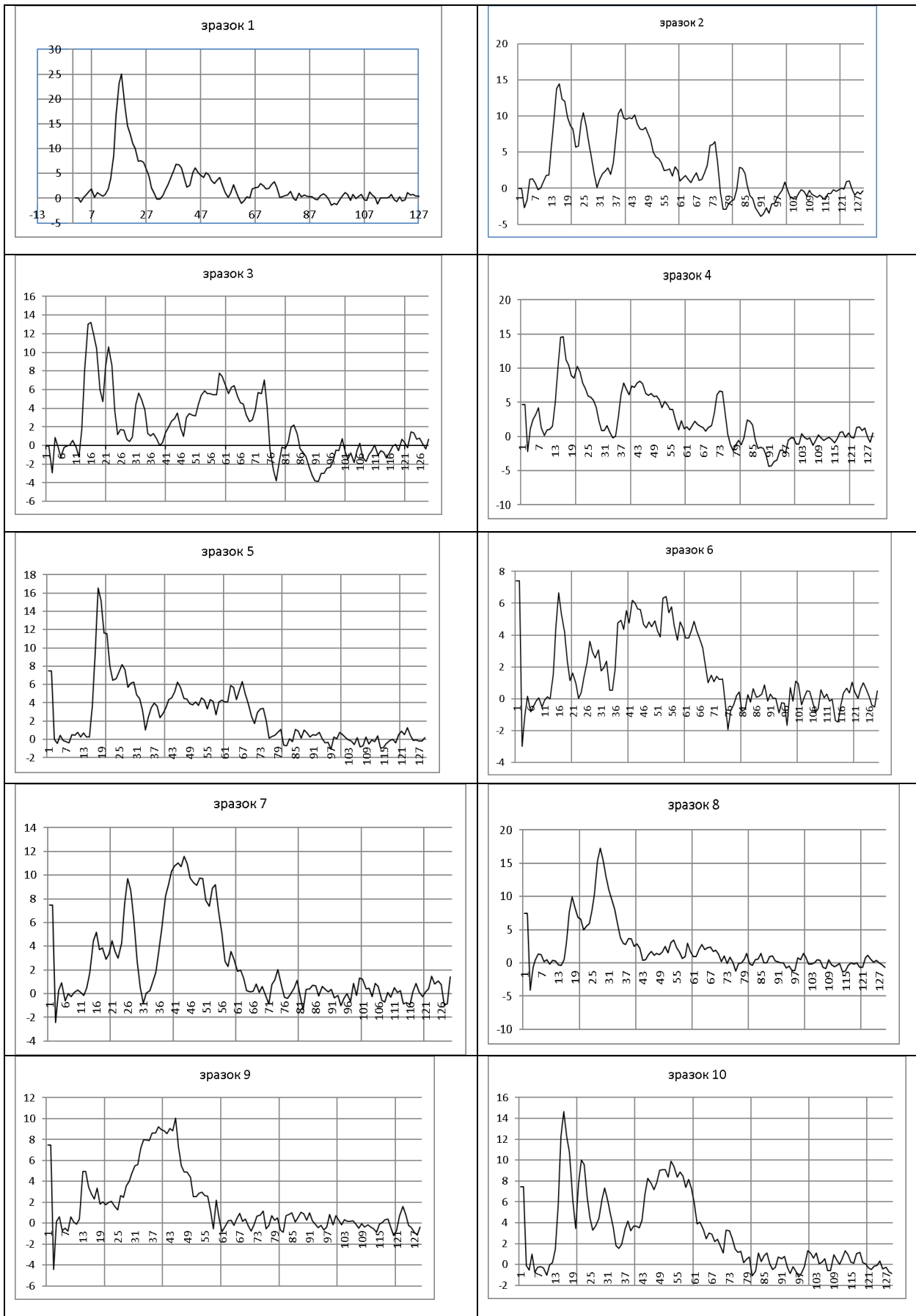


Рис.3 Акустичні спектрограми десяти зразків

В результаті обробки експериментальних даних з представленням нейромережної моделі у вигляді трьох шарової мережі, де перший шар включав – 100 нейроподібних елементів, другий шар – 50 і третій шар включав 20 штучних нейронів, отримано верифікаційний опис ідентифікаційної моделі:

Поля бази даних (вихідні симптоми):

X91

X94

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

a

B

C

d

e

Передобробка вхідних полів БД для подачі мережі:

$$X91 = (X91 - 1,665) / 2,585$$

$$X94 = (X94 - 1,335) / 1,135$$

Функціональні перетворювачі:

$$\text{Сігмоїда1 (A)} = A / (0,1 + |A|)$$

Синдроми 1-го рівня:

$$\text{Сіндром1}_1 = \text{Сігмоїда1} (-X94-1)$$

$$\text{Сіндром1}_2 = \text{Сігмоїда1} (0,1789215 * X91 - X94 + 0,7786909)$$

$$\text{Сіндром1}_3 = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,3760698 * X94 - 0,4292016)$$

$$\text{Сіндром1}_4 = \text{Сігмоїда1} (-X91 + 0,2269848 * X94 + 0,4247673)$$

$$\text{Сіндром1}_5 = \text{Сігмоїда1} (-X91 - 0,3228972 * X94 + 1)$$

$$\text{Сіндром1}_6 = \text{Сігмоїда1} (-0,5381316 * X91 - 0,8220743 * X94 + 1)$$

$$\text{Сіндром1}_7 = \text{Сігмоїда1} (1)$$

$$\text{Сіндром1}_8 = \text{Сігмоїда1} (0,3379285 * X91 + 0,6218256 * X94 - 0,8436443)$$

$$\text{Сіндром1}_9 = \text{Сігмоїда1} (-0,2617056 * X91 + X94 - 0,6350841)$$

$$\text{Сіндром1}_{10} = \text{Сігмоїда1} (-X91)$$

$$\text{Сіндром1}_{11} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,6191387 * X94 - 0,3530776)$$

$$\text{Сіндром1}_{12} = \text{Сігмоїда1} (-X91 - 0,5027313 * X94 + 1)$$

$$\text{Сіндром1}_{13} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,8285614 * X94)$$

$$\text{Сіндром1}_{14} = \text{Сігмоїда1} (0,2317552 * X91 + X94 - 1)$$

$$\text{Сіндром1}_{15} = \text{Сігмоїда1} (X91 - 0,2525339 * X94 - 0,4482068)$$

$$\text{Сіндром1}_{16} = \text{Сігмоїда1} (X91 - X94)$$

$$\text{Сіндром1}_{17} = \text{Сігмоїда1} (-X91 - 0,3821623 * X94 - 1)$$

Кінцеві синдроми:

$$a = 0,1945991 * \text{Сіндром1}_1 - 0,0468972 * \text{Сіндром1}_2 + 0,02980304 * \text{Сіндром1}_3 - 0,1515048 * \text{Сіндром1}_4 + \text{Сіндром1}_5 - \text{Сіндром1}_6 + 0,2092688 * \text{Сіндром1}_7 - 0,4198359 * \text{Сіндром1}_8 + 0,4460115 * \text{Сіндром1}_9 - 0,2297336 * \text{Сіндром1}_{10} + 0,3188157 * \text{Сіндром1}_{11} - 0,2057096 * \text{Сіндром1}_{12} + \text{Сіндром1}_{13} + 0,087403 * \text{Сіндром1}_{14} - 0,3707736 * \text{Сіндром1}_{15} - \text{Сіндром1}_{16} + \text{Сіндром1}_{17} + 0,2567663$$

$$B = -\text{Сіндром1}_1 - \text{Сіндром1}_2 - \text{Сіндром1}_3 - \text{Сіндром1}_4 + \text{Сіндром1}_5 - \text{Сіндром1}_6 - \text{Сіндром1}_7 - \text{Сіндром1}_8 - \text{Сіндром1}_9 + \text{Сіндром1}_{10} + 0,1587669 * \text{Сіндром1}_{11} - \text{Сіндром1}_{12} + \text{Сіндром1}_{13} - 0,02372073 * \text{Сіндром1}_{14} - \text{Сіндром1}_{15} - 0,1846073 * \text{Сіндром1}_{16} - \text{Сіндром1}_{17} - 1$$

$$C = \text{Сіндром1}_1 + \text{Сіндром1}_2 - \text{Сіндром1}_3 - \text{Сіндром1}_4 - \text{Сіндром1}_5 + \text{Сіндром1}_6 - 0,1520165 * \text{Сіндром1}_7 + \text{Сіндром1}_8 - 0,1046149 * \text{Сіндром1}_9 - 0,315931 * \text{Сіндром1}_{10} - \text{Сіндром1}_{11} + \text{Сіндром1}_{12} + 0,2087332 * \text{Сіндром1}_{13} - 0,3306485 * \text{Сіндром1}_{14} + \text{Сіндром1}_{15} - \text{Сіндром1}_{16} - 0,3866748 * \text{Сіндром1}_{17} + 0,008268885$$

$$d = \text{Сіндром1}_1 + \text{Сіндром1}_2 + \text{Сіндром1}_3 + 0,1147257 * \text{Сіндром1}_4 + \text{Сіндром1}_5 - \text{Сіндром1}_6 + 0,328462 * \text{Сіндром1}_7 - \text{Сіндром1}_8 + \text{Сіндром1}_9 - 0,06329088 * \text{Сіндром1}_{10} + \text{Сіндром1}_{11} - 0,08574385 * \text{Сіндром1}_{12} + \text{Сіндром1}_{13} + \text{Сіндром1}_{14} - \text{Сіндром1}_{15} - 0,06077649 * \text{Сіндром1}_{16} + 0,6581131 * \text{Сіндром1}_{17} + 1$$

$$e = \text{Сіндром1}_1 + \text{Сіндром1}_2 - \text{Сіндром1}_3 - \text{Сіндром1}_4 - \text{Сіндром1}_5 + \text{Сіндром1}_6 - 0,1279237 * \text{Сіндром1}_7 + 0,1763626 * \text{Сіндром1}_8 + \text{Сіндром1}_9 - 0,398913 * \text{Сіндром1}_{10} - \text{Сіндром1}_{11} + 0,3104188 * \text{Сіндром1}_{12} - \text{Сіндром1}_{13} - \text{Сіндром1}_{14} + \text{Сіндром1}_{15} + 0,6841241 * \text{Сіндром1}_{16} - 0,2379929 * \text{Сіндром1}_{17} + 0,008772251$$

Постобробка кінцевих синдромів:

$$a = ((A * 0,300000190734863) + 15,5) / 2)$$

$$B = ((B * 1,900000152587891) + 52,5) / 2)$$

$$C = ((C * 0,5) + 23,8999996185303) / 2)$$

$$d = ((D * 0,5) + 10,5) / 2)$$

$$e = ((E * 2,5000095367432) + 33,9000005722046) / 2))$$

Значення X91 і X94 мають характеристичні частоти 15679 Гц. і 16196 Гц. відповідно.

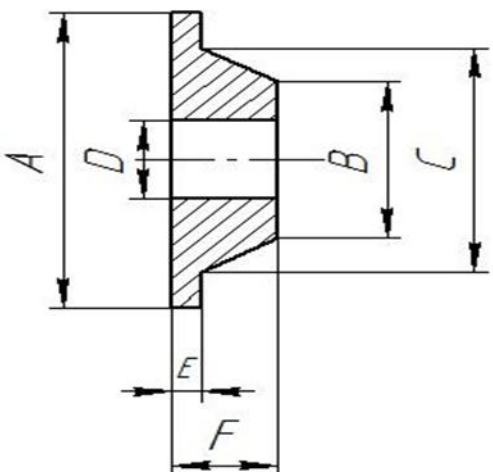
Використання цих частот я фільтрів акустичних сигналів збуджених об'єктів надає можливість отримати всі розміри разом без торкання до об'єктів.

Тестування показало, що похибка тестування на зразках не перевищує 0,2...0,6 %.

Аналогічно виконувалось створення ідентифікаційної моделі зразків, наведених в табл.2.

Таблиця 2

Вихідні дані для тренувальної множини при створенні моделі

Параметри об'єкту	Таблиця розмірів об'єкту, мм						
	A	B	C	D	E	F	
	48,33	30,35	16,27	7,70	1,73	8,97	
	46,95	30,78	15,63	8,08	2,51	10,04	
	47,90	28,90	14,80	7,91	1,90	9,41	
	47,91	27,48	14,69	7,66	1,96	8,50	
	46,92	30,37	15,44	7,70	2,08	9,55	
	46,90	29,21	14,75	7,94	2,39	10,01	
	47,84	31,66	16,24	8,44	1,73	9,45	
	46,95	30,59	15,81	7,94	2,39	10,01	
	48,63	29,59	13,70	8,13	2,17	9,97	
	47,89	29,41	14,73	7,83	1,90	9,81	
	48,34	31,57	15,43	7,68	2,81	11,17	
	48,00	28,89	16,09	7,94	2,30	8,91	
	46,79	30,72	16,06	8,11	2,48	10,06	
	48,52	28,26	14,47	7,95	2,03	9,53	
	47,02	29,50	15,65	18,05	2,51	9,75	
	48,40	32,07	16,43	8,00	1,82	10,11	
	47,51	29,30	15,55	7,89	1,97	9,12	
	48,69	27,72	17,15	8,15	2,20	8,50	
	48,31	28,84	15,93	8,10	2,06	9,22	
	47,81	31,01	16,45	7,60	1,61	9,49	
	46,71	32,80	15,51	8,00	3,05	11,60	
	47,85	29,78	15,70	7,96	1,91	8,95	
	47,38	31,20	15,60	8,02	1,69	9,22	
	47,84	32,33	17,83	8,00	1,81	8,82	
	47,74	30,40	17,35	8,21	1,59	9,43	
	46,92	31,18	15,42	7,90	2,38	10,06	
	47,43	29,85	14,97	8,14	1,54	8,24	
	46,90	31,75	15,64	8,09	2,29	10,30	
	48,48	30,41	17,19	8,02	2,34	9,07	
	47,36	30,14	16,22	8,07	1,99	8,67	
	46,88	31,00	16,20	7,98	2,31	9,97	
	47,76	28,84	15,92	7,96	2,25	9,35	
	46,89	28,91	14,42	8,03	1,74	9,38	
	48,16	29,91	13,65	7,96	1,53	9,44	

На основі таблиці прецедентів, яка була розділена на навчальне (70% всього масиву) і тестове (30% всього масиву) безлічі, була побудована ідентифікаційна модель безконтактного контролю всіх розмірів одночасно. Нейронна мережа, також, продемонструвала можливість обмежитися лише чотирма опорними частотами акустичних спектрів представлених зразків. Це частоти 8787 Гц., 10165 Гц., 15851 Гц. і 16540 Гц.

Тестування побудованої ідентифікаційної моделі показало, що середня помилка не перевищувала 0,6% (табл.3).

Таблиця 3

Результати тестування ідентифікаційної моделі

№	A	Прогноз сети	Ошибка	B	Прогноз сети	Ошибка	C	Прогноз сети	Ошибка
33	48,4	48,44065	-0,04065476	29,9	30,23416	-0,3341556	15,5	14,71071	0,7892933
34	48	47,79962	0,2003784	27,4	28,02312	-0,6231209	13,4	14,00104	-0,6010405
35	48	47,5041	0,4958954	30,8	31,06613	-0,2661297	16,8	16,07674	0,7232617
36	46,6	46,11515	0,4848457	30,4	29,80076	0,5992378	10,1	10,78918	-0,6891836
37	47,9	48,43053	-0,5305306	30	29,36971	0,6302948	11	11,87178	-0,8717775
38	48,2	47,55003	0,649974	31,4	32,0303	-0,6302963	15,6	16,22936	-0,6293567
39	46,96	47,60071	-0,6407118	30,88	30,7799	0,1001042	15,72	15,36464	0,3553636
40	48,32	48,665	-0,3449971	29,99	30,35273	-0,3627317	14,25	14,53494	-0,2849436
41	47,97	48,49156	-0,521558	31,76	32,28649	-0,5264876	17	16,98048	0,01951981
42	48,61	48,91718	-0,3071791	30,4	30,88914	-0,489143	14,6	15,44905	-0,849048
43	48,92	48,25619	0,6638126	30,17	29,51523	0,6547717	15,98	15,20192	0,7780786
44	48,3	47,66975	0,6302536	31,12	31,63974	-0,5197381	16,58	15,7285	0,8514968
		Правильно:	44 (100%)		Правильно:	44 (100%)		Правильно:	44 (100%)
		Неправильно:	0 (0%)		Неправильно:	0 (0%)		Неправильно:	0 (0%)
		Всього:	44		Всього:	44		Всього:	44
		Ср.ошибка:	0,4025835		Ср.ошибка:	0,4577485		Ср.ошибка:	0,5733256

Висновок

Таким чином, представлені ідентифікаційні моделі, побудовані на нейромережевому базисі, показали реальну можливість їх використання для створення системи діагностики об'єктів за кількома одночасного контролю не тільки геометричних характеристик об'єктів, а й їх фізико-механічних характеристик, включаючи показники напруженого стану, твердості і т.ін..

Література кількісними ознаками. Причому, кількість таких ознак, які можна контролювати одночасно, практично, не обмежена. Авторами роботи проведені додаткові дослідження, які показали можливість

1. Физическая акустика, под ред. У. Мэзона, пер. с англ., т. 2, ч. А, М., 1968, гл. 5, 6, ч. Б, М., 1969, гл. 1-3; т. 4, ч. А, М., 1969, гл. 4, ч. Б, М., 1970, гл. 4.
2. А.И. Коробов, В.А. Буров, К.В. Дмитриев, О.Д. Румянцева. Резонансная акустическая спектроскопия твердых тел. Методическая разработка спецпрактикума кафедры акустики. — М.: Физический факультет МГУ, 2012. 30 с.
3. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. — 403 с.
4. Ковалевський С. В. Дослідження способу акустичного діагностування нанопокриттів деталей машин / С. В. Ковалевський, Д. В. Коваленко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. — 2018. — № 1. — С. 84–89.
5. Ковалевський С. В. Концепція діагностики механізму мобільного верстата – робота для створення його еталонної моделі / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. — Х. : НТУ «ХП», 2017. — № 26(1248). — С. 56–59.
6. Kovalevskyy S. Acoustic Diagnostics of Lever Mechanisms with Subsequent Pro-cessing of Data on Neural Networks / S. Kovalevskyy, O. Kovalevska, R. Turmanidze // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2019. — N 42. — P. 202–210.
7. Ковалевський С. В. Розробка та дослідження методу зменшення залишкових напружень в зварних конструкціях / С. В. Ковалевський, С. С. Савченко, І. А. Костюков // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. — 2018. — № 1. — С. 78–83.
8. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevskyy // Науковий журнал «Радиоелектроніка, інформатика, управління», «Radio Electronics, Computer Science, Control». — 2018. — № 2 (45). — С. 51–59.
9. Ковалевський С. В. Актуалізація експертних моделей за допомогою нейронних мереж / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. — Харків, 2018. — № 34 (1310). — С. 11–14.
10. Ковалевський С. В. Управління якістю багаторізованих різальних інструментів з механічним кріпленням пластин / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська, А. О. Кошевой // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2019) : матеріали тез доповідей ІХ Міжн. наук.-практ. конференції (м. Чернігів, 14–16 травня 2019 р.) : у 2-х т. — Чернігів : ЧНТУ, 2019. — Т. 1. — С. 71–73.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 621.647.23 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.5

С.Б. Ковальчук*Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна***ЗАДАЧА ТЕРМОПРУЖНОСТІ ДЛЯ КОМПОЗИТНОГО БРУСА ІЗ ПЛОСКОЮ ВІССЮ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ У ПРИРОДНІЙ СИСТЕМІ КООРДИНАТ**

У роботі отримано скалярну форму рівняння теплопровідності, граничних умов різного типу та умов спряження фаз для зв'язаної динамічної задачі термопружного деформування композитного дискретно-неоднорідного бруса із криволінійною плоскою віссю та постійною по довжині структурною будовою. Рівняння та умови виведені у природній, для будови бруса, криволінійній циліндричній системі координат, що робить отримані залежності інваріантними до форми осі бруса. Отримані залежності можуть бути використані для розв'язання широкого кола прикладних задач термопружного деформування композитних стержневих елементів.

Ключові слова: криволінійний брус; криволінійна плоска вісь; природна система координат; температурне поле; тепловий потік; термопружне деформування.

Форм. 50. Рис. 1. Літ. 21

С.Б. Ковальчук**ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ КОМПОЗИТНОГО БРУСА С ПЛОСКОЮ ОСЬЮ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В ЕСТЕСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ**

В работе получено скалярную форму уравнения теплопроводности, граничных условий разного типа и условий сопряжения фаз для связанной динамической задачи термоупругого деформирования композитного дискретно-неоднородного бруса с криволинейной плоской осью и постоянным по длине структурным строением. Уравнения и условия выведены в естественной для строения бруса, криволинейной цилиндрической системе координат, что делает полученные зависимости инвариантными по форме оси бруса. Полученные зависимости могут быть использованы для решения широкого круга прикладных задач термоупругого деформирования композитных стержневых элементов.

Ключевые слова: криволинейный брус; криволинейная плоская ось; естественная система координат; температурное поле; тепловой поток; термоупругое деформирование.

S. Kovalchuk**PROBLEM OF THERMOELASTICITY OF THE COMPOSITE BAR WITH A PLAIN AXIS OF AN ARBITRARY SHAPE IN THE NATURAL COORDINATE SYSTEM**

Heterogeneity of the structure of composite construction elements leads to temperature deformations and strains within them, even when staying in a stationary uniform temperature field. Therefore, for such elements, it is necessary to take into account changes in a temperature field while in operation when predicting their strength and rigidity. Among the scientific papers devoted to the problems of thermal elasticity of composite elements, multilayer plates and shells and rectilinear bars are predominantly considered. At the same time, thermal elasticity of composite rod elements with a curvilinear axis remains a poorly studied problem of applied mathematics and mechanics. In this paper, we obtained equations and formed boundary conditions of different types for the coupled thermal conductivity problem of the curvilinear composite bar with invariable length structure in its natural coordinate system. The equations describe the process of propagation of a temperature field taking into account a deformation field inside a discrete-inhomogeneous composite bar consisting of homogeneous or continuous-inhomogeneous phases with curvilinear orthotropy of thermophysical and elastic characteristics and containing internal sources of heat. On the basis of the accepted general initial data on the shape of outer bar surfaces and internal bar structure, the boundary conditions of three types are obtained in the natural coordinate system and the conditions of heat transfer at the boundary of phases in case of their ideal thermal contact and in the presence of contact thermal resistance are made out. The obtained equations, along with the system of elasticity theory equations in the natural coordinate system, integral and differential dependences for internal force factors and relations for modeling loads of various types developed in previous papers, represent the necessary analytical basis for solving a wide range of problems as to thermoelastic deformation of composite bars with a plain axis of an arbitrary shape.

Keywords: curvilinear bar; curvilinear flat axis; natural coordinate system; temperature field; heat flow; thermoelastic deformation.

Постановка проблеми. Створення конструкційних елементів зі структурно-неоднорідною композитною будовою є ефективним прийомом у сучасному проектуванні, який дозволяє підвищити питомі показники їх міцності та жорсткості, а також надати проектованим елементам непритаманних, традиційним конструкційним матеріалам, властивостей [1]. Однак, через наявність у будові композитного бруса різнорідних фаз матеріалу, які, у загальному випадку, мають різні фізико-механічні властивості, навіть стаціонарне рівномірне температурне поле неминуче викликатиме появу певного поля температурних деформацій і відповідного поля напружень [2]. У композитних елементах, утворених поєднанням матеріалів зі значною різницею коефіцієнтів лінійного температурного розширення, пружних характеристик та характеристик міцності це може викликати появу небезпечного напружено-деформованого стану навіть за

відсутності зовнішніх силових впливів. Одночасна дія нерівномірного температурного поля та силових навантажень ще більш небезпечна для композитних елементів і потребує обов'язкового дослідження у ході прогнозування їх міцності та жорсткості.

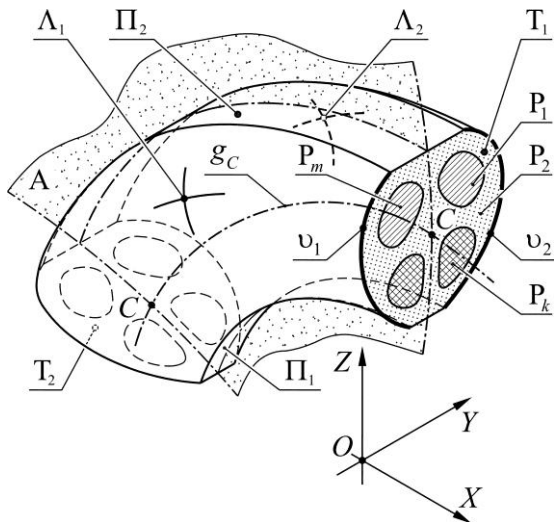
Серед наукових робіт присвячених задачам термопружності композитних елементів у переважній більшості розглядаються багат шарові плити і оболонки [3-8]. Термопружному деформуванню композитних стержнів та брусів присвячено значно менше робіт, наприклад [2, 9-11], причому отримані у них розв'язки стосуються елементів із прямолінійною віссю. Водночас, термопружність композитних стержневих елементів із криволінійною віссю, залишається мало дослідженою проблемою прикладної математики та механіки, що створює перешкоди проектуванню ефективних інженерних конструкцій і вказує на необхідність розробки загальної теорії деформування криволінійних брусів різної будови.

Для криволінійного композитного бруса дискретно-неоднорідної будови із плоскою віссю довільної форми авторами у [12] отримані рівняння теорії пружності у природній системі координат [13, 14], у [15] побудовані залежності для внутрішніх силових факторів, а у [16, 17] – співвідношення для моделювання зосереджених та розподілених навантажень. Разом, дані рівняння та залежності складають теоретичну основу для розв'язання задач деформування криволінійних брусів із плоскою віссю довільної форми. Зважаючи на важливість проблеми прогнозування термічних деформацій та напружень у композитних стержневих елементах, актуальним є доповнення зазначеної теоретичної бази для можливості охоплення широкого кола задач термопружного деформування таких елементів.

Мета статті: отримати рівняння та сформулювати крайові умови зв'язаної задачі теплопровідності для криволінійного дискретно-неоднорідного бруса із незмінною по довжині структурою, у природній системі координат, для можливості розгляду задач термопружного деформування таких елементів конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо криволінійний композитний брус, утворений дискретними однозв'язними або багатозв'язними фазами $P_1, P_2, \dots, P_k, \dots, P_m$, що виконані із різномірних матеріалів (рис. 1).

Поперечний переріз бруса має незмінну форму та структурну будову вздовж його осі g_C ,



яка є плоскою шматково-гладкою кривою, що належить площині симетрії $A \equiv XOZ$.

Зовнішню поверхню бруса складають бічні криволінійні поверхні Λ_ζ ($\zeta=1,2$) (рис. 1), із твірними v_ζ , поздовжні циліндричні поверхні $\Pi_\zeta \perp A$ та торцеві поверхні $T_\zeta \perp A$.

У [13] для описання геометрії і будови криволінійного бруса запропоновано природну систему, у якій усі поздовжні волокна бруса та центральна вісь g_C належать однопараметричному сімейству координатних циліндричних поверхонь Π_ζ^ξ ($\Pi_\zeta \in \Pi_\zeta^\xi$), а поперечні перерізи – однопараметричному сімейству координатних поверхонь T_ζ^η ($T_\zeta \in T_\zeta^\eta$).

Координати точки, скалярні функції і їх перші похідні та компоненти вектора у прямокутній XYZ та природній $\Pi E Y$ системах пов'язані, відповідно, залежностями

$$x = \omega_x(\eta, \xi), \quad z = \omega_z(\eta, \xi), \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \omega_x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{1}{|\mathbf{J}|} \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} - \frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right), \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \omega_z} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{1}{|\mathbf{J}|} \left(-\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right), \quad (3)$$

$$V_x = \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right) \frac{V_\xi - \kappa V_\eta}{\sqrt{1 + \kappa^2}}, \quad V_y = V_y, \quad V_z = \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right) \frac{V_\eta + \kappa V_\xi}{\sqrt{1 + \kappa^2}}, \quad (4)$$

де η, ξ – довільні дійсні сталі (криволінійні координати); $|\mathbf{J}|$ – Якобіан системи ортогональних сімейств кривих:

$$\begin{cases} g_\xi(x, z, \xi) = 0, & g_\xi \equiv \Pi_\xi^g \cap XOZ; \\ f_\eta(x, z, \eta) = 0, & f_\eta \equiv \Gamma_\eta^f \cap XOZ. \end{cases}$$

Параметри, що характеризують природну систему координат

$$\kappa = \frac{\partial \omega_z / \partial \xi}{\partial \omega_x / \partial \xi} = - \frac{\partial \omega_x / \partial \eta}{\partial \omega_z / \partial \eta} = \operatorname{tg} \alpha, \quad \lambda = - \frac{\partial \omega_z / \partial \xi}{\partial \omega_x / \partial \eta} = \frac{\partial \omega_x / \partial \xi}{\partial \omega_z / \partial \eta}, \quad (5)$$

$$L_\eta^* = \operatorname{sgn}(\partial \omega_z / \partial \eta) L_\eta, \quad L_\xi^* = \operatorname{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi) L_\xi, \quad (6)$$

$$|\mathbf{J}| = -L_\xi^* L_\eta^*. \quad (7)$$

де α – кут між бінормаллю кривої сімейства g_ξ та віссю OX ; L_η, L_ξ – коефіцієнти Ламе:

$$L_\eta = \sqrt{1 + \kappa^2} |\partial \omega_z / \partial \eta|, \quad L_\xi = \sqrt{1 + \kappa^2} |\partial \omega_x / \partial \xi|. \quad (8)$$

У загальному випадку вважатимемо, що фази бруса виготовлені із циліндрично-ортотропних матеріалів, для яких у довільній точці $K(\eta, \xi, y) \equiv Y_y \cap \Pi_\xi^g \cap \Gamma_\eta^f$ одна із площин симетрії фізико-механічних властивостей співпадає з Y_y , а дві інші ортогональні Π_ξ^g і Γ_η^f , відповідно.

Отримаємо рівняння теплопровідності та відповідні крайові умови для описаного композитного бруса у його природній системі координат.

Рівняння теплопровідності зв'язаної динамічної задачі термопружності у природній системі координат. Слідуючи виводу рівняння теплопровідності для пружного тіла запропонованому у [18], для суцільного неоднорідного твердого тіла з ортотропією фізико-механічних властивостей рівняння теплопровідності можна записати у такому вигляді

$$\mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \bar{\mathbf{q}} + F + \left[T \left(\mu_{11}^\beta \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \tau} + \mu_{22}^\beta \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \tau} + \mu_{33}^\beta \frac{\partial \varepsilon_{33}}{\partial \tau} \right) \right], \quad (9)$$

де $\mu^p = \mu^p(K)$, $\mu^c = \mu^c(T, K)$ – функції розподілу густини та питомої теплоємності; $T = T(K, \tau)$ – просторово-часова функція розподілу температури в межах тіла; $\bar{\mathbf{q}} = \bar{\mathbf{q}}(K, \tau)$ – вектор-функція щільності теплового потоку; $F = F(K, \tau)$ – розподіл інтенсивності джерел тепла всередині тіла; $\mu_{ij}^\beta = \mu_{ij}^\beta(K)$ – просторові функції розподілу коефіцієнтів температурних напружень; $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(K, \tau)$ – компоненти тензора деформацій у обраній ортогональній системі координат.

Рівняння теплопровідності у формі (9) не прив'язане до певної системи координат, що дозволяє використати його без змін для отримання скалярної форми рівняння теплопровідності у природній системі координат розглядуваного композитного бруса.

Для цього перейдемо у (9) до криволінійних координат точки, однак вектор щільності теплового потоку $\bar{\mathbf{q}}$ спочатку розкладемо у допоміжній прямокутній системі координат XYZ :

$$\mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + F + T \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right), \quad (10)$$

де q_x, q_y, q_z – компоненти вектора щільності теплового потоку у системі XYZ .

Застосувавши до рівняння (10) залежності між похідними функцій у прямокутній та природній системах координат (3), з послідовним урахуванням (7), (6) та (5), отримаємо

$$\mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\kappa \frac{\partial q_x}{\partial \eta} - \frac{\partial q_z}{\partial \eta}}{\frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} (1 + \kappa^2)} - \frac{\frac{\partial q_x}{\partial \xi} + \kappa \frac{\partial q_z}{\partial \xi}}{\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} (1 + \kappa^2)} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + F + T \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \quad (11)$$

Диференціюючи співвідношення (4) отримаємо зв'язок між похідними компонент вектора $\bar{\mathbf{q}}$ у прямокутній просторовій та природній циліндричній системах координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial \chi} &= \frac{\text{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi)}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \left(\frac{\partial q_\xi}{\partial \chi} - \kappa \frac{\partial q_\eta}{\partial \chi} - \frac{\partial \kappa}{\partial \chi} \frac{q_\eta + \kappa q_\xi}{1 + \kappa^2} \right) - 2 \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial \xi \partial \chi} \frac{\kappa q_\eta - q_\xi}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \Delta \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right), \\ \frac{\partial q_z}{\partial \chi} &= \frac{\text{sgn}(\partial \omega_x / \partial \xi)}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \left(\frac{\partial q_\eta}{\partial \chi} + \kappa \frac{\partial q_\xi}{\partial \chi} - \frac{\partial \kappa}{\partial \chi} \frac{\kappa q_\eta - q_\xi}{1 + \kappa^2} \right) + 2 \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial \xi \partial \chi} \frac{q_\eta + \kappa q_\xi}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \Delta \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

де $\chi = \eta, \xi$; $\Delta(f(\eta, \xi))$ – дельта-функція Дірака.

Підставивши (12) до (11) і виконавши перетворення із урахуванням (5)-(8), отримаємо рівняння позбавлене прив'язки до прямокутної системи координат

$$\begin{aligned} \mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} &= -\frac{\lambda}{L_\xi} \frac{\partial q_\eta}{\partial \eta} + \frac{1}{L_\xi} \frac{q_\eta}{1 + \kappa^2} \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} - \frac{1}{L_\xi} \frac{\partial q_\xi}{\partial \xi} - \frac{1}{L_\xi} \frac{\lambda q_\xi}{1 + \kappa^2} \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + F - \\ &- 2 \left(\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\lambda q_\eta}{L_\xi} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial \xi^2} \frac{q_\xi}{L_\xi} \right) \text{sgn} \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right) \Delta \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right) + T \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

За формальним визначенням функцій $\text{sgn}(f(\eta, \xi))$ і $\Delta(f(\eta, \xi))$, їх добуток: $\text{sgn}(f(\eta, \xi))\Delta(f(\eta, \xi)) \equiv 0 \forall f(\eta, \xi) \in (-\infty, +\infty)$. Тоді рівняння (13) набуде наступного вигляду

$$\mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{\lambda}{L_\xi} \frac{\partial q_\eta}{\partial \eta} - \frac{1}{L_\xi} \frac{\partial q_\xi}{\partial \xi} + \frac{\frac{\partial \kappa}{\partial \xi} q_\eta - \frac{\partial \kappa}{\partial \eta} \lambda q_\xi}{1 + \kappa^2} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + F + T \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \quad (14)$$

Згідно першого виразу (5), можна записати

$$\frac{\partial \kappa}{\partial \eta} = (1 + \kappa^2) \frac{\partial \alpha}{\partial \eta}, \quad \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} = (1 + \kappa^2) \frac{\partial \alpha}{\partial \xi}, \quad (15)$$

що дозволяє надати рівнянню (14) такий вигляд

$$\mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{1}{L_\xi} \left(\lambda \frac{\partial q_\eta}{\partial \eta} - \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} q_\eta + \frac{\partial q_\xi}{\partial \xi} + \lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} q_\xi \right) - \frac{\partial q_y}{\partial y} + F + T \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \quad (16)$$

Для отримання завершеного вигляду рівняння теплопровідності, застосуємо у (16) закон Фур'є, в основу якого покладено допущення, про лінійну залежність компонент вектора щільності теплового потоку від компонент градієнту температурного поля [19].

Градієнт температурного поля у прямокутній системі координат

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial x} \bar{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \bar{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \bar{e}_z, \quad (17)$$

де $\bar{e}_x, \bar{e}_y, \bar{e}_z$ – одиничні вектори вздовж осей прямокутної системи XYZ .

Застосувавши (3) і (4) у (17), отримаємо

$$\text{grad } T = \frac{\text{sgn} \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \right)}{|\mathbf{J}| \sqrt{1 + \kappa^2}} \left\{ \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial \xi} \frac{\partial T}{\partial \eta} - \frac{\partial \omega_z}{\partial \eta} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) (\bar{e}_\xi - \bar{e}_\eta \kappa) - \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \xi} \frac{\partial T}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega_x}{\partial \eta} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) (\bar{e}_\eta + \bar{e}_\xi \kappa) \right\} + \frac{\partial T}{\partial y} \bar{e}_y,$$

звідки із урахуванням (5)-(8), градієнт температурного поля у природній системі координат бруса:

$$\text{grad } T = \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{\partial T}{\partial \eta} \bar{e}_\eta + \frac{1}{L_\xi} \frac{\partial T}{\partial \xi} \bar{e}_\xi + \frac{\partial T}{\partial y} \bar{e}_y, \quad (18)$$

де $\bar{e}_\eta, \bar{e}_\xi, \bar{e}_y$ – одиничні вектори вздовж нормалей до координатних поверхонь природної системи у розглядуваній точці бруса.

Згідно закону Фур'є у довільній точці k -ї ортотропної фази бруса компоненти градієнту температурного поля (18) пов'язані із компонентами \bar{q} такими залежностями

$$q_\eta^{[k]} = -\lambda_\eta^{[k]} \left(\frac{\lambda}{L_\xi} \frac{\partial T^{[k]}}{\partial \eta} \right), \quad q_\xi^{[k]} = -\lambda_\xi^{[k]} \left(\frac{1}{L_\xi} \frac{\partial T^{[k]}}{\partial \xi} \right), \quad q_y^{[k]} = -\lambda_y^{[k]} \frac{dT^{[k]}}{dy}, \quad (19)$$

де $\lambda_{\eta, \xi, y}^{[k]}$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалу k -ї фази бруса у напрямках нормалей до координатних поверхонь $T_{\eta}^f, \Pi_{\xi}^g, Y_y$, відповідно.

Загальновідомо, що питома теплоємність та коефіцієнти теплопровідності зростають зі збільшенням температури за складними залежностями, які за помірних температур для більшості твердих тіл можуть бути лінеаризовані [18]. Відповідно, для ортотропного матеріалу k -ї фази допустимо

$$c^{[k]} = c_0^{[k]} \left(1 \pm b^{c[k]} (T - T_0) \right), \quad \lambda_a^{[k]} = \lambda_{0a}^{[k]} \left(1 \pm b_a^{\lambda[k]} (T - T_0) \right), \quad a = \eta, \xi, y, \quad (20)$$

де $c_0^{[k]}, \lambda_{0a}^{[k]}$ – питома теплоємність та коефіцієнти теплопровідності за початкової температури T_0 ; $b^{c[k]}, b_a^{\lambda[k]}$ – дослідні сталі.

Для усього композитного бруса (рис. 1) питома теплоємність та коефіцієнти теплопровідності, як і щільність, будуть кусково-гладкими функціями змінних η, ξ, τ із стрибкоподібною зміною значень на межі фаз

$$\mu^c = \mu_0^c \left(1 \pm \mu^{bc} \Delta T \right), \quad \mu_a^\lambda = \mu_{0a}^\lambda \left(1 \pm \mu_a^{b\lambda} \Delta T \right), \quad a = \eta, \xi, y, \quad (21)$$

де $\Delta T = T - T_0$.

У (21) функції μ_a^s ($\mu^c, \mu_0^c, \mu^{bc}, \mu_a^\lambda, \mu_{0a}^\lambda, \mu_a^{b\lambda}$), аналогічно функціям механічних характеристик у [12], формально можуть бути записані у вигляді

$$\mu_a^s = \sum_{k=1}^m \left(S_a^{[k]} p_k \right), \quad \text{supp } \mu_a^s = P, \quad (22)$$

де $p_k = p_k(\xi, y)$ – характеристична функція k -ї фази бруса; P – множина усіх точок бруса.

З урахуванням (21), компоненти вектора щільності теплового потоку (19), для усього бруса:

$$q_{\eta} = -\mu_{0\eta}^\lambda \left(1 \pm \mu_{\eta}^{b\lambda} \Delta T \right) \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta}, \quad q_{\xi} = -\mu_{0\xi}^\lambda \left(1 \pm \mu_{\xi}^{b\lambda} \Delta T \right) \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi}, \quad q_y = -\mu_{0y}^\lambda \left(1 \pm \mu_y^{b\lambda} \Delta T \right) \frac{dT}{dy}. \quad (23)$$

Підставивши (23) до рівняння (16) отримаємо

$$\begin{aligned} \mu^p \mu_0^c \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu_{0\eta}^\lambda \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta} \right) - \mu_{0\eta}^\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \frac{\lambda}{L_{\xi}^2} \frac{dT}{d\eta} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \\ &+ \frac{1}{L_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mu_{0\xi}^\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} \right) + \mu_{0\xi}^\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \frac{\lambda}{L_{\xi}^2} \frac{dT}{d\xi} + F + T_0 \left(\mu_{\eta}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\eta}}{\partial \tau} + \mu_{\xi}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\xi}}{\partial \tau} + \mu_y^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right) \pm \\ &\pm \left[-T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \mu^p \mu_0^c \mu^{bc} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \mu_{0\eta}^\lambda \mu_{\eta}^{b\lambda} \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta} \right) - T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \mu_{0\eta}^\lambda \mu_{\eta}^{b\lambda} \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \frac{\lambda}{L_{\xi}^2} \frac{dT}{d\eta} + \right. \\ &+ \frac{1}{L_{\xi}} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \mu_{0\xi}^\lambda \mu_{\xi}^{b\lambda} \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} \right) + T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \mu_{0\xi}^\lambda \mu_{\xi}^{b\lambda} \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \frac{\lambda}{L_{\xi}^2} \frac{dT}{d\xi} + \\ &\left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \mu_{0y}^\lambda \mu_y^{b\lambda} \frac{dT}{dy} \right) \pm T_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) \left(\mu_{\eta}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\eta}}{\partial \tau} + \mu_{\xi}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\xi}}{\partial \tau} + \mu_y^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right) \right], \quad (24) \end{aligned}$$

Складова у квадратних дужках рівняння (24) є нелінійною відносно шуканої функції T і робить практично неможливим аналітичне визначення розподілу температурного поля. Тому існуючі аналітичні методи розв'язання задач теплопровідності та термопружності однорідних ізотропних тіл, переважно побудовані на допущенні малого термічного збурення, коли $\Delta T/T_0 \ll 1$, якому відповідає лінеаризована, у початковий момент часу $\tau = 0$, форма рівняння (24):

$$\begin{aligned} \mu^p \mu_0^c \frac{\partial T}{\partial \tau} = & \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu_{0\eta}^\lambda \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{dT}{d\eta} \right) - \mu_{0\eta}^\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \xi} \frac{\lambda}{L_\xi^2} \frac{dT}{d\eta} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^\lambda \frac{dT}{dy} \right) + \\ & + \frac{1}{L_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mu_{0\xi}^\lambda}{L_\xi} \frac{dT}{d\xi} \right) + \mu_{0\xi}^\lambda \frac{\partial \alpha}{\partial \eta} \frac{\lambda}{L_\xi^2} \frac{dT}{d\xi} + F + T_0 \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Коефіцієнти температурних напружень $\beta_a^{[k]}$, які фігурують у рівнянні (25) можуть бути виражені через технічні термопружні сталі. Розв'язавши фізичні залежності для k -ї ортотропної фази у природній системі координат [12] відносно нормальних напружень, з урахуванням рівностей для ортотропного тіла: $E_\eta^{[k]} v_{\xi\eta}^{[k]} = E_\xi^{[k]} v_{\eta\xi}^{[k]}$, $E_\eta^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} = E_y^{[k]} v_{\eta y}^{[k]}$, $E_\xi^{[k]} v_{y\xi}^{[k]} = E_y^{[k]} v_{\xi y}^{[k]}$, отримаємо

$$\begin{aligned} \beta_\eta^{[k]} = & E_\eta^{[k]} \frac{\left((1 - v_{\xi y}^{[k]} v_{y\xi}^{[k]}) \mathfrak{G}_\eta^{[k]} + (v_{\xi\eta}^{[k]} + v_{y\eta}^{[k]} v_{\xi y}^{[k]}) \mathfrak{G}_\xi^{[k]} + (v_{y\eta}^{[k]} + v_{\xi\eta}^{[k]} v_{y\xi}^{[k]}) \mathfrak{G}_y^{[k]} \right)}{v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi\eta}^{[k]} + v_{\xi y}^{[k]} v_{y\xi}^{[k]} + v_{\eta y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} + 2v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} - 1}, \\ \beta_\xi^{[k]} = & E_\xi^{[k]} \frac{\left((v_{\eta\xi}^{[k]} + v_{y\xi}^{[k]} v_{\eta y}^{[k]}) \mathfrak{G}_\eta^{[k]} + (1 - v_{\eta y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]}) \mathfrak{G}_\xi^{[k]} + (v_{y\xi}^{[k]} + v_{\eta\xi}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]}) \mathfrak{G}_y^{[k]} \right)}{v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi\eta}^{[k]} + v_{\xi y}^{[k]} v_{y\xi}^{[k]} + v_{\eta y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} + 2v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} - 1}, \\ \beta_y^{[k]} = & E_y^{[k]} \frac{\left((v_{\eta y}^{[k]} + v_{\xi y}^{[k]} v_{\eta\xi}^{[k]}) \mathfrak{G}_\eta^{[k]} + (v_{\xi y}^{[k]} + v_{\xi\eta}^{[k]} v_{\eta y}^{[k]}) \mathfrak{G}_\xi^{[k]} + (1 - v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi\eta}^{[k]}) \mathfrak{G}_y^{[k]} \right)}{v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi\eta}^{[k]} + v_{\xi y}^{[k]} v_{y\xi}^{[k]} + v_{\eta y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} + 2v_{\eta\xi}^{[k]} v_{\xi y}^{[k]} v_{y\eta}^{[k]} - 1}, \end{aligned} \quad (26)$$

де $E_\eta^{[k]}, E_\xi^{[k]}, E_y^{[k]}$ – модулі пружності матеріалу k -ї ортотропної фази; $v_{\eta\xi}^{[k]}, \dots, v_{\xi y}^{[k]}$ – коефіцієнти Пуассона; $\mathfrak{G}_\eta^{[k]}, \mathfrak{G}_\xi^{[k]}, \mathfrak{G}_y^{[k]}$ – коефіцієнти лінійного температурного розширення.

Рівняння (25) разом із рівняннями теорії пружності, отриманими у [12], складають замкнуту систему рівнянь зв'язаної динамічної задачі термопружності [20] для криволінійного композитного бруса із постійною структурою поперечного перерізу у природній системі координат. Розподіл температурного поля T , разом із компонентами НДС, є однією із шуканих функцій даної задачі, яка окрім рівняння (25) має відповідати крайовим умовам задачі, до яких відносяться початковий розподіл температур (у момент часу $\tau = 0$) в усіх точках бруса та граничні умови теплообміну із середовищем на зовнішніх поверхнях бруса [18].

Необхідно зауважити, що у температурних складових лінійних деформацій в [12] для величини зростання температури у точці бруса застосовано позначення T , яке тут необхідно розуміти як ΔT – приріст температури відносно початкової T_0 .

Крайові умови задачі теплопровідності для композитного бруса у природній системі координат. Початкові умови задачі теплопровідності передбачають узгодження шуканої функції із початковим розподілом температури у брусі

$$T|_{\tau=0} = T_0, \quad (27)$$

де $T_0 = T_0(K)$, $K \in \mathbb{P}$ – задана просторова функція розподілу температури всередині бруса.

Граничні умови задачі теплопровідності передбачають узгодження функції T із поверхневими умовами теплообміну бруса з навколишнім середовищем або іншими тілами у кожний момент часу. В аналітичній теорії теплопровідності виділяють граничні умови трьох типів [18]: заданий поверхневий розподіл температури (граничні умови I роду), заданий поверхневий розподіл щільності теплового потоку (граничні умови II роду), заданий закон конвекційного теплообміну із середовищем (граничні умови III роду).

До *граничних умов I роду* відноситься випадок, коли заданий розподіл температури на поверхні тіла. Тоді для торцевих T_ζ , поздовжніх циліндричних Π_ζ та поздовжніх бічних Λ_ζ поверхонь, відповідно маємо:

$$T|_{\eta=\eta_\zeta} = T^{\text{T}\zeta}, \quad T|_{\xi=\xi_\zeta} = T^{\text{П}\zeta}, \quad T|_{y=v_\zeta} = T^{\text{Л}\zeta}, \quad \zeta = 1, 2, \quad (28)$$

де $T^{\text{T}\zeta} = T^{\text{T}\zeta}(K, \tau)$, $T^{\text{П}\zeta} = T^{\text{П}\zeta}(K, \tau)$, $T^{\text{Л}\zeta} = T^{\text{Л}\zeta}(K, \tau)$ – задані функції.

Граничні умови II роду передбачають відомий розподіл щільності теплового потоку на зовнішній поверхні бруса. На основі співвідношення для теплового потоку через довільно

зорієнтовану площадку тіла [19], для довільної точки поверхні Ω бруса у природній системі координат запишемо:

$$q|_{K \in \Omega} = q_{\eta}|_{K \in \Omega} l_{\eta}^{\Omega} + q_{\xi}|_{K \in \Omega} n_{\xi}^{\Omega} + q_{y}|_{K \in \Omega} m_y^{\Omega},$$

звідки, з урахуванням (23) в умовах малого термічного збурення ($\Delta T/T_0 \ll 1$):

$$\left(-\mu_{0\eta}^{\lambda} \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta} l_{\eta}^{\Omega} - \mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} n_{\xi}^{\Omega} - \mu_{0y}^{\lambda} \frac{dT}{dy} m_y^{\Omega} \right) |_{K \in \Omega} = q^{\Omega}, \quad (29)$$

де $q^{\Omega} = q^{\Omega}(K, \tau)$, $K \in \Omega$ – щільність теплового потоку через поверхню Ω ; l_{η}^{Ω} , n_{ξ}^{Ω} , m_y^{Ω} – косинуси кутів між зовнішньою нормаллю поверхні Ω бруса у точці K та додатнім напрямом нормалей координатних поверхонь.

Відмітимо, на ділянках поверхні Ω , де $q^{\Omega} > 0$, напрям вектору теплового потоку співпадає із напрямом зовнішньої нормалі і відбувається теплопередача від бруса до середовища, тобто охолодження, відповідно на ділянках Ω , де $q^{\Omega} < 0$ – відбувається нагрів бруса.

Конкретизуємо граничні умови (29) для поверхонь композитного бруса на рис. 1:

- торцеві циліндричні поверхні T_{ζ} ($l_{\eta}^{T_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$, $n_{\xi}^{T_{\zeta}} = 0$, $m_y^{T_{\zeta}} = 0$):

$$(-1)^{\zeta+1} \left(\mu_{0\eta}^{\lambda} \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta} \right) |_{\eta=\eta_{\zeta}} = q^{T_{\zeta}}(K, \tau), \quad K \in T_{\zeta}, \quad \zeta = 1, 2; \quad (30)$$

- поздовжні циліндричні поверхні Π_{ζ} ($l_{\eta}^{\Pi_{\zeta}} = 0$, $n_{\xi}^{\Pi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$, $m_y^{\Pi_{\zeta}} = 0$):

$$(-1)^{\zeta+1} \left(\mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} \right) |_{\xi=\xi_{\zeta}} = q^{\Pi_{\zeta}}(K, \tau), \quad K \in \Pi_{\zeta}, \quad \zeta = 1, 2; \quad (31)$$

- поздовжні бічні поверхні Λ_{ζ} ($l_{\eta}^{\Lambda_{\zeta}} = 0$):

$$-\left(\mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} \right) |_{y=y_{\zeta}} n_{\xi}^{\Lambda_{\zeta}} - \left(\mu_{0y}^{\lambda} \frac{dT}{dy} \right) |_{y=y_{\zeta}} m_y^{\Lambda_{\zeta}} = q^{\Lambda_{\zeta}}(K, \tau), \quad K \in \Lambda_{\zeta}, \quad \zeta = 1, 2. \quad (32)$$

Для бруса із прямокутним поперечним перерізом, коли бічні поверхні є плоскими і паралельними XOZ : $n_{\xi}^{\Lambda_{\zeta}} = 0$, $m_y^{\Lambda_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$, і умови (32) спростяться

$$(-1)^{\zeta+1} \left(\mu_{0y}^{\lambda} \frac{dT}{dy} \right) |_{y=y_{\zeta}} = q^{\Lambda_{\zeta}}(K, \tau), \quad K \in \Lambda_{\zeta}, \quad \zeta = 1, 2, \quad (33)$$

де y_{ζ} – координата лівої та правої поздовжніх граней бруса, відповідно.

Граничні умови III роду можна розглядати як варіант граничних умов II роду із уточненням правої частини згідно заданого механізму конвекційного теплообміну. Згідно закону Ньютона-Ріхмана для довільної поверхні Ω бруса, співвідношення (29) можна переписати так

$$\left(-\mu_{0\eta}^{\lambda} \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta} l_{\eta}^{\Omega} - \mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} n_{\xi}^{\Omega} - \mu_{0y}^{\lambda} \frac{dT}{dy} m_y^{\Omega} \right) |_{K \in \Omega} = \mu_{\Omega}^{\alpha} (T|_{K \in \Omega} - T_{env}), \quad (34)$$

де $\mu_{\Omega}^{\alpha} = \mu_{\Omega}^{\alpha}(K)$, $K \in \Omega$ – закон зміни коефіцієнта тепловіддачі через неоднорідну поверхню Ω ; T_{env} – температура зовнішнього середовища.

Для окремих поверхонь розглядуваного бруса умови (34) спростяться:

- торцеві циліндричні поверхні T_{ζ} ($l_{\eta}^{T_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$, $n_{\xi}^{T_{\zeta}} = 0$, $m_y^{T_{\zeta}} = 0$):

$$(-1)^{\zeta+1} \left(\mu_{0\eta}^{\lambda} \frac{\lambda}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\eta} \right) |_{\eta=\eta_{\zeta}} = \mu_{T_{\zeta}}^{\alpha} (T|_{\eta=\eta_{\zeta}} - T_{env}), \quad \zeta = 1, 2; \quad (35)$$

- поздовжні циліндричні поверхні Π_{ζ} ($l_{\eta}^{\Pi_{\zeta}} = 0$, $n_{\xi}^{\Pi_{\zeta}} = (-1)^{\zeta}$, $m_y^{\Pi_{\zeta}} = 0$):

$$(-1)^{\zeta+1} \left(\mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{1}{L_{\xi}} \frac{dT}{d\xi} \right) |_{\xi=\xi_{\zeta}} = \mu_{\Pi_{\zeta}}^{\alpha} (T|_{\xi=\xi_{\zeta}} - T_{env}), \quad \zeta = 1, 2; \quad (36)$$

– поздовжні бічні поверхні Λ_ζ ($l_\eta^{\Lambda_\zeta} = 0$):

$$-\left(\mu_{0\xi}^\lambda \frac{1}{L_\xi} \frac{dT}{d\xi}\right) \Big|_{y=v_\zeta} n_\xi^{\Lambda_\zeta} - \left(\mu_{0y}^\lambda \frac{dT}{dy}\right) \Big|_{y=v_\zeta} m_y^{\Lambda_\zeta} = \mu_{\Lambda_\zeta}^\alpha \left(T \Big|_{\xi=\xi_\zeta} - T_{env}\right), \quad \zeta = 1, 2. \quad (37)$$

Для бруса із прямокутним поперечним перерізом, умови (37) спростяться

$$(-1)^{\zeta+1} \left(\mu_{0y}^\lambda \frac{dT}{dy}\right) \Big|_{y=y_\zeta} = \mu_{\Lambda_\zeta}^\alpha \left(T \Big|_{y=y_\zeta} - T_{env}\right), \quad \zeta = 1, 2. \quad (38)$$

Умови теплопередачі на межі фаз композитного бруса. Окрім граничних умов, розв'язок для функції T має відповідати умовам на поверхнях з'єднання фаз всередині композитного дискретно-неоднорідного бруса. У випадку ідеального теплового контакту фаз P_k і P_{k+1} температура та тепловий потік у довільній точці спільної поверхні Ω^{Pk} мають бути однаковими, що з урахуванням (29) дозволяє записати

$$T^{[k]} \Big|_{K \in \Omega_k^P} = T^{[k+1]} \Big|_{K \in \Omega_k^P},$$

$$\left(\frac{\lambda_{0\eta}^{[k]} \lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k]}}{d\eta} l_\eta^{\Omega_k} + \frac{\lambda_{0\xi}^{[k]} \lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k]}}{d\xi} n_\xi^{\Omega_k} + \lambda_{0y}^{[k]} \frac{dT^{[k]}}{dy} m_y^{\Omega_k} \right) \Big|_{K \in \Omega_k^P} =$$

$$= \left(\lambda_{0\eta}^{[k+1]} \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k+1]}}{d\eta} l_\eta^{\Omega_k} + \frac{\lambda_{0\xi}^{[k+1]} \lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k+1]}}{d\xi} n_\xi^{\Omega_k} + \lambda_{0y}^{[k+1]} \frac{dT^{[k+1]}}{dy} m_y^{\Omega_k} \right) \Big|_{K \in \Omega_k^P}, \quad (39)$$

де $l_\eta^{\Omega_k}, n_\xi^{\Omega_k}, m_y^{\Omega_k}$ – косинуси кутів між зовнішньою нормаллю поверхні Ω_k^P фази бруса у точці K та додатнім напрямом нормалей координатних поверхонь.

У реальних композитних елементах фази основного матеріалу з'єднуються через клейові прошарки, що можуть мати погану теплопровідність і порушувати умови (39). Для вирішення даної проблеми в уточненій постановці клейові прошарки можна розглядати як окремі фази композитного бруса із відповідними теплофізичними та механічними властивостями.

Більш простим для застосування є підхід, за якого такі прошарки розглядаються як опір теплопередачі між фазами композита на граничній поверхні. В такому випадку ґрунтуючись на законі Ньютона-Ріхмана і виходячи із закону збереження енергії, можемо записати

$$\left(\lambda_{0\eta}^{[k]} \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k]}}{d\eta} l_\eta^{\Omega_k} + \lambda_{0\xi}^{[k]} \frac{1}{L_\xi} \frac{dT^{[k]}}{d\xi} n_\xi^{\Omega_k} + \lambda_{0y}^{[k]} \frac{dT^{[k]}}{dy} m_y^{\Omega_k} \right) \Big|_{K \in \Omega_k^P} = \frac{1}{R^{[k]}} \left(T^{[k]} - T^{[k+1]} \right) \Big|_{K \in \Omega_k^P},$$

$$\left(\lambda_{0\eta}^{[k]} \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k]}}{d\eta} l_\eta^{\Omega_k} + \lambda_{0\xi}^{[k]} \frac{1}{L_\xi} \frac{dT^{[k]}}{d\xi} n_\xi^{\Omega_k} + \lambda_{0y}^{[k]} \frac{dT^{[k]}}{dy} m_y^{\Omega_k} \right) \Big|_{K \in \Omega_k^P} =$$

$$= \left(\lambda_{0\eta}^{[k+1]} \frac{\lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k+1]}}{d\eta} l_\eta^{\Omega_k} + \frac{\lambda_{0\xi}^{[k+1]} \lambda}{L_\xi} \frac{dT^{[k+1]}}{d\xi} n_\xi^{\Omega_k} + \lambda_{0y}^{[k+1]} \frac{dT^{[k+1]}}{dy} m_y^{\Omega_k} \right) \Big|_{K \in \Omega_k^P}, \quad (40)$$

де $R^{[k]}$ – контактний опір на поверхні з'єднання фаз P_k і P_{k+1} .

Застосування умов (40) спрощує описання структурної будови композитного бруса, однак вимагає дослідного чи розрахункового визначення величин контактних опорів $R^{[k]}$.

Результати дослідження. Рівняння (25) носить узагальнений характер, однак підстановкою відповідних значень параметрів λ , κ і α та коефіцієнтів Ламе L_η і L_ξ його можна конкретизувати для бруса певної форми, що дозволяє перевірити правильність його виведення.

Наприклад, розглядаючи випадок бруса із прямолінійною віссю для відповідної прямокутної просторової системи координат [12]:

$$\alpha = 0, \quad \kappa = 0, \quad \lambda = 1, \quad L_\xi = 1, \quad L_\eta = 1. \quad (41)$$

Підстановка (41) до рівняння (25) приводить його до вигляду

$$\mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu_{0\eta}^\lambda \frac{dT}{d\eta} \right) - \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mu_{0\xi}^\lambda \frac{dT}{d\xi} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^\lambda \frac{dT}{dy} \right) = F + T_0 \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \quad (42)$$

Для бруса із круговою віссю, якому відповідає циліндрична кругова система координат [12]:

$$\alpha = \eta, \kappa = \operatorname{tg} \eta, \lambda = \frac{1}{\xi}, L_{\xi} = 1, L_{\eta} = |\xi|. \quad (43)$$

Підставивши (43) до (25) і виконавши перетворення, отримаємо

$$\begin{aligned} \mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{1}{\xi} \left(\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\mu_{0\eta}^{\lambda}}{\xi} \frac{dT}{d\eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{dT}{d\xi} \right) \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^{\lambda} \frac{dT}{dy} \right) = \\ = F + T_0 \left(\mu_{\eta}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\eta}}{\partial \tau} + \mu_{\xi}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\xi}}{\partial \tau} + \mu_y^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (44)$$

У випадку однорідного бруса, коли $\mu_{0\eta}^{\lambda}, \mu_{0\xi}^{\lambda}, \mu_{0y}^{\lambda} = \text{const}$, рівняння (42) та (44) можна легко привести до загальновідомого вигляду, що опосередковано підтверджує правильність перетворень, виконаних у ході отримання рівняння теплопровідності у формі (25).

Для еліптичної системи координат [15], природної для еліптичного бруса, усі поздовжні волокна якого належать однопараметричному сімейству конфокальних еліпсів із фокусною відстанню $2a$:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \eta}{\operatorname{th} \xi} \right), \kappa = \frac{\operatorname{tg} \eta}{\operatorname{th} \xi}, \lambda = 1, L_{\eta} = L_{\xi} = a \sqrt{\operatorname{sh}^2 \xi + \sin^2 \eta}. \quad (45)$$

З урахуванням (45) рівняння теплопровідності (25) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} \mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \xi + \sin^2 \eta} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\mu_{0\eta}^{\lambda}}{a^2} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mu_{0\xi}^{\lambda}}{a^2} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^{\lambda} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ = F + T_0 \left(\mu_{\eta}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\eta}}{\partial \tau} + \mu_{\xi}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\xi}}{\partial \tau} + \mu_y^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (46)$$

Застосувавши до рівняння (46) вихідні дані використані у [21], де розглянуто задачу визначення температурного поля у ізотропному еліптичному циліндрі, отримаємо аналогічні визначальні рівняння, що також підтверджує правильність (25).

У випадку бруса параболічної форми, природною є параболічна циліндрична система координат, для якої [12]:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{\xi}{\eta} \right), \kappa = \frac{\xi}{\eta}, \lambda = -1, L_{\eta} = L_{\xi} = \sqrt{\eta^2 + \xi^2}. \quad (47)$$

Рівняння (25) з урахуванням (46) перетвориться до такого вигляду

$$\begin{aligned} \mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{1}{\eta^2 + \xi^2} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu_{0\eta}^{\lambda} \frac{dT}{d\eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\mu_{0\xi}^{\lambda} \frac{dT}{d\xi} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^{\lambda} \frac{dT}{dy} \right) = \\ = F + T_0 \left(\mu_{\eta}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\eta}}{\partial \tau} + \mu_{\xi}^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_{\xi}}{\partial \tau} + \mu_y^{\beta} \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (48)$$

Класичні криволінійні системи координат, окрім прямокутної та кругової, не дають можливості описати геометрію криволінійного бруса із незмінними лінійними розмірами та формою поперечного перерізу. У [14] дано математичне обґрунтування і отримані співвідношення для параметрів та коефіцієнтів природної системи координат, побудованої на сімействі еквідистант заданої базової кривої (осі бруса), яка дозволяє подолати вказаний недолік класичних криволінійних систем координат. У випадку застосування параметризації за кутом нахилу поперечного перерізу бруса, якщо вісь бруса на розглядуваній ділянці має додатну кривизну:

$$\alpha = \eta, \kappa = \operatorname{tg} \eta, \lambda = \frac{1}{\xi + r_0}, L_{\xi} = 1, L_{\eta} = |\xi + r_0|, r_0 = \left| \frac{1}{\sin \eta} \frac{dx_c(\eta)}{d\eta} \right|. \quad (49)$$

Співвідношення (48) приводять рівняння (25) до такого вигляду

$$\begin{aligned} \mu^p \mu^c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{1}{\xi + r_0} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\mu_{0\eta}^\lambda \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left((\xi + r_0) \mu_{0\xi}^\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{0y}^\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \\ = F + T_0 \left(\mu_\eta^\beta \frac{\partial \varepsilon_\eta}{\partial \tau} + \mu_\xi^\beta \frac{\partial \varepsilon_\xi}{\partial \tau} + \mu_y^\beta \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (50)$$

Висновки. Таким чином, отримані рівняння теплопровідності, у загальній (24) та лінеаризованій (25), (50) формах для композитного бруса з криволінійною плоскою віссю довільної форми у природній системі координат. Отримані рівняння описують процес теплопередачі всередині дискретно-неоднорідного композитного бруса, що складається із однорідних або неперервно-неоднорідних фаз із криволінійною ортотропією теплофізичних та пружних характеристик.

На основі прийнятих загальних вихідних даних щодо форми зовнішніх поверхонь бруса та його внутрішньої будови, у природній системі координат отримані граничні умови трьох типів та виписані умови теплопередачі на межі фаз бруса у випадку їх ідеального теплового контакту та за наявності контактної теплової опору.

Наведено приклади конкретизації загальних рівнянь для брусів заданої форми: прямолінійної, кругової, еліптичної та параболічної, які дозволили перевірити правильність отриманих співвідношень шляхом порівняння із відомими формами рівняння теплопровідності.

Отримані у даній роботі теоретичні залежності разом із побудованими у попередніх роботах системою рівнянь теорії пружності у природній системі координат, інтегральними та диференціальними залежностями для внутрішніх силових факторів та співвідношеннями для моделювання навантажень різного типу, складають необхідну аналітичну базу для розв'язання різних задач термопружного деформування композитних криволінійних брусів.

Список використаних джерел:

1. Композиционные материалы: Справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. Москва, 1990. 512 с.
2. Мищенко А. В. Стационарное температурное поле в многослойных стержнях с разрывами ширины сечения. *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14, Вып. 1. С. 12–21.
3. Пискунов В. Г., Сипетов В. С. Об одном подходе к решению задач термоупругости слоистых пластин. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 1. С. 28–31.
4. Verijenko V. E., Tauchert T. R., Tabakov P. Y. Refined Theory of Laminated Anisotropic Shells for the Solution of Thermal Stress Problems. *J. Therm. Stresses*. 1999. 22(1). P. 75–100.
5. Shupikov A. N., Smetankina N. V., Svet Y. V. Nonstationary Heat Conduction in Complex-Shape Laminated Plates. *J. Heat Transfer*. 2007. 129(3). P. 335–341.
6. Vosoughi A. R., Malekzadeh P., Banan Mo. R., Banan Ma. R. Thermal postbuckling of laminated composite skew plates with temperature-dependent properties. *Thin-Walled Structures*. 2011. Vol. 49, No. 7. P. 913–922.
7. Turusov R. A. Elastic and thermal behavior of a layered structure I. Experiment and theory. *Mechanics of Composite Materials*. 2015. Vol. 50, No. 6. P. 801–808.
8. Norouzi M., Rahmani H., Birjandi A. K., Joneidi A. A. A General Exact Analytical Solution for Anisotropic Non-Axisymmetric Heat Conduction in Composite Cylindrical Shells. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. 93 P. 41–56.
9. Немировский Ю. В., Янковский А. П. Асимптотический анализ нестационарной задачи теплопроводности конструктивно и физически неоднородных композитных стержней при анизотропии общего вида. *Конструкции из композиционных материалов*. 2008. № 4. С. 10–27.
10. Gorbachev V. I. Heat propagation in a nonuniform rod of variable cross section. *Moscow University Mechanics Bulletin*. 2017. Vol. 72, No. 2. P. 48–53.
11. Плещачевский Ю. М., Старовойтов Э. И., Леоненко Д. В. Деформирование трехслойного упругого стержня нагрузками различных форм в температурном поле. *Теоретическая и прикладная механика*. 2017. Вып. 32. С. 5–12.
12. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Рівняння теорії пружності для композитних брусів із плоскою віссю довільної форми у природній криволінійній системі координат. *Міжвуз. зб. «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2018. Вип. 63. С. 89-97.
13. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Природна криволінійна циліндрична система координат для стержнів із плоскою віссю довільної форми. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2017. Вип. 68. С. 31-38.

14. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Природна система координат для криволінійних композитних брусків із незмінними лінійними розмірами поперечних перерізів. *Міжвуз. зб. «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2019. Вип. 65. С. 106-117.
15. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Інтегральні та диференціальні співвідношення для внутрішніх силових факторів при згині бруса з криволінійною плоскою віссю довільної форми. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2018. Вип. 70. С. 40-48.
16. Ковальчук С. Б., Горик О. В. Аналітичне моделювання зосереджених та локалізованих навантажень брусків із криволінійною плоскою віссю. Частина 1. Моделювання зосереджених у точці навантажень. *Вісник ОДАБА*. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 31-40.
17. Ковальчук С. Б. Аналітичне моделювання зосереджених та локалізованих навантажень брусків із криволінійною плоскою віссю. Частина 2. Моделювання локалізованих навантажень та приклади застосування. *Вісник ОДАБА*. Одеса: ОДАБА, 2019. Вип. 76. С. 31-42.
18. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. Москва, 1985. 480 с.
19. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. под. ред. А. А. Померанцева. Москва, 1964. 488 с.
20. Коваленко А. Д. Термоупругость. Киев, 1975. 216 с.
21. McLachlan N. W. Heat conduction in elliptical cylinder and an analogous electromagnetic problem. *Philosophical Magazine*, 1945. 36(260). P. 600–609.

Рецензенти:

Горик Олексій Володимирович, завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін Полтавської державної аграрної академії, доктор технічних наук, професор.

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

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 620.171.3 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.6

Г.В. Козбур, О.К. Шкодзінський

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОСЕСИМЕТРИЧНІ ПЛАСТИЧНІ ДЕФОРМАЦІЇ ТОНКОСТІННОГО ЦИЛІНДРА

Отримано умови граничної рівноваги пластичного деформування тонкостінних циліндрів, виготовлених з металічних ізотропних матеріалів. Вивчалися великі пластичні деформації від дії внутрішнього тиску та осевого розтягу. Використано умову нестисливості в логарифмічних деформаціях. Прийнято виконання гіпотез Кірхгофа-Лява. Використано умови максимальних навантажень початку процесу локалізації деформацій. Прослідковано вплив виду напруженого стану та показників геометрії циліндра на величину граничних істинних напружень.

Ключові слова: великі пластичні деформації, умови максимальних навантажень, локалізація деформацій, складний напружений стан

Г.В. Козбур, О.К. Шкодзинский**ОСЕСИМЕТРИЧНЫЕ ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА**

Получены условия предельного равновесия пластического деформирования тонкостенных цилиндров, изготовленных из металлических изотропных материалов. Изучались большие пластические деформации от действия внутреннего давления и осевого растяжения. Использовано условие несжимаемости в логарифмических деформациях. Принято выполнения гипотез Кирхгофа-Лява. Использованы условия максимальных нагрузок начала процесса локализации деформаций. Прослежены влияние вида напряженного состояния и показателей геометрии цилиндра на величину предельных истинных напряжений.

Ключевые слова: большие пластические деформации, условия максимальных нагрузок, локализация деформаций, сложное напряженное состояние.

H.V. Kozbur, O.K. Shkodzinsky**AXISYMMETRIC PLASTIC DEFORMATIONS OF A THIN-WALLED CYLINDER**

The conditions for predicting the behavior of thin-walled cylinders of metallic isotropic materials loaded by internal pressure and axial tensile force are presented in the article. The area of large plastic deformation was investigated, and the corresponding incompressibility condition was used. Elastic deformations were neglected. The maximum load conditions were used to derive the relationship between the residual relative deformations and the true stresses at the time the strain was localized. Influence of stress state and parameters of thin-walled tube geometry on the value of limit true stresses and residual deformations is investigated. A graphical analysis of the obtained conditions was carried out.

Keywords: large plastic deformations, maximum load conditions, localization of deformations, complex stress state.

Постановка проблеми. Для забезпечення надійності роботи важконавантажених трубчастих елементів необхідно вміти визначати граничні значення напружень, що спричиняють недопустимі пластичні деформації та руйнування. У зв'язку з цим вивчення механізмів деформування та руйнування разом з удосконаленням методів оцінки граничних станів тонкостінних циліндричних конструкцій чи їх елементів конструкцій є актуальним питанням механіки деформівного твердого тіла. Тонкостінні циліндричні конструкції мають дуже широкий спектр застосувань в побуті та промисловості. Разом з тим вони становлять науково-практичний інтерес для моделювання поведінки елементів конструкцій інших геометричних форм в умовах складного напруженого стану. Лабораторні випробування тонкостінних трубчастих зразків мають можливість реалізувати широкий діапазон співвідношень головних напружень, отримуючи порівняно високу однорідність напруженого і деформованого станів. З іншого боку, у зв'язку з появою нової комп'ютерної техніки та зростанням її обчислювальних можливостей, розробкою нових конструкційних матеріалів та необхідністю врахування нових умов роботи конструкцій, постійно зростають вимоги до точності та надійності розрахункових граничних значень показників напружено-деформованого стану елементів конструкцій. Експериментальне дослідження механізмів деформування та руйнування матеріалів разом з удосконаленням феноменологічних підходів до оцінки граничних станів тонкостінних циліндричних конструкцій чи їх елементів залишаються актуальним питанням механіки деформівного твердого тіла. Дослідження граничних станів пластичності чи міцності зразків матеріалів в умовах складного напруженого стану зводиться до формулювання гіпотез та отримання відповідних критеріїв. Практично вичерпні огляди таких критеріїв надано в [1, 4]. Область застосування пропонує критеріїв обґрунтовують за результатами експериментів над тонкостінними циліндрами, що навантажуються внутрішнім тиском та осевим розтягом. Це дає можливість моделювати складні

напружені стани в стінках конструкцій та прогнозувати максимальні навантаження та найбільші рівномірні залишкові деформації. Проте, на сьогодні не існує гіпотези, теорії чи критерію, які б встановлювали величини граничних напружень та/чи деформацій для зразків довільної геометричної форми за складного напруженого стану. Тому удосконалення теоретичного апарату підходів та методів оцінки граничних станів елементів конструкцій залишається актуальною проблемою механіки деформівного твердого тіла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від умов навантаження матеріал може знаходитись в різних механічних станах - пружному, пластичному стані або стані руйнування. Граничним називають такий напружений стан матеріалу, при якому відбуваються якісні зміни у властивостях матеріалу – перехід від одного механічного стану до іншого. У роботі вивчались граничні стани тонкостінних циліндричних зразків, виконаних з металічних ізотропних пластичних матеріалів, пов'язані з появою помітних залишкових деформацій.

Критерії міцності для ізотропних матеріалів були розроблені ще в кінці 19 ст. (І. Баушингер, Г. Галілей, Н. Генкі, М.Т. Губер, Ш.О. Кулон, Г. Ламе, І. Максвел, Ф. Маріот, Р. Мізер, М. Нав'є та ін.) [2]. Найбільшого визнання набули «класичні» критерії: критерій найбільших нормальних напружень Г. Галілея, критерій найбільших відносних видовжень Е. Маріота, критерій найбільших дотичних напружень Ш. Кулона, енергетичний критерій Р. Мізеса. Усі класичні теорії мали спільний недолік – не враховували впливу виду напруженого стану та різного опору при дослідах на розтяг та стиск.

Класичні теорії були розвинуті та удосконалені, розроблено нові критерії, що враховують різні види навантажень та різну опірність матеріалів розтягу та стиску (Г.С.Писаренко, А.А.Лебедев, Б.І.Ковальчук, Д.Друкер, В.Прагер, Ю.І.Ягн, А.І.Боткін, К.Н.Кан, Ю.С.Первушин, В.П.Сдобирєв, І.І.Трунін, І.Н.Шканов, І.А.Біргер, Дж.Марін, К.Р.Зодерберг та ін.) [3]. У 20 ст. було проведено багаточисельні результати експериментів, що підтверджували чи спростовували розроблені теорії (Guest, Scoble, Smith, Lode, Taylor-Quinney, Ivey, Paul, Bell, Писаренко і Лебедев, ін.). Проте жоден з більш ніж сотні критеріїв не узгоджується з результатами дослідів для різних матеріалів. Авторами Кішкіним і Ратнер було запропоновано попередньо класифікувати металічні матеріали залежно від відношення границі міцності зсуву до границі міцності розтягу. Порівняльну таблицю отриманих експериментальних даних та придатності класичних критеріїв, наведену в [4], показано на рис. 1.

Table 2. Comparison of three yield criteria with experimental results

Researchers	Materials	Specimen	shear/tension τ_y / σ_y	Suitable Criterion
Guest, 1900	steel,		0.474, 0.727	
Guest, 1900	steel, brass, etc.	tubes	0.474	
Hancock, 1906,1908	mild steel	solid rods,tube	0.50 to 0.82	
Scoble, 1906	mild steel	solid rods	0.45 to 0.57	Tresca
Smith, 1909	mild steel	solid rods	0.55-0.56	between Tresca and von Mises
Turner, 1909-1911	steels		0.55 to 0.65	Tresca
Mason, 1909	mild steel	tubes	0.5 0.64	Tresca
Scoble,1910	steel		0.376, 0.432, 0.452	no one agreed
Becker, 1916	mild steel	tubes		no one agreed
Secley and Putnam	steels	bars & tubes	0.6	> von Mises
Seigle and Cretin, 1925	mild steel	solid bars	0.45 to 0.49	Tresca
Lode, 1926	iron, copper etc.	tubes		von Mises
Ros and Eichinger, 1926	mild steel	tubes		von Mises
Taylor and Quinney, 1931	aluminum, steel	tubes		von Mises
	copper, mild steel			>von Mises
Morrison, 1940	mild steel	tubes		Tresca, von Mises
Davis, 1945-1948	copper,	tubes		von Mises
Osgood, 1947	aluminum alloy	tubes		von Mises
Cunningham, 1947	magnesium alloy	tubes		von Mises
Bishop-Hill, 1951	polycrystals	tubes	0.54	von Mises
Fikri, Johnson, 1955	mild steel	tubes		> von Mises
Marin and Hu, 1956	mild steel	tubes		von Mises
Naghdi, Essenberg, and Koff, 1958	aluminum alloy	tubes		> von Mises
Hu and Bratt, 1958	aluminum alloy	tubes		von Mises
Ivey, 1961	aluminum alloy	tubes		Twin shear
Bertsch-Findley, 1962	aluminum alloy	tubes		von Mises
Mair-Pugh, 1964	copper	tubes		Twin shear
Mair-Pugh, 1964	copper	tubes		von Mises
Chernyak <i>et al</i> , 1965	mild steel	tubes		von Mises
Miastkowski, 1965	brass			von Mises
Rogan, 1969	steel	tubes		Tresca
Mittal, 1969, 1971	aluminum	tubes	0.57	von Mises
Dawson, 1970	polycrystals		0.64	near Twin shear
Phillips <i>et al</i> , 1968- 1972	aluminum	tubes at elevated temperature		between Tresca and von Mises
Deneschi <i>et al</i> , 1976	aluminum, copper	tubes, low temperature	0.6	> von Mises
Pisarenko <i>et al</i> , 1984	copper, Cr-steel	tubes, low temperature		von Mises
Winstone, 1984	nickel alloy	tubes at elevated temperature	0.7	Twin shear
Ellyin, 1989	titanium	tubes	0.66-0.7	Twin shear
Wu-Yeh, 1991	Aluminum	tubes	0.58	von Mises
	stainless steel		0.66-0.7	Twin shear
Ishikawa, 1997	stainless steel	tubes	0.6-0.63	> von Mises
Granlund,Olsson, 1998	structural steel	flat cruciform specimens		between Tresca and von Mises

Рис. 1. Відповідність класичних критеріїв до виду зразків та напруженого стану

Авторами Hershey [5], Davis [6], Paul [7], Hosford [8] та ін. було запропоновано узагальнені критерії міцності, які можна було б застосовувати до ширшого спектру матеріалів, що знаходяться в пластичному, крихкому або проміжних станах.

Питанням стійкості циліндричних оболонок в умовах складного напруженого стану присвячені роботи [9; 10; 11; 12]. Питання впливу виду напруженого стану при пластичному деформуванні тонкостінних циліндрів на значення граничних напружень та залишкових деформацій досліджували автори Камінський та Бастун в [16], Гігіняк, Лебелєв та Шкодзінський в [17]. Питання розробки узагальнених критеріїв, які враховували б як істинні напруження, вид напруженого стану, так геометричні особливості елементів конструкцій, в комплексі – не розглядалось. Численні експерименти (Лебедев, Ковальчук, Ламашевський, Гігіняк, Шкодзінський, Кувабара та ін.), які демонструють вплив виду напруженого стану на граничні значення напружень та деформацій, аналітичного обґрунтування чи пояснення не мають.

Мета роботи. Отримати аналітичні залежності, які б описували умови настання моменту локалізації пластичних деформацій в стінках тонкостінних циліндрів від дії внутрішнього тиску та осьового розтягу. Прослідкувати вплив виду напруженого стану та геометричних характеристик трубчастих зразків на показники міцності.

Постановка задачі. Нехай циліндрична трубка із закритими торцями навантажена осьовим зусиллям N та внутрішнім тиском q . Прийmemo виконання гіпотез Кірхгофа-Лява теорії тонкостінних оболонок [13], вважатимемо напружений стан тонкостінного циліндра безмоментним. Матеріал оболонки вважатимемо ізотропним та нестисливим.

Розглянемо великі рівномірні пластичні деформації трубки. Деформаціями пружної ділянки знехтуємо. Нехай радіус серединної поверхні дорівнює R , товщина трубки рівна h , ε_z , ε_θ і ε_r - осьові, колові та радіальні залишкові деформації відповідно.

Істинні осьові σ_z та колові σ_θ напруження визначаються співвідношеннями (1), (2) [3]:

$$\sigma_z = \frac{N}{2\pi R(1+\varepsilon_\theta)h(1+\varepsilon_r)} + \frac{\left(R(1+\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2}(1+\varepsilon_r)\right)^2 \cdot q}{2R(1+\varepsilon_\theta)h(1+\varepsilon_r)}, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{q\left(R(1+\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2}(1+\varepsilon_r)\right)}{h(1+\varepsilon_r)}. \quad (2)$$

Для даної постановки задачі радіальними напруженнями в стінці трубки знехтуємо: $\sigma_r = 0$.

Для виведення умови втрати стійкості процесу пластичного деформування візьmemo за основу критерій максимального навантаження Дорна-Надаї [14], використаний авторами у [15, 16]: помітні пластичні деформації починають локалізуватись в районі утворення шийки, коли тиск або осьове навантаження досягають максимуму, що аналітично виражається однією з двох умов: $dq = 0$ та $dN = 0$.

Умова $dq = 0$ із прийняттям пропорційності навантаження

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} = k, \quad (3)$$

співвідношення між осьовою та коловою залишковими деформаціями

$$\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_\theta} = n, \quad (4)$$

та умовою нестисливості матеріалу для ділянки великих пластичних деформацій:

$$(1+\varepsilon_r)(1+\varepsilon_\theta)(1+\varepsilon_z) = 1 \quad (5)$$

приводить до роз'язування диференціального рівняння (6), як це показано в [18]:

$$\frac{1}{(1+\varepsilon_\theta)^2(1+n\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2R}} d\sigma_\theta - \sigma_\theta \frac{2(1+\varepsilon_\theta)(1+n\varepsilon_\theta) + n(1+\varepsilon_\theta)^2}{\left((1+\varepsilon_\theta)^2(1+n\varepsilon_\theta) - \frac{h}{2R}\right)^2} d\varepsilon_\theta = 0. \quad (6)$$

Загальний інтеграл рівняння (6) має вигляд:

$$\sigma_{\theta} = C_{\theta} \left[(1 + \varepsilon_{\theta})^2 (1 + n\varepsilon_{\theta}) - h / 2R \right]. \quad (7)$$

Розглянемо умову $dN = 0$. За аналогічних позначень, умови (5) та зробивши припущення $\frac{h(1 + \varepsilon_r)}{R(1 + \varepsilon_{\theta})} \approx \frac{h}{R}$, отримаємо диференціальне рівняння

$$\left(1 - \frac{1}{2k} + \frac{h}{4kR} \right) \frac{d\sigma_z}{\sigma_z} = \left[\left(1 - \frac{1}{2k} + \frac{h}{2kR} \right) \frac{1}{1 + \varepsilon_z} + \frac{h}{2knR} \frac{1}{1 + \frac{1}{n}\varepsilon_z} \right] d\varepsilon_z \quad (8)$$

та його загальний інтеграл:

$$\sigma_z = C_z \left[(1 + \varepsilon_z)^{2\left(2k-1+\frac{h}{R}\right)} \left(1 + \frac{1}{n}\varepsilon_z\right)^{\frac{2h}{R}} \right]^{\frac{1}{4k-2+\frac{h}{R}}}. \quad (9)$$

Умови (7) та (9) визначають залежність граничних значень колових та осьових напружень та деформацій, що виникають у тонкостінних циліндрах на відстані, достатній для нехтування крайовими ефектами, за складного напруженого стану, реалізованого дією внутрішнього тиску та розтягуючого осьового зусилля.

Масштабний ефект при реалізації пропорційного навантаження тонкостінної циліндричної трубки

Напружений стан циліндричної трубки, навантаженої внутрішнім тиском q та розтягуючим зусиллям N , описується двома головними напруженнями – осьовим σ_z та коловим σ_{θ} , що знаходять із формул (розглянемо випадок умовних напружень):

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{N}{2\pi Rh} + \frac{q(R-h/2)^2}{2Rh}, \\ \sigma_{\theta} &= \frac{q(R-h/2)}{h}. \end{aligned} \quad (10)$$

У випадку пропорційного навантаження трубки (3), при якому напрямки головних напружень та відношення між їх числовими значеннями залишаються постійними, після тотожних перетворень, відкинувши доданок $(h/R)^2$ із врахуванням тонкостінності трубки, отримаємо:

$$\frac{N}{q} = 2\pi R^2 \left[k - \frac{1}{2} + \frac{h}{2R}(1-k) \right]. \quad (11)$$

Окрім безрозмірного показника тонкостінності h/R , що може бути однаковим для трубок різних розмірів, на значення відношення N/q квадратично впливає діаметр трубки. Таким чином, спостерігається масштабний ефект при реалізації простого навантаження трубки.

Так, значення відношень N/q для тонкостінної трубки із $h/R = 0,05$ при різних k та графічне зображення залежності (11) наведені на рисунку 2:

k	$\frac{N}{qR^2}$
0	-3,05
0,5	0,09
1	3,14
1,5	6,24
2	9,33
5	27,90

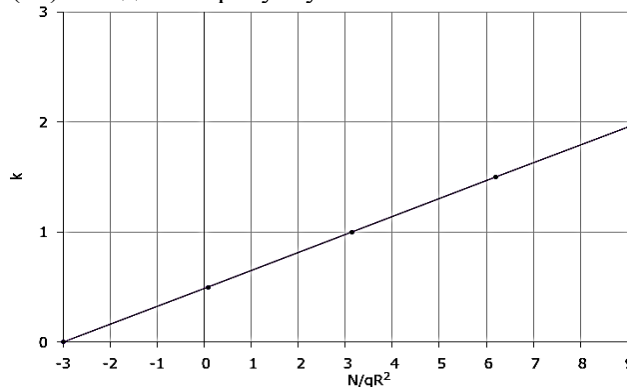


Рис. 2. Графічне зображення залежності (11)

Чисельні результати підтверджуються експериментально: $k = 0,5$ спостерігається при навантаженні циліндричної трубки лише внутрішнім тиском, тобто при $N \approx 0$.

Аналіз граничних умов (7), (9) та дискусія

Умова (7) є аналітичним виразом для знаходження граничного колового напруження у тонкостінній циліндричній трубці для випадку $\sigma_\theta > \sigma_z$, умова (9) – граничного осьового напруження для випадку $\sigma_z > \sigma_\theta$. При $\sigma_z > 0$ та $\sigma_\theta > 0$ умови (7) та (9) є граничними умовами для складних напружених станів із співвідношенням головних напружень $k = 0,5 \dots 2$.

З умови (7) видно, що граничне значення істинного колового напруження σ_θ залежить від виду напруженого стану та показника тонкостінності h/R циліндричного зразка. Оскільки при навантаженні циліндричної трубки внутрішнім тиском колові залишкові деформації $\varepsilon_\theta > 0$, то найменшого свого значення для $0,5 < k < 2$ граничне колове істинне напруження σ_θ буде набувати при $n \approx 0$.

Показник тонкостінності h/R впливає на значення і σ_θ , і σ_z . Із формули (7) видно, що збільшення показника h/R зменшує рівень істинних напружень в коловому напрямку. Формула (9) аналітично підтверджує збільшення істинних граничних значень осьових напружень зі

збільшенням відношення h/R , оскільки при $0 < h/R < 0,5$ виконується $\left[\frac{2(1+2h/R)}{2+h/R} \right]' > 0$.

Координати точок перетину діаграми деформування та граничних кривих, побудованих за формулами (7) та (9), визначають значення залишкових пластичних деформацій та істинних напружень, що відповідають початку процесу локалізації деформацій.

Для знаходження постійної інтегрування C_θ у загальному інтегралі (7) використано частковий випадок настання граничного стану пластичного деформування циліндричної трубки, навантаженої внутрішнім тиском q , в цьому разі $k = 0,5$. Граничні колові напруження і деформація ε_θ^b , σ_θ^b відповідають початкові локалізації деформацій пластичного матеріалу від дії внутрішнього тиску.

Аналогічно на основі значень граничних напружень та граничних залишкових деформацій $\sigma_z = \sigma_z^b$, $\varepsilon_z = \varepsilon_z^b$ циліндричних трубок при $k = 2$ визначаються сталі інтегрування C_z для умови (9).

Графічне дослідження умов (7) та (9)

Графіки умов настання моменту локалізації деформацій (7) циліндричної трубки для випадку $\sigma_\theta > \sigma_z$ було побудовано для трьох значень співвідношень головних напружень в діапазоні $0,5 \dots 1$ та показника тонкостінності $h/R = 0,06$ (рис. 3, а). По вертикальній осі відкладались приведені напруження $\sigma_\theta^b / C_\theta$.

Графіки умов втрати міцності (9) для випадку $\sigma_z > \sigma_\theta$, побудовані для $k = 1 \dots 2$, показано на рисунку 3, б. По вертикальній осі відкладались приведені напруження σ_z^b / C_z , значення показника тонкостінності було взято $h/R = 0,06$.

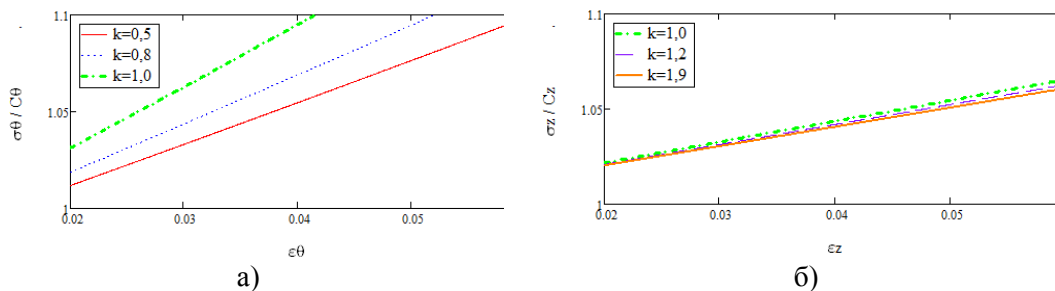


Рис. 3. а) графічне зображення умови (7) для випадку $\sigma_\theta > \sigma_z$ при різних k ; б) графічне зображення умови (9) для випадку $\sigma_z > \sigma_\theta$ при різних k .

Аналіз графічних зображень умов (7) та (9), виконаних для випадків $\sigma_\theta > \sigma_z > 0$ (рис. 3, а) та $\sigma_z > \sigma_\theta > 0$ (рис. 3, б) відповідно, показав зменшення рівня істинних напружень в стінці трубки при наближенні значень співвідношень головних напружень до 0,5 та 2, збільшуючись при $k \rightarrow 1$.

З метою прослідкувати вплив показника тонкостінності h/R циліндричної трубки на значення граничних залишкових деформацій та істинних напружень було побудовано серію графіків, у яких фіксувались показник виду напруженого стану k та вказаний параметр.

На рисунку 4 показано граничні криві, описані умовою (7) при співвідношеннях головних напружень $k = 0,5$ та $k = 1$. Параметру h/R було надано значень 0,04; 0,06 та 0,08.

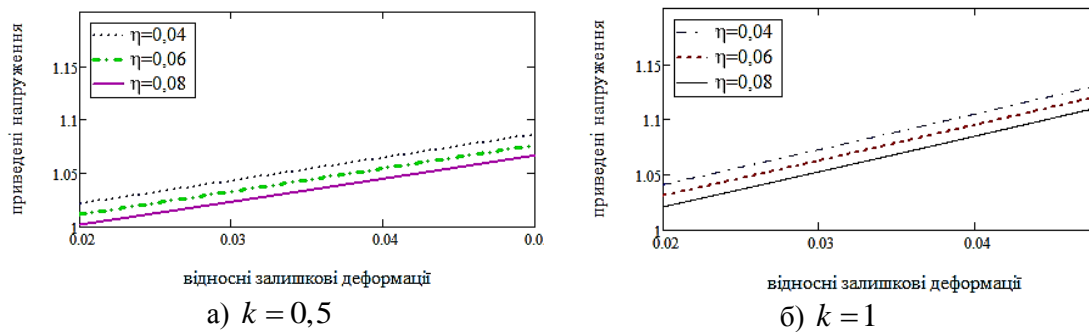


Рис. 4. Графічне зображення залежності граничних колових напружень σ_θ та залишкових деформацій ε_θ від параметра h/R

Аналіз рис.4 показав зменшення рівня істинних напружень в стінках циліндричної оболонки із зростанням значень h/R в обох випадках. Істинне граничне напруження досягається при меншому рівні залишкових пластичних деформацій, якщо відношення початкової товщини стінки трубки до її початкового радіуса є більшим. Також зазначимо, що при $k = 0,5$ певний рівень відносних залишкових деформацій досягається меншим рівнем напружень, ніж при $k = 1$, тобто для одного і того ж показника тонкостінності η ресурс трубки зменшується при наближенні значення k до 0,5.

Побудова граничних кривих, описаних умовою (7), при співвідношеннях головних напружень $k = 1,0; 1,2; 1,5; 1,9$ та значеннях $\eta = 0,04; 0,06; 0,08$ показала, що ресурс міцності циліндричної трубки в умовах навантаження внутрішнім тиском та осьовим розтягуючим зусиллям практично не залежить від відношення h/R у випадку, коли визначальними є напруження σ_z , які передують утворенню шийки циліндричного зразка.

Узгодження з експериментальними даними

Для перевірки адекватності побудованої моделі прогнозування граничних станів при деформуванні тонкостінної циліндричної трубки від дії внутрішнього тиску та осьового розтягуючого зусилля було відібрано результати експериментів, наведені в [3] для конструкційних сталей двох марок: сталь 10ГН2МФА та сталь 0,37%С.

Граничні криві побудовано відповідно до умов (7) та (9) для різних співвідношень головних напружень k . Дані експерименту показано точками, при побудові враховано масштабування вертикальної осі – відкладались приведені напруження.

На рисунках 5,6 показано граничні криві та дані експерименту для сталі 10ГН2МФА. Рисунки 5, а та 6, а відображають загальну картину перетину експериментальної кривої деформування та розрахункових граничних кривих, побудованих за формулами (7) та (9) відповідно. Рисунки 5, б та 6, б показують задовільне узгодження розрахункових значень напружено-деформованого стану з експериментом. Незначну похибку, отриману при розрахунку осьових граничних напружень та залишкових деформацій, можна пояснити похибками заокруглень при знятті експериментальних даних чи обчисленнях, а також впливом прийнятих допущень при виведенні граничної умови (9).

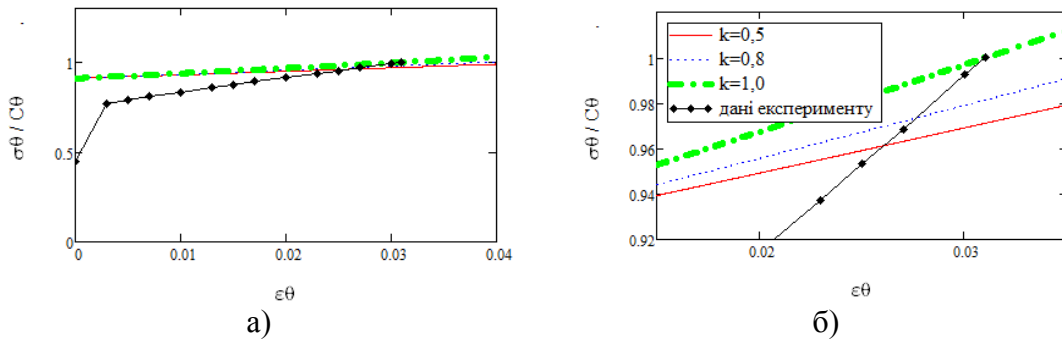


Рис. 5. Експериментальні криві деформування сталі 10ГН2МФА та розрахункові граничні криві, отримані за умовою (7), загальна картина (а) та деталізація перетину (б) при різних k

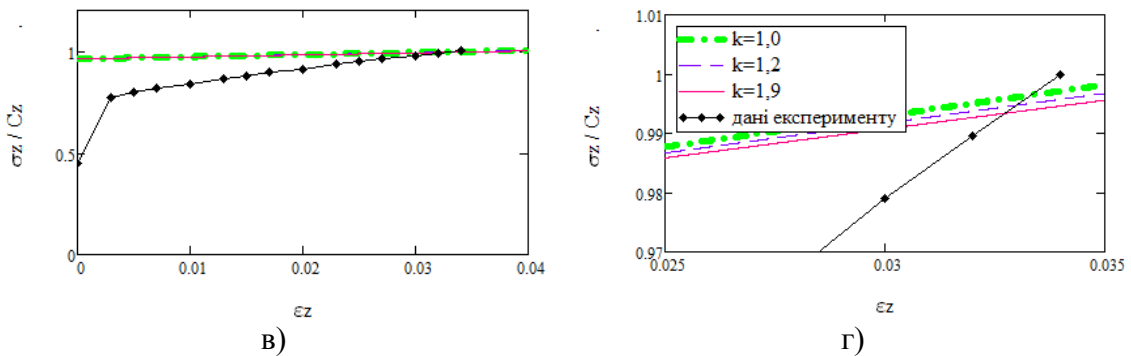


Рис. 6. Експериментальні криві деформування сталі 10ГН2МФА та розрахункові граничні криві, отримані за умовою (9), загальна картина (а) та деталізація перетину (б) при різних k

На рисунках 7, 8 показано граничні криві та дані експерименту для сталі 0,37%С, відібрані для $k=1$. Рисунки 7 (а) та 8 (а) відображають криві деформування сталі 0,37%С, отримані експериментально та граничні криві, отримані за умовами (7) та (9) відповідно. Загальна картина відображає повну відповідність розрахункових значень експериментальним.

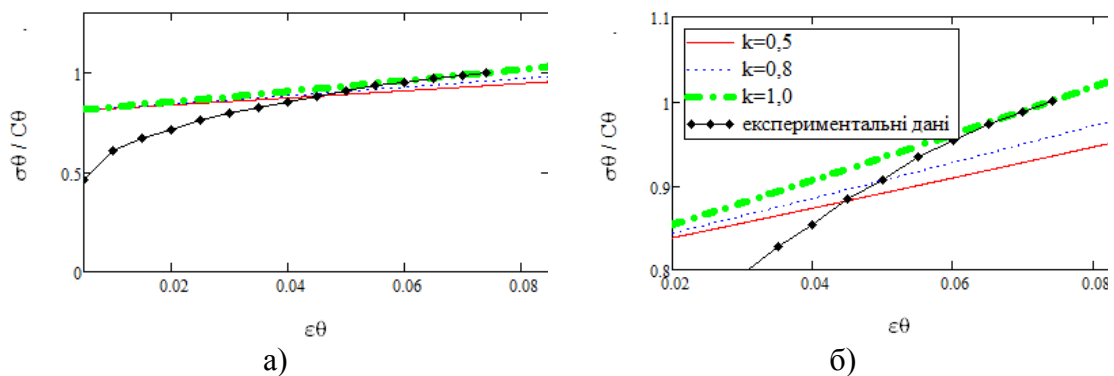


Рис. 7. Експериментальні криві деформування сталі 0,37%С та розрахункові граничні криві, отримані за умовою (7), загальна картина (а) та деталізація перетину (б) при різних k

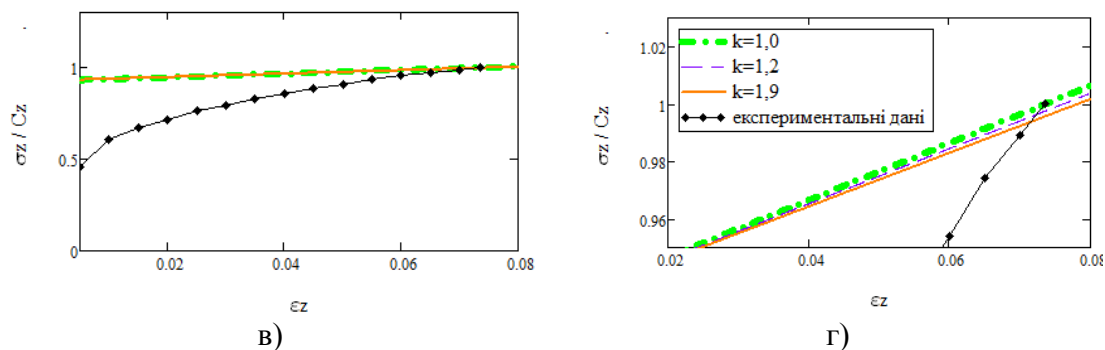


Рис. 8. Експериментальні криві деформування сталі 0,37%С та розрахункові граничні криві, отримані за умовою (9), загальна картина (а) та деталізація перетину (б) при різних k

Висновки та перспективи.

Розроблено методику, яка дає можливість прогнозувати поведінку тонкостінних циліндричних трубчастих зразків металевих ізотропних матеріалів, навантажених внутрішнім тиском та осьовим розтягуючим зусиллям, виходячи із результатів двох експериментів – навантаження внутрішнім тиском P та одновісного розтягу силою N . Отримані умови для знаходження моменту втрати стійкості процесу пластичного деформування (7) та (9), які враховують як вид напруженого стану, так геометричні особливості зразків.

Побудова кривих деформування конструкційних матеріалів (сталі 10ГН2МФА та сталі 0,37%С), отриманих експериментальним шляхом та розрахункових граничних кривих для умов (7) та (9) в одній системі координат показала задовільну узгодженість між теорією та експериментом.

Аналітично доведено зменшення ресурсу міцності тонкостінного циліндра при співвідношеннях головних напружень $k \rightarrow 0,5$ та $k \rightarrow 2$, що підтверджується експериментами.

Отримані у статті нові умови настання моменту втрати стійкості пластичного деформування тонкостінних циліндрів, спричиненої дією внутрішнього тиску та осьового розтягу удосконалюють теоретичний апарат для оцінювання рівня безпеки тонкостінних посудин, які зазнають пластичних або пружно-пластичних деформацій в умовах складного напруженого стану.

Узагальнення запропонованої методики для тонкостінних осесиметричних оболонок довільної гаусівської кривизни дозволить застосувати її до широкого класу конструкційних елементів, що працюють в умовах складнонапруженого стану.

Список використаних джерел:

1. Потапова Л.Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения? / Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев. – М. : «Издательство Машиностроение-1», 2005. – 244 с. – ISBN 5-94275-197-8.
2. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т.Трошенко, А.А.Лебедев, В.А.Стрижало и др. – К. : Логос, 2000. – 571 с. – ISBN 966-581-174-6.
3. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А.А.Лебедев, Б.И.Ковальчук, Ф.Ф.Гигиняк, В.П.Ламашевский; под ред. А.А. Лебедева – К. : Издательский Дом «Ин Юре», 2003. – 540 с. – ISBN 966-8088-36-0.
4. Yu M.-H. Advances in strength theories for materials under complex stress state the 20th century // Appl. Mech. Rev. – 2002. – Vol. 55, no. 3. – P. 169–218. – <https://doi.org/10.1115/1.1472455>
5. Hershey AV 1954, The plasticity of an isotropic aggregate of an-isotropic face-centered cubic crystals, ASME J. Appl. Mech., 21~3.
6. Davis E. A. The Bailey Flow Rule and Associated Yield Surface. J. Appl. Mech. 28, 310. <https://doi.org/10.1115/1.3641679>.
7. PAUL, B. Macroscopic criteria for plastic flow and brittle fracture. Fracture, 1968, 2: 313-496.
8. Hosford, W.F.: A generalized isotropic yield criterion. ASME J. Appl. Mech. E39(2), 1972. 607–609.
9. Tomita Y., Shindo A., Nagai M. Axisymmetric deformation of circular elastic-plastic tubes under axial tension and internal pressure. / Y. Tomita., A. Shindo, M. Nagai // International Journal of Mechanical Sciences, 1984. – № 26. – С. 437-444. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(84\)90033-X](https://doi.org/10.1016/0020-7403(84)90033-X)

10. Баженов В.Г., Ломунов В.К. Экспериментально-теоретическое исследование процесса образования шейки при растяжении стального трубчатого образца до разрыва / В. Баженов, В. Ломунов. - Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Н.Новгород: ННГУ, 2001. С. 35–41.
11. Григолюк Э.И. Устойчивость оболочек. / Э. Григолюк, В. Кабанов — М.:Наука. 1978. – 360 с.
12. Пикуль В. В. Современное состояние теории устойчивости оболочек. / В. В. Пикуль // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2008. - Вып. № 3.
13. Kirchhoff–Love plate theory. https://en.wikipedia.org/wiki/Kirchhoff%E2%80%93Love_plate_theory
14. Надаи А. Пластичность и разрушение твёрдых тел. Том 1 Под ред. Г. С. Шапиро. в 2-х томах. – Москва : Иностранная литература, 1954. – 647 с.
15. Шкодзінський О.К. Методика дослідження стійкості процесу пластичного деформування ізотропних матеріалів для плоского напруженого стану / О.К. Шкодзінський, Г.В. Козбур. // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2007. – Т.12, №4. – С. 26–31.
16. Каминский А.А. Деформационное упрочнение и разрушение металлов при переменных процессах нагружения / А.А. Каминский, В.Н. Бастун. – К. : Наук.думка, 1985. – 168 с. Гігіняк Ф.Ф.
17. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану : Монографія / Гігіняк Ф.Ф., Лебедев А.О., Шкодзінський О.К. — К. : Наукова думка , 2003 — 270 с. — ISBN 9660007868.
18. Prediction technique for thin-walled cylindrical tubes boundary state / Halyna Kozbur / Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2019. — Vol 94. — No 2. — P. 145–155. — (Mathematical modeling. Mathematics). https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2019.01.147.

Рецензенти:

Марущак Павло Орестович, зав. каф. автоматизації технологічних процесів і виробництв ТНТУ ім. Івана Пулюя, д. т. наук, професор

Хохлова Лариса Григорівна, к.ф.-м.н., доц. каф. математики та методики її навчання ТНПУ ім.В.Гнатюка

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 519.57: 536.2 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.7

Б.Б. Колупаєв*Інститут кібернетики Рівненського Міжнародного економіко-гуманітарного університету
ім. С.Дем'янука***МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ЛІНІЙНИХ
ГНУЧКОЛАНЦЮГОВИХ ПОЛІМЕРІВ**

На основі запропонованої моделі розроблено метод розрахунку коефіцієнта теплопровідності лінійних гнучколанцюгових полімерів. Модель ґрунтується на тому, що структура полімерів в конденсованому стані являє собою набір підсистем, які володіють обмеженою автономністю. Отримані результати дозволяють передбачити оптимальні умови виготовлення та експлуатації матеріалу в температурних і силових полях.

Ключові слова: теплопровідність, макромолекула, перетворення Лапласа, релаксація.

Б.Б. Колупаев**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ
 ГИБКОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

На основании предложенной модели разработан метод расчёта коэффициента теплопроводности линейных гибкоцепных полимеров. Модель основана на том, что структура полимеров в конденсированном состоянии представляет собой набор подсистем, которые владеют ограниченной автономностью. Полученные результаты позволяют прогнозировать оптимальные условия изготовления, а также эксплуатации материала в температурных и силовых полях.

Ключевые слова: теплопроводность, макромолекула, преобразования Лапласа, релаксация.

B. Kolupaev**MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL CONDUCTIVITY OF LINEAR FLEXIBLE
CHAIN POLYMERS**

Based on the proposed model, a method for calculating the thermal conductivity coefficient of linear flexible polymers is developed. The model is based on the fact that the structure of polymers in a condensed state is a set of subsystems that have limited autonomy. The results obtained make it possible to predict the optimal manufacturing conditions, as well as the operation of the material in temperature and force fields.

Key words: thermal conductivity, macromolecule, Laplace transforms, relaxation.

Постановка проблеми. Дослідження процесів теплопереносу в лінійних гнучколанцюгових полімерах і структуроутворень в них являє собою одну із молодих областей науки про полімери [1]. Теорія теплопровідності полімерів виникла і розвивається на основі раніше вивчених закономірностей явищ переносу в твердих тілах та рідинах, для яких спільним є те, що перенесення теплового руху від одних молекул до інших здійснюється в результаті їх взаємодії [2]. Однак, у випадку гнучколанцюгових полімерів запропонований фононний механізм не реалізується, а спроби отримати кількісні результати наштовхуються на значні труднощі [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно сучасних уявлень [4], структура полімера – взаємне розміщення в просторі, внутрішня будова і характер взаємодії (зв'язку) між структурними елементами, які утворюють макроскопічне тіло. При цьому, структура будь-якого фізичного тіла – це набір підсистем, які постійно ускладнюються та володіють певною обмеженою автономністю. Особливість такого підходу – уявлення про існування на одному із рівнів вказаного набору підсистем певної «виділеної», яка визначає процес теплопровідності гнучколанцюгового полімеру. В даному випадку виділеною системою виступає макромолекула [5], яка сама володіє досить складною структурою, що характеризується ієрархією конфігураційних рівнів. Макромолекули лінійних полімерів виділяють в особливу підсистему, оскільки їх властивості [4] дозволяють трактувати полімерний стан як особливу форму конденсації речовини. Відповідно, властивості макромолекул (закодована в них «структурна» інформація) передаються через всі послідовні рівні надмолекулярної організації (НМО) полімерів. Виділення макромолекул в особливу підсистему виправдано ще тим, що між елементами всіх інших систем діють «хімічні сили» – ковалентні або «частково ковалентні» зв'язки [5], тоді як взаємодія на всіх надмолекулярних рівнях структурної організації обумовлена силами нехімічного характеру [1]; по-друге, макромолекула не являється «найдрібнішою частинкою», яка зберігає хімічні властивості речовини. Встановлено [6], що шляхом зміни ступеня полімеризації, можна, не впливаючи на хімію процесу, суттєво змінювати теплофізичні властивості полімеру [2]. Це означає, що макроскопічні властивості формуються макромолекулярною структурою

(конфігурацією, в стереохімічному розумінні), але передаються через НМО, яка залежить від попередньої термічної, механічної, електричної історії зразка. Зазначені специфічні особливості структурної організації полімерного стану в найбільшій мірі проявляються в лінійних гнучколанцюгових полімерах [6], що не завжди враховують при аналізі процесів теплопереносу [2].

Постановка завдань. Відповідно, мета даного дослідження – на основі запропонованої моделі гнучколанцюгових лінійних полімерів, шляхом чисельного розв’язку рівнянь балансу енергії, одержати аналітичне співвідношення для визначення величини їх коефіцієнта теплопровідності (λ) та дослідити його залежність від структуроутворень і температури системи.

Викладення основного матеріалу. Математична модель. Припустимо, згідно моделі Кірквуда-Райзмана [5], що ефективний поперечний переріз макромолекули, як структурної підсистеми гнучколанцюгового полімеру вздовж довжини, залишається сталим. Стінки її володіють ідеальною провідністю, тобто відсутні дисипативні втрати енергії на бічних розгалуженнях. В якості напрямку довжини підсистеми оберемо вісь Z . В хвилі, яка поширюється вздовж вісі Z , залежність всіх величин від Z виражає співмножник $\exp ik_z \cdot z$ ($k_z = \text{const}$). Тоді компоненти теплового потоку (q_i) та температури T_x і T_y будуть мати вид [7]:

$$\frac{\partial q_z}{\partial y} - ik_z q_y = i \frac{\omega}{v} q_x, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial q_z}{\partial x} + ik_z q_x = i \frac{\omega}{v} q_y, \quad (2)$$

$$ik_z q_y = i \frac{\omega}{v} q_x; \quad ik_z q_x = -i \frac{\omega}{v} q_y. \quad (3)$$

Звідки слідує, що:

$$q_x = \frac{ik_z}{\kappa^2} \cdot \frac{\partial q_z}{\partial x}; \quad q_y = \frac{ik_z}{\kappa^2} \cdot \frac{\partial q_z}{\partial y}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} = -\frac{i\omega}{v\kappa^2} \cdot \frac{\partial q_z}{\partial y}; \quad \frac{\partial T_y}{\partial y} = \frac{i\omega}{v\kappa^2} \cdot \frac{\partial q_z}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\text{де} \quad \kappa^2 = \frac{\omega^2}{v^2} - k_z^2, \quad (6)$$

v, ω – швидкість поширення теплового потоку, частота, відповідно; k_z – хвильовий вектор.

Таким чином, всі поперечні компоненти теплового потоку і градієнта температури через структурну одиницю полімеру можна виразити поздовжньою складовою q і/або T . Визначимо ці компоненти, розв’язуючи рівняння теплопровідності [8], для випадку нерухомого ізотропного тіла, в якому здійснюється лише процес перенесення тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T_z) + \Pi, \quad (7)$$

де τ – час релаксації; ∇ – оператор Гамільтона; Π – потужність джерела. Граничні умови до даного рівняння слідує з того, що величина складових q і T на стінках елемента в площині xy перетворюється в нуль.

Припустимо, що температура підсистеми у всіх точках має певне значення, задане деякою функцією $f(z) = T(z, 0, 0)$. Нехай в початковий момент часу кінець підсистеми характеризується температурою T_c , яка підтримується постійною протягом всього процесу теплообміну. Знайдемо розподіл температури по довжині елемента в будь-який проміжок часу і втрати тепла на кінці.

Для цього розв’яжемо диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2}; \quad (\tau > 0; 0 < z < \infty), \quad (8)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, при граничних умовах:

$$T(z, 0, 0) = f(z); \quad T(0, 0, \tau) = T_c = \text{const}; \quad \frac{\partial T(+\infty, \tau)}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

При цьому, до рівняння (7) застосуємо перетворення Лапласа [9]:

$$L \left[\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} \right] = L \left[a \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2} \right], \quad (10)$$

$$\text{де} \quad L[T(z, \tau)] = \int_0^\infty T(z, \tau) e^{-s\tau} d\tau = T_L(z, s). \quad (11)$$

У лівій частині рівняння потрібно взяти перетворення Лапласа від першої похідної, тобто:

$$sT_L(z, s) - f(z) = a \frac{\partial^2}{\partial z^2} \{L[T(z, \tau)]\} = a \frac{d^2 T_L(z, s)}{dz^2}. \quad (12)$$

Відповідно, диференціальне рівняння в часткових похідних для оригіналу функції $T(z, \tau)$ перетворюється в співвідношення для зображення $T_L(z, S)$, оскільки $T_L(z, S)$ не залежить від τ . При такому переході використовуємо початкові умови.

Перепишемо рівняння (12) у вигляді:

$$T_L''(z, S) - \frac{S}{a} T_L(z, S) + f(z)/a = 0, \quad (13)$$

та розглянемо умову, коли температура структурного елемента до охолодження однакова і дорівнює T_0 , тобто $f(z) = T_0 = \text{const}$. У цьому випадку рівняння (13) матиме вид:

$$T_L''(z, S) - \frac{S}{a} \left[T_L(z, S) - \frac{T_0}{S} \right] = 0, \quad (14)$$

а загальний розв'язок диференціального рівняння для зображення запишемо як:

$$T_L(z, S) - \frac{T_0}{S} = A_1 e^{\sqrt{S/a} z} + B_1 e^{-\sqrt{S/a} z}, \quad (15)$$

де A_1, B_1 – сталі, які визначаємо з граничних умов.

Використаємо перетворення Лапласа до граничних умов:

$$L[T(0, \tau)] = 0; \quad T_L(0, S) = 0; \quad (16)$$

$$L\left[\frac{\partial T(+\infty, \tau)}{\partial z}\right] = 0; \quad T_L'(+\infty, S) = 0. \quad (17)$$

З умови (17) слідує, що $A_1 = 0$, так як у випадку її невиконання перший член в правій частині співвідношення (15) необмежено зростає при збільшенні z , а саме:

$$0 = T_L'(+\infty, S) = \sqrt{\frac{S}{a}} A_1 e^{\sqrt{S/a} (+\infty)} - \sqrt{\frac{S}{a}} B_1 e^{-\sqrt{S/a} (+\infty)}. \quad (18)$$

Взявши до уваги умову (16), маємо, що:

$$0 - \frac{T_0}{S} = B_1 e^{-\sqrt{S/a} \cdot 0} = B_1, \text{ тобто } B_1 = -\frac{T_0}{S}, \text{ і тоді:}$$

$$\frac{T_0}{S} - T_S(z, S) = \frac{T_0}{S} \exp\left(-\sqrt{\frac{S}{a}} \cdot z\right). \quad (19)$$

Враховуючи, що [9]:

$$L^{-1}\left[\frac{1}{S} e^{-k\sqrt{S}}\right] = 1 - \text{erf}(k/2\sqrt{\tau})$$

при $k = z/\sqrt{a}$, отримаємо:

$$T_0 - T(z, \tau) = T_0(1 - \text{erf}(z/2\sqrt{a\tau})), \quad (20)$$

звідки

$$\frac{T(z, \tau)}{T_0} = \text{erf}(z/2\sqrt{a\tau}). \quad (21)$$

Вважаючи, що температура кінця підсистеми не дорівнює нулю, а $T_c = \text{const}$, граничні умови (16) запишемо як:

$$L[T(0, \tau)] = L[T_c]; \quad T_L(0, \tau) = T_c/S. \quad (22)$$

Відповідно, постійна $B_1 = -(T_0 - T_c)/S$, оскільки $T_0 > T_c$. Тоді розв'язок для зображення буде:

$$\frac{T_0}{S} - T_L(z, S) = \frac{T_0 - T_c}{S} e^{-\sqrt{\frac{S}{a}} z}. \quad (23)$$

Використовуючи зворотне перетворення Лапласа, отримаємо:

$$T_0 - T(z, S) = (T_0 - T_c) \text{erfc}(z/2\sqrt{a\tau}), \quad (24)$$

де $\text{erfc}(U) = 1 - \text{erf}(U)$. Цей розв'язок представимо наступним чином:

$$\frac{T(z, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \text{erf}(z/2\sqrt{a\tau}). \quad (25)$$

Тоді розв'язок рівняння (13) отримуємо аналогічним чином:

$$T(z, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a \tau}} \int_0^\infty f(\xi) \left[\exp\left(-\frac{(z-\xi)^2}{4a\tau}\right) - \exp\left(-\frac{(z+\xi)^2}{4a\tau}\right) \right] d\xi. \quad (26)$$

Визначимо втрати тепла dQ_S за час $d\tau$ через одиницю площі на кінці структурного елемента при його охолодженні, як:

$$dQ_S = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} d\tau = -\lambda(T_0 - T_c) \left\{ \frac{\partial}{\partial z} [\text{erf}(z/2\sqrt{a\tau})] \right\}_{z=0}. \quad (27)$$

Оскільки:

$$\frac{\partial}{\partial z} [\text{erf}(z/2\sqrt{a\tau})] = \frac{1}{\sqrt{\pi a \tau}} \exp(-z^2/4a\tau), \quad (28)$$

і при $z = 0$, $\exp(-z^2/4a\tau) = 1$, маємо:

$$\frac{dQ_S}{d\tau} = -\lambda(T_0 - T_c)/\sqrt{\pi a\tau}. \quad (29)$$

Розрахуємо кількість теплоти, яку віддає структурна підсистема протягом скінченного проміжку часу τ . Для цього проінтегруємо співвідношення (28) в межах від 0 до τ , тобто:

$$Q_S = Q_{S,0} - \int_0^\tau \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a\tau}}(T_0 - T_c)d\tau = Q_{S,0} - \frac{2\varepsilon\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}}(T_0 - T_c), \quad (30)$$

де $\varepsilon = \sqrt{\lambda c_V \rho}$ – коефіцієнт акумуляції тепла [7]; c_V , ρ – питома теплоємність при сталому об'ємі, густина тіла, відповідно. При цьому кількість теплоти, яку віддає кінець структурної підсистеми площею S , становить:

$$\Delta Q = \frac{2\varepsilon}{\sqrt{\pi}}(T_0 - T_c)S\sqrt{\tau}. \quad (31)$$

Оскільки елемент об'єму підсистеми $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ за час $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ нагрівається від T_1 до T_2 , він акумулює кількість тепла рівну:

$$c_V \rho (T_2 - T_1) dV. \quad (32)$$

Загальну кількість тепла, яка пройшла через елемент за час $\Delta\tau$, визначимо як:

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = c_V \rho \int_{(V)} (T_2 - T_1) dV = c_V \rho V \cdot \frac{1}{V} \int_{(V)} (T_2 - T_1) dV. \quad (33)$$

Позначимо середню (інтегральну) температуру по всьому об'єму системи через \bar{T} , тобто:

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \int_{(V)} T dV, \quad (34)$$

тоді можемо записати, що:

$$\Delta Q = c_V \rho V (\bar{T}_2 - \bar{T}_1), \quad (35)$$

оскільки в процесі нагрівання $\bar{T}_2 > \bar{T}_1$. Втрати тепла ($\Delta Q = Q - Q_0$) на нагрівання тіла за час τ від початку ($\tau_1 = 0$) процесу становлять:

$$Q - Q_0 = c_V \rho V (\bar{T} - T_0). \quad (36)$$

Відповідно, основна задача зводиться до визначення $\bar{T}(\tau)$. В даному випадку інтегральна температура дорівнює:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{1}{V} \int_{(V)} T(z, \tau) dV = \frac{1}{R_h L} \int_{-R}^{+R} \int_{-h}^{+h} \int_{-L}^{+L} T(z, \tau) dx \cdot dy \cdot dz = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} T(z, \tau) dz. \quad (37)$$

Згідно закону збереження і перетворення енергії [8] слідує, що:

$$c_V \rho V (\bar{T} - T_0) = \frac{2\varepsilon S}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} (T_0 - T_c). \quad (38)$$

Таким чином, значення ефективного коефіцієнта теплопровідності структурного елемента гнучколанцюгового полімеру визначимо з умови:

$$c_V \rho V = \frac{2\sqrt{\lambda c_V \rho}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\tau} S \quad (39)$$

як

$$\lambda = \frac{\pi c_V \rho}{4\tau} L^2, \quad (40)$$

де L – ефективна довжина структурної підсистеми лінійного гнучколанцюгового полімеру [5].

В аналітичне співвідношення (40) входить часовий фактор τ – час досягнення системою певної температури, тобто теплопровідність, як і інші характеристики полімерних систем (c_V), носить релаксаційний характер. Встановлено, що величина L визначається згідно співвідношення [11]:

$$L = (4kT\tau/\eta\pi)^{1/3}, \quad (41)$$

де η – динамічна в'язкість системи, $L/\tau = v$. Відповідно, враховуючи статистичний характер розподілу структуроутворень в лінійному гнучколанцюговому полімері та значення L (41), рівняння (40), для визначення величини коефіцієнта теплопровідності системи, набуває вигляду:

$$\lambda = \frac{\pi}{12} c_V (12kT\rho^2 v)^{1/3}, \quad (42)$$

де k – стала Больцмана.

Результати розрахунку та дані експерименту. Об'єкти дослідження: ПВХ (полівінілхлорид) тип АО, KSR-67 (Karvinyl SR-67); ПБВ (полівінбутираль) марки ПШ-ДС-9439 (ПО «Лабтех»). Зразки готували в T - p режимі при $T=393$ К і $p=10.0$ МПа. Експериментальні дослідження температурної залежності λ систем проводили за допомогою ИТ- λ -400 та 3427-1000°C [10] при швидкості нагрівання зразка 3 град/хв.

Описаний алгоритм розв'язку задачі (42) реалізовано у вигляді пакету програм для ПК, а розраховані та експериментальні значення $\lambda(T)$ представлені в табл. 1. Величини c_V , ρ , v , використані при розрахунку λ ПВХ, ПVB, отримані на основі результатів експерименту [11], проведеного в діапазоні (293÷373) К.

Таблиця 1.

Розрахункові та експериментальні величини λ ПВХ, ПVB

Зразок	T, К	λ , Дж·м ⁻¹ ·с ⁻¹ ·К ⁻¹			
		Експеримент		Розрахунок (42)	
ПВХ *ПVB	293			0,150	*0,210
	303	0,151	*0,213	0,156	0,215
	313	0,157	0,230	0,160	0,225
	323	0,162	0,237	0,161	0,235
	333	0,171	0,240	0,168	0,240
	343	0,173	0,235	0,171	0,230
	353	0,164	0,227	0,169	0,230
	363	0,161	0,215	0,166	0,220
	373	0,159	0,190	0,162	0,200

Висновки. На основі твердження про те, що структура полімерів в конденсованому стані являє собою взаємне розміщення в просторі і характер взаємодії (зв'язків) між структурними елементами, які утворюють макроскопічне тіло, за допомогою диференціальних рівнянь енергообмінних процесів, отримано співвідношення для визначення величини коефіцієнта теплопровідності (λ) лінійних гнучколанцюгових полімерів. З використанням перетворень Лапласа проведено розв'язок рівняння Фур'є і показано, що процес теплопровідності в полімерах має релаксаційну природу, обмежується лінійними розмірами елемента структури, а між величиною λ та фізико-хімічними характеристиками матеріалу існує кількісний взаємозв'язок. На підставі залежності $\lambda = f(T)$ можна зробити висновок про структурну організацію полімера та вказати оптимальні умови експлуатації матеріалу в зовнішніх температурних і силових полях.

Список використаних джерел:

1. Frechette, A. Sami/Nanodielectrics: A panacea for solving all electrical insulation problems. Proc. 2010 IEEE Int. Conf. Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, 4-9 jule 2010. P. 130-158.
2. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. М.: Химия, 1982. 280 с.
3. Ojovan M.I. Thermodynamic parameters of bonds in glassy materials from viscosity-temperature relationships. Journal of Physics: Condensed Matter. 2007. Vol. 19, № 41. P. 41-51.
4. Френкель С.Я., Цыгельный И.М., Колупаев Б.С. Молекулярная кибернетика. Львов: Свит, 1990. 166 с.
5. Френкель С.Я. Макромолекула // Энциклопедия полимеров: В 2 т. М., 1974. С. 101-133.
6. Kolupaev B.B., Klepko V.V., Lebedev E.V. Mechanisms of heat transfer on polyvinylchloride and poly(vinyl butyral). J. of Engineering Physics and Thermophysics. 2012. Vol. 85, № 2. P. 446-454.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
8. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. К.: Наукова думка, 1983. 350 с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
10. Klepko V.V., Kolupaev B.B., Kolupaev B.S., Lebedev E.V. Energy Dissipation and Modulus Defect in Heterogeneous Systems Based on Flexible-Chain Liner Polymers. J. Polym. Sci. 2007. Vol. 49, №1-2. P. 18-21.
11. Колупаев Б.Б., Левчук В.В. та ін. Синергетика полімерних металонанодисперсних систем: монографія. Рівне: О.Зень, 2014. 399 с.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2019

УДК 624.04 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.8

Ю.С. Крутій, М.Г. Сур'янінов, М.М. Сорока, Г.С. Карнаухова

Одеська державна академія будівництва та архітектури

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ЗГИНУ КРУГЛИХ СУЦІЛЬНИХ ПЛАСТИН НА ЗМІННІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Наведено результати дослідження осесиметричного згину круглих суцільних пластин на змінній пружній основі. Використовується метод скінчених елементів, реалізований в ПК ЛІРА-САПР, як найбільш універсальний з чисельних методів.

Розглянуто дванадцять варіантів розрахунку суцільний круглої пластини (плити) при двох умовах опирання і трьох різних законах зміни коефіцієнта постелі. У всіх варіантах результати повністю збігаються з відомими результатами згину плит, які не мають пружної основи і в разі, коли ця основа існує, а її опір є постійним. Відзначено, що розбіжність тут дуже незначна — в третій значущій цифрі після коми для прогину при шарнірному закріпленні і в другій — для моментів. При жорсткому закладенні прогини і моменти також відрізняються від відповідних значень відомих рішень в другій значущій цифрі після коми. Що стосується пружної основи, коефіцієнт постелі якої змінюється за законом опуклої параболи, то дані для порівняння відсутні; потрібен альтернативний метод, який дозволить виконати аналогічні розрахунки. Бажаємо, щоб цей метод був аналітичним і дозволяв проводити розрахунки з великою точністю і без обмежень щодо виду навантаження і закону зміни опору основи. Цим визначається напрямок подальших досліджень авторів в області розрахунку пластин на змінній пружній основі.

Ключові слова: пластина, пружна основа, модель Вінклера, змінний коефіцієнт постелі, метод скінчених елементів, комп'ютерне моделювання, ЛІРА-САПР.

Ю.С. Крутій, Н.Г. Сурьянинов, Н.Н. Сорока, А.С. Карнаухова

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ИЗГИБА КРУГЛЫХ СПЛОШНЫХ ПЛАСТИН НА ПЕРЕМЕННОМ УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Приведены результаты исследования осесиметричного изгиба круглых сплошных пластин на переменном упругом основании. Используется метод конечных элементов, реализованный в ПК ЛІРА-САПР, как наиболее универсальный из численных методов.

Рассмотрено двенадцать вариантов расчета сплошной круглой пластины (плиты) при двух условиях опирания и трех различных законах изменения коэффициента постели. Во всех вариантах результаты полностью совпадают с известными результатами изгиба плит, не имеющих упругой основы и в случае, когда эта основа существует, а ее сопротивление является постоянным. Отмечено, что расхождение здесь очень незначительное — в третьей значащей цифре после запятой для прогиба при шарнирном опирании и во второй — для моментов. При жестком заделке прогибы и моменты также отличаются от соответствующих значений известных решений во второй значащей цифре после запятой. Что касается упругого основания, коэффициент постели которой изменяется по закону выпуклой параболы, то данные для сравнения отсутствуют; нужен альтернативный метод, который позволит выполнить аналогичные расчеты. Желательно, чтобы этот метод был аналитическим и позволял проводить расчеты с большой точностью и без ограничений относительно вида нагрузки и закона изменения сопротивления основания. Этим определяется направление дальнейших исследований авторов в области расчета пластин на переменном упругом основании.

Ключевые слова: пластина, упругое основание, модель Винклера, переменный коэффициент постели, метод конечных элементов, компьютерное моделирование, ЛІРА-САПР.

Yu.S. Krutii, M.H. Surianinov, M.M. Soroka, G.S. Karnaukhova

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF THE AXISYMMETRIC BENDING OF ROUND CONTINUOUS PLATES ON A VARIABLE ELASTIC BASIS

The results of the study of axisymmetric bending of round continuous plates on a variable elastic base are presented. The finite element method used in the LIRA-SAPR software is used as the most universal of the numerical methods.

Twelve options for calculating a continuous round plate (slab) under two conditions of support and three different laws of changing the coefficient of bed are considered. In all cases, the results completely coincide with the known results of bending plates that do not have an elastic base and in the case when this base exists and its resistance is constant. It is noted that the discrepancy here is very slight - in the third significant digit after the decimal point for deflection when articulated and in the second - for moments. With hard termination, the deflections and moments also differ from the corresponding values of the known solutions in the second significant digit after the decimal point. As for the elastic base, the bed coefficient of which varies according to the law of a convex parabola, there are no data for comparison; need an alternative method that will allow you to perform similar calculations. It is desirable that this method be analytical and allow calculations to be made with great accuracy and without restrictions regarding the type of load and the law of variation of the base resistance. This determines the direction of further research of the authors in the field of calculation of plates on a variable elastic base.

Key words: plate, elastic base, Winkler model, variable bed coefficient, finite element method, computer simulation, LIRA-SAPR.

Вступ. Пластина на пружній основі — це математична модель багатьох конструкцій, що застосовуються в різних галузях промисловості. В першу чергу це відноситься до будівельних об'єктів, і, зокрема, до фундаментних балок і плит. Існують різні моделі пружної основи. Найпростішою є модель Вінклера, або пружинна модель. Для балок на постійній пружній основі ця модель дозволяє отримати точне рішення, а для плит — ні. Ще складніше йде справа, коли пружна основа є змінною. Не існує єдиного підходу для побудови універсального аналітичного рішення. Тому в інженерній практиці застосовуються наближені методи розрахунку, засновані на дискретизації системи. З цієї проблематики існує чимало публікацій, що висвітлюють різні напрямки досліджень.

Безсумнівний інтерес представляють отримані Є.Б. Кореновой рішення низки складних завдань теорії згину круглих ізотропних і ортотропних пластин, що лежать на пружній основі, в замкнутому вигляді [1]. Відзначимо роботи Р.Ф. Габбасова [2, 3], де на основі узагальнених рівнянь методу скінчених різниць отримано розв'язки задач про згин пластин змінної жорсткості і плит на пружній основі, що відрізняються високою точністю. Розрахунок одношарових і двошарових плит на пружній основі методом скінчених різниць виконаний в [4]. Тут досліджена точність отриманих результатів в залежності від способу розбиття і способу розв'язання. В [5] наводиться точне рішення динамічної задачі для прямокутної пластини, що лежить на пружній основі з одним коефіцієнтом постелі, при найбільш загальних умовах обпирання на двох її протилежних краях. Отримане замкнуте рішення побудовано для довільних динамічних навантажень, і в такій загальній постановці така задача раніше не розглядалася. С.В. Ідімешев [6] для чисельного рішення задачі про згин прямокутної пластини на пружній основі застосовує метод колокацій і найменших нев'язок, який добре зарекомендував себе при розв'язанні звичайних диференціальних рівнянь і рівнянь в приватних похідних для задач гідродинаміки.

Власні коливання круглої пластинки, що лежить на змінній пружній основі типу Вінклера, розглянуті в роботі А.М. Дороніна і В.А. Соболевої [7]. Коефіцієнт постелі основи змінюється за степеневим законом в напрямку радіуса. Власні числа коливань визначаються з теорії Кірхгофа аналітичним методом. Основне рівняння, записане в комплексних змінних, вирішується методом послідовних наближень. Проведено розрахунки для модуля основи, що змінюється за лінійним або квадратичним законом.

Активно займаються дослідженнями конструкцій на пружній основі зарубіжні вчені. Правда, в їх роботах змінною частіше є товщина пластини, а не коефіцієнт постелі пружної основи. Так, в [8] досліджено стійкість і визначені власні частоти пластини змінної товщини на пружній основі за допомогою аналітичного методу. Проте, як констатує автор статті [9], інформації про згин пластин постійної або змінної товщини на змінній пружній основі в літературі вкрай мало.

Метою даної роботи є дослідження осесиметричного згину круглих суцільних пластин на змінній пружній основі методом скінчених елементів.

Постанова проблеми. У загальному випадку розглядається кільцева пластина постійної циліндричної жорсткості D (рис. 1), що лежить на змінній пружній основі і знаходиться під дією безперервно розподіленого поперечного навантаження.

Тут a і b — радіуси зовнішнього та внутрішнього контурних кіл пластини, r — радіальна координата ($0 \leq r \leq a$). В окремому випадку, при значенні $b=0$, отримуємо суцільну круглу пластину.

Осесиметричний згин пластин виникає, коли діюче навантаження $q(r)$, реакція пружної основи $R(r)$ і умови закріплення країв не залежать від полярного кута θ . При такому згині в пластині діють тільки три внутрішніх зусилля, а саме, радіальний M_r і окружний M_θ згинальні моменти і, а також радіальна поперечна сила Q_r (рис. 2). Крутний момент $M_{r\theta}$ і окружна поперечна сила Q_θ дорівнюють нулю в силу осьової симетрії напруженого стану.

Для розв'язання поставленої задачі в даній роботі використовується метод скінчених елементів, реалізований в ПК ЛІРА-САПР [10], як найбільш універсальний з чисельних методів.

Приклад 1. Стальна пластина з шарнирним обпиранням по контуру.

Кругла пластина товщиною $h = 0,03\text{ м}$ і радіусом $a = 0,9\text{ м}$ знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження $q = 80\text{ кПа}$. Матеріал — сталь ($E = 2,1 \cdot 10^8\text{ кПа}$; $\mu = 0,33333$).

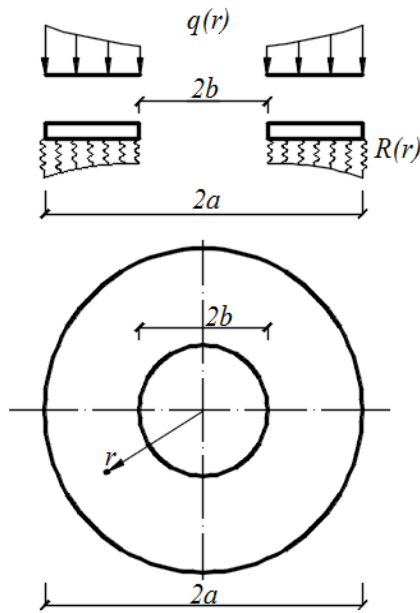


Рис. 1. Пластина на змінній пружній основі під дією поперечного навантаження

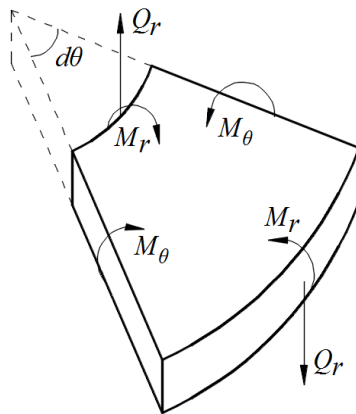


Рис. 2. Внутрішні зусилля в пластині

Результати дослідження. Виконано геометричне і скінченно-елементне моделювання пластини в ПК ЛІРА-САПР. На основі цієї моделі розглянемо ряд завдань з різними наборами вихідних даних. А саме: розглянемо дві пластини, виготовлені з різних матеріалів, з шарнірним закріпленням по контуру, а потім — ці ж пластини, жорстко закріплені по контуру.

Розрахунки для кожної з них виконаємо при трьох моделях пружної основи — при нульовому коефіцієнті постелі, постійному і змінному за законом опуклої параболи (рис. 3).

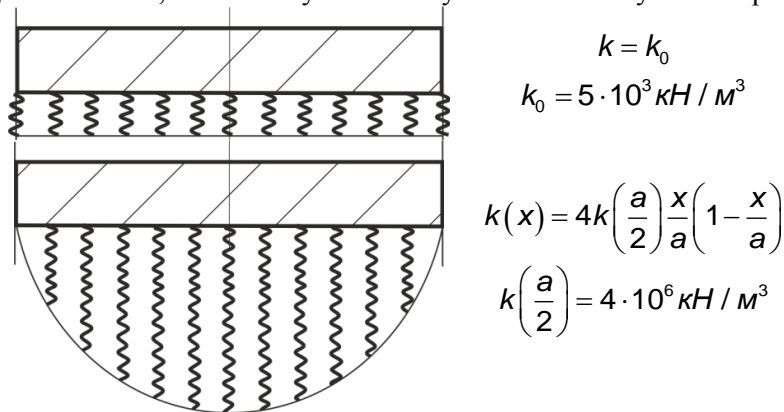


Рис. 3. Моделі основи

Результати розрахунків при відсутності коефіцієнту постелі (тобто, звичайної круглої пластини з шарнірним обпиранням по всьому контуру), при постійному його значенні та при такому, що змінюється за законом опуклої параболи, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Прогини і моменти при різних коефіцієнтах постелі в пластині з шарнирним опиранням

Коорд, м	W , мм			M_r , кНм/м			M_θ , кНм/м		
	Закон зміни коефіцієнту постелі								
	Нуль	Постіний	Опукла парабола	Нуль	Постіний	Опукла парабола	Нуль	Постіний	Опукла парабола
0	-6,1722	-4,9241	-0,2271	13,744	10,5784	1,3744	13,749	10,5813	1,3749
0,043	-6,1548	-4,9104	-0,2253	13,688	10,5403	1,3688	13,715	10,5588	1,3715
0,086	-6,1024	-4,8693	-0,2200	13,564	10,4559	1,3564	13,641	10,5084	1,3641
0,129	-6,0155	-4,8011	-0,2115	13,378	10,3286	1,3378	13,530	10,4322	1,3530
0,171	-5,8944	-4,7059	-0,2001	13,129	10,1579	1,3129	13,380	10,3300	1,3380
0,214	-5,7399	-4,5844	-0,1865	12,818	9,9433	1,2818	13,194	10,2015	1,3194
0,257	-5,5529	-4,4372	-0,1712	12,445	9,6839	1,2445	12,970	10,0465	1,2970
0,3	-5,3343	-4,2649	-0,1550	12,010	9,3784	1,2010	12,709	9,8643	1,2709
0,343	-5,0853	-4,0684	-0,1385	11,512	9,0268	1,1512	12,410	9,6544	1,2410
0,386	-4,8076	-3,8488	-0,1222	10,952	8,6267	1,0952	12,074	9,4162	1,2074
0,429	-4,5025	-3,6073	-0,1066	10,330	8,1772	1,0330	11,700	9,1490	1,1700
0,471	-4,1719	-3,3450	-0,0921	9,646	7,6767	0,9646	11,290	8,8521	1,1290
0,514	-3,8179	-3,0637	-0,0789	8,899	7,1236	0,8899	10,842	8,5247	1,0842
0,557	-3,4427	-2,7649	-0,0670	8,091	6,5163	0,8091	10,356	8,1658	1,0356
0,6	-3,0486	-2,4503	-0,0565	7,220	5,8528	0,7220	9,834	7,7745	0,9834
0,643	-2,6380	-2,1221	-0,0472	6,287	5,1313	0,6287	9,274	7,3499	0,9274
0,686	-2,2141	-1,7824	-0,0387	5,292	4,3500	0,5292	8,676	6,8910	0,8676
0,729	-1,7794	-1,4335	-0,0309	4,236	3,5066	0,4236	8,042	6,3967	0,8042
0,771	-1,3372	-1,0779	-0,0233	3,117	2,5994	0,3117	7,370	5,8659	0,7370
0,814	-0,8908	-0,7184	-0,0157	1,936	1,6263	0,1936	6,660	5,2974	0,6660
0,857	-0,4439	-0,3582	-0,0079	0,693	0,5853	0,0693	5,914	4,6904	0,5914
0,9	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000	0,0000	5,400	4,177	0,0000

Приклад 2. Тепер розглянемо тепер розглянемо ту ж пластину при тих же вихідних даних, але з жорстким закріпленням по контуру.

Таблиця 2

Прогини і моменти при різних коефіцієнтах постелі в пластині, що жорстко закріплена

Коорд, м	W , мм			M_r , кНм/м			M_θ , кНм/м		
	Закон зміни коефіцієнту постелі								
	Нуль	Постіний	Опукла парабола	Нуль	Постіний	Опукла парабола	Нуль	Постіний	Опукла парабола
0	-1,5369	-1,4478	-0,0486	5,368	5,0172	0,6376	5,3724	5,0210	0,6417
0,043	-1,5299	-1,4413	-0,0478	5,313	4,9672	0,5853	5,3399	4,9915	0,6108
0,086	-1,5091	-1,4219	-0,0454	5,192	4,8565	0,4791	5,2673	4,9254	0,5461
0,129	-1,4747	-1,3897	-0,0416	5,009	4,6899	0,3416	5,1578	4,8255	0,4598
0,171	-1,4273	-1,3453	-0,0369	4,765	4,4672	0,1937	5,0115	4,6920	0,3629
0,214	-1,3674	-1,2899	-0,0317	4,460	4,1882	0,0558	4,8285	4,5248	0,2662
0,257	-1,2959	-1,2224	-0,0265	4,094	3,8525	-0,0565	4,6089	4,3236	0,1790
0,3	-1,2139	-1,1456	-0,0215	3,667	3,4597	-0,1341	4,3525	4,0883	0,1074
0,343	-1,1227	-1,0600	-0,0171	3,179	3,0093	-0,1754	4,0596	3,8186	0,0542
0,386	-1,0236	-0,9670	-0,0134	2,630	2,5008	-0,1845	3,7300	3,5142	0,0188
0,429	-0,9182	-0,8680	-0,0105	2,020	1,9337	-0,1698	3,3639	3,1750	-0,0013
0,471	-0,8084	-0,7648	-0,0083	1,349	1,3073	-0,1402	2,9610	2,8005	-0,0098
0,514	-0,6962	-0,6591	-0,0066	0,617	0,6212	-0,1040	2,5217	2,3905	-0,0103
0,557	-0,5837	-0,5530	-0,0055	-0,176	-0,1254	-0,0667	2,0457	1,9447	-0,0058
0,6	-0,4733	-0,4489	-0,0046	-1,030	-0,9329	-0,0315	1,5331	1,4628	0,0014
0,643	-0,3677	-0,3490	-0,0040	-1,944	-1,8018	0,0001	0,9840	0,9445	0,0100
0,686	-0,2695	-0,2560	-0,0034	-2,920	-2,7327	0,0258	0,3983	0,3895	0,0184
0,729	-0,1817	-0,1727	-0,0028	-3,956	-3,7260	0,0388	-0,2240	-0,2025	0,0236
0,771	-0,1074	-0,1022	-0,0020	-5,054	-4,7820	0,0245	-0,8828	-0,8316	0,0196
0,814	-0,0500	-0,0476	-0,0012	-6,212	-5,9008	-0,0431	-1,5781	-1,4980	-0,0041
0,857	-0,0130	-0,0124	-0,0004	-7,430	-7,0826	-0,1990	-2,3100	-2,2018	-0,0619
0,9	0,0000	0,0000	0,0000	-8,200	-7,7372	-2,5700	-2,9000	-2,5710	-0,1123

Приклад 3. Бетонна плита з шарнирним обпиранням по контуру.

Як третій приклад, розглянемо круглу плиту товщиною $h = 0,12\text{ м}$ і радіусом $a = 1,8\text{ м}$, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження $q = 15\text{ кПа}$. Матеріал — бетон ($E = 1,5 \cdot 10^7\text{ кПа}$; $\mu = 0$).

Результати розрахунків при нулевому значенні коефіцієнту постелі, при постійному його значенні та при такому, що змінюється за законом опуклої параболи, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Прогини і моменти при різних коефіцієнтах постелі в бетонній плиті з шарнирним обпиранням

Коорд., м	W , мм			M_r , кНм/м			M_θ , кНм/м		
	Закон зміни коефіцієнту постелі								
	Нуль	Постійний	Опукла парабола	Нуль	Постійний	Опукла парабола	Нуль	Постійний	Опукла парабола
0	-5,6948	-2,5135	-0,0659	9,1011	3,7513	0,4872	9,1060	3,7521	0,4926
0,043	-5,6794	-2,5071	-0,0651	9,0642	3,7452	0,4516	9,0939	3,7502	0,4806
0,086	-5,6330	-2,4880	-0,0626	8,9821	3,7315	0,3775	9,0668	3,7457	0,4553
0,129	-5,5559	-2,4562	-0,0588	8,8588	3,7101	0,2782	9,0258	3,7387	0,4195
0,171	-5,4485	-2,4117	-0,0538	8,6944	3,6802	0,1657	8,9709	3,7292	0,3759
0,214	-5,3112	-2,3546	-0,0480	8,4884	3,6406	0,0528	8,9023	3,7168	0,3275
0,257	-5,1447	-2,2851	-0,0419	8,2411	3,5900	-0,0488	8,8200	3,7013	0,2773
0,3	-4,9498	-2,2033	-0,0358	7,9533	3,5265	-0,1306	8,7238	3,6823	0,2282
0,343	-4,7273	-2,1094	-0,0300	7,6235	3,4482	-0,1874	8,6139	3,6594	0,1824
0,386	-4,4784	-2,0036	-0,0248	7,2532	3,3528	-0,2180	8,4902	3,6322	0,1417
0,429	-4,2041	-1,8863	-0,0202	6,8414	3,2378	-0,2242	8,3528	3,6002	0,1069
0,471	-3,9059	-1,7578	-0,0165	6,3886	3,1004	-0,2103	8,2017	3,5628	0,0785
0,514	-3,5853	-1,6184	-0,0134	5,8947	2,9375	-0,1816	8,0368	3,5193	0,0564
0,557	-3,2437	-1,4688	-0,0111	5,3592	2,7460	-0,1431	7,8582	3,4692	0,0400
0,6	-2,8830	-1,3096	-0,0092	4,7831	2,5223	-0,0991	7,6658	3,4116	0,0288
0,643	-2,5052	-1,1414	-0,0079	4,1655	2,2627	-0,0527	7,4597	3,3459	0,0220
0,686	-2,1121	-0,9650	-0,0067	3,5076	1,9635	-0,0064	7,2399	3,2712	0,0188
0,729	-1,7060	-0,7815	-0,0057	2,8071	1,6206	0,0362	7,0065	3,1867	0,0186
0,771	-1,2892	-0,5919	-0,0046	2,0672	1,2300	0,0686	6,7594	3,0915	0,0204
0,814	-0,8642	-0,3975	-0,0033	1,2856	0,7874	0,0780	6,4987	2,9848	0,0231
0,857	-0,4335	-0,1996	-0,0018	0,4631	0,2886	0,0423	6,2243	2,8656	0,0250
0,9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	6,0750	2,7988	0,0254

На рис. 4 показано залежність прогину від координати для бетонної плити, що жорстко зашциплена по контуру та спирається на основу, коефіцієнт постелі якої є постійним, а на рис. 5 — для цієї ж плити, але тут коефіцієнт постелі змінюється за законом опуклої параболи.

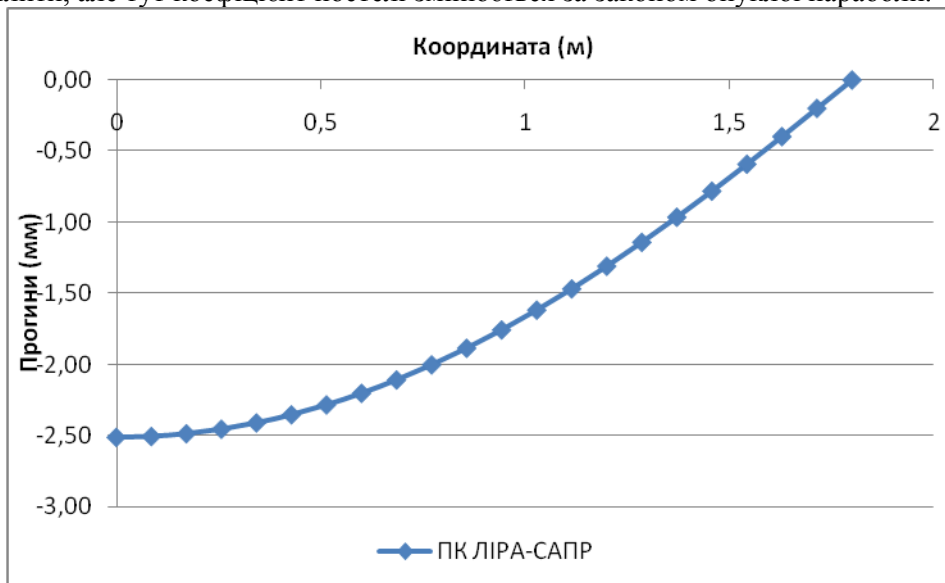


Рис. 4. Залежність прогину від координати при постійному коефіцієнті постелі

Приклад 4. Бетонна плита з жорстким закріпленням по контуру.

Таблиця 4

Прогини і моменти при різних коефіцієнтах постелі в бетонній плиті, що жорстко закріплена

Коорд., м	W , мм			M_r , кНм/м			M_θ , кНм/м		
	Закон зміни коефіцієнту постелі								
	Нуль	Постійний	Опукла парабола	Нуль	Постійний	Опукла парабола	Нуль	Постійний	Опукла парабола
0	-1,1341	-0,9119	-0,0037	3,0182	2,3521	-0,0037	3,0233	2,3556	-0,0036
0,043	-1,1290	-0,9079	-0,0037	2,9812	2,3263	-0,0043	3,0112	2,3472	-0,0038
0,086	-1,1136	-0,8959	-0,0037	2,8990	2,2688	-0,0057	2,9841	2,3283	-0,0042
0,129	-1,0882	-0,8761	-0,0037	2,7756	2,1821	-0,0080	2,9431	2,2996	-0,0050
0,171	-1,0532	-0,8488	-0,0038	2,6110	2,0655	-0,0113	2,8883	2,2610	-0,0060
0,214	-1,0090	-0,8142	-0,0039	2,4051	1,9184	-0,0153	2,8196	2,2124	-0,0073
0,257	-0,9563	-0,7728	-0,0040	2,1581	1,7399	-0,0197	2,7373	2,1537	-0,0089
0,3	-0,8958	-0,7252	-0,0042	1,8699	1,5291	-0,0234	2,6411	2,0847	-0,0106
0,343	-0,8285	-0,6720	-0,0045	1,5405	1,2848	-0,0250	2,5312	2,0052	-0,0122
0,386	-0,7553	-0,6141	-0,0049	1,1699	1,0058	-0,0222	2,4076	1,9148	-0,0134
0,429	-0,6776	-0,5522	-0,0053	0,7589	0,6908	-0,0126	2,2701	1,8133	-0,0138
0,471	-0,5965	-0,4875	-0,0058	0,3053	0,3383	0,0059	2,1190	1,7004	-0,0129
0,514	-0,5137	-0,4211	-0,0063	-0,1887	-0,0529	0,0343	1,9541	1,5758	-0,0103
0,557	-0,4307	-0,3541	-0,0067	-0,7239	-0,4843	0,0709	1,7755	1,4391	-0,0057
0,6	-0,3493	-0,2881	-0,0070	-1,3001	-0,9573	0,1102	1,5831	1,2901	0,0009
0,643	-0,2713	-0,2246	-0,0070	-1,9174	-1,4731	0,1421	1,3770	1,1284	0,0090
0,686	-0,1989	-0,1652	-0,0065	-2,5758	-2,0329	0,1517	1,1572	0,9536	0,0174
0,729	-0,1341	-0,1117	-0,0055	-3,2753	-2,6377	0,1206	0,9237	0,7655	0,0242
0,771	-0,0792	-0,0663	-0,0040	-4,0158	-3,2882	0,0304	0,6764	0,5638	0,0271
0,814	-0,0369	-0,0310	-0,0023	-4,7974	-3,9850	-0,134215	0,4155	0,3482	0,0231
0,857	-0,0096	-0,0081	-0,0007	-5,6199	-4,7282	-0,3808	0,1408	0,1184	0,0095
0,9	0,0000	0,0000	0,0000	6,0754	-5,1375	-0,5333	0,0000	0,0000	0,0000

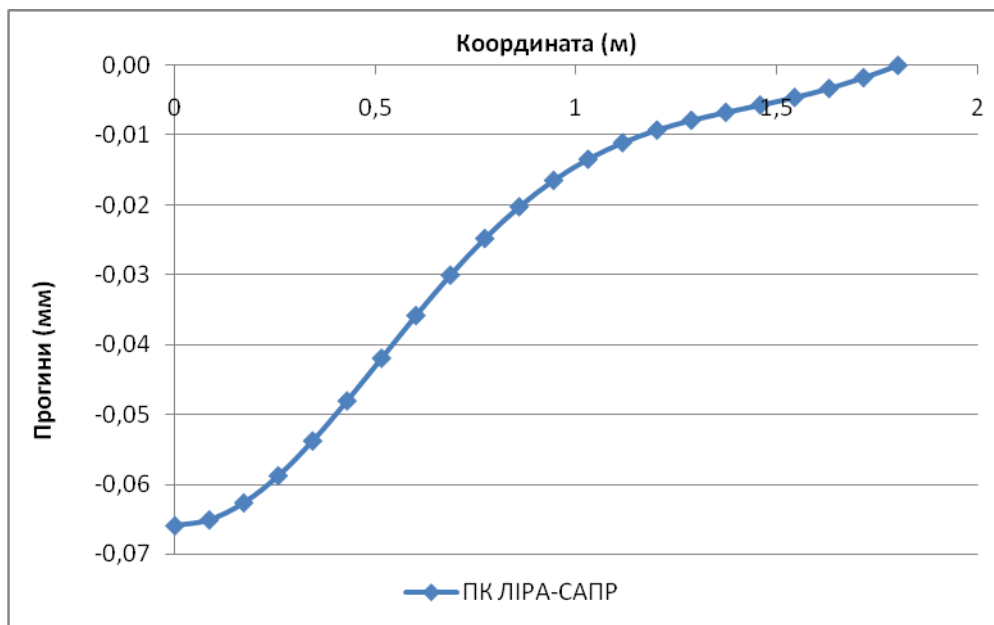


Рис. 5. Прогин при коефіцієнті постелі, що змінюється за законом опуклої параболи

Висновки. Таким чином, розглянуто дванадцять варіантів розрахунку суцільної круглої пластини (плити) при двох умовах обпирання і трьох різних законах змінення коефіцієнту постелі. У всіх варіантах результати повністю збігаються з відомими результатами згину плит, що не мають пружної основи та у випадку, коли ця основа існує, а її опір є постійним [11]. Розбіжність тут дуже незначна — у третій значущій цифрі після коми для прогину при шарнірному обпиранні та у другій — для моментів M_r, M_θ . При жорсткому затисненні прогини та моменти також

відрізняються від відповідних значень відомих рішень у другій значущій цифрі після коми. Що стосується пружної основи, коефіцієнт постелі якої змінюється за законом опуклої параболи, то тут дані для порівняння відсутні; потрібний альтернативний метод, який дозволить виконати аналогічні розрахунки. Бажано, щоб цей метод був аналітичним та дозволяв проводити розрахунки з великою точністю та без обмежень відносно виду навантаження та закону зміни опору основи. Сказане і визначає напрямок наших подальших досліджень в області розрахунку пластин на змінній пружній основі.

1. Коренева Е.Б. Аналитические методы расчета пластин переменной толщины и их практические приложения. — М.: АСВ, 2009. — 240 с.
2. Габбасов Р.Ф., Мусса Сали. Обобщенные уравнения метода конечных разностей и их применение к расчету изгибаемых пластин переменной жесткости// Известия вузов. Строительство. —2004. —№5. —С. 17-22.
3. Габбасов Р.Ф., Н.Б. Уварова. Применение обобщенных уравнений метода конечных разностей к расчету плит на упругом основании / М.: Вестник МГСУ. — №4, 2012. — С. 102-107.
4. Андреев В.И., Барменкова Е.В., Матвеева А.В. Расчет плит переменной жесткости на упругом основании методом конечных разностей / М.: Вестник МГСУ. — №4, 2014. — С. 30-38.
5. Дьяченко Ю.П. Нестационарная задача динамики пластин переменного сечения в уточненной постановке / Автореферат кандидатской диссертации.— Саратов, 2008.—19с.
6. Идимешев С.В. Расчет напряженно-деформированного состояния изотропных прямоугольных пластин на упругом основании / Известия Алтайского государственного университета. — Вып. 1 (81), том 1, 2014. — С. 53-56.
7. Доронин А.М., Соболева В.А. Собственные колебания круглой пластинки, лежащей на переменном упругом основании типа Винклера / Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, № 4 (1). — 2014. — С. 254–258.
8. Zhang Y, Liu Y, Chen P and Murphy K D 2011 Buckling Loads and Eigen Frequencies of a Braced Beam Resting on an Elastic Foundation. Acta Mechanica Solida Silica. 24 510-518.
9. K.K. Viswanathana,1, P.V. Navaneetha krishnanb and Z. A. Aziza Buckling Analysis of Rectangular Plates with Variable Thickness Resting on Elastic Foundation IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 23 (2015) 012006 p. 1-8.
10. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2015. Учебное пособие / [Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов и др.]; под ред. академика РААСН А.С. Городецкого. — М., 2015. — 376 с.
11. Вайнберг Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. — К: Будівельник, 1970. —436 с.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2019

УДК 66.017 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.9

О.А. Кудя, О.М. Отиченко, О.Є. Сич*Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины***СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНОЇ МІДЮ КЕРАМІКИ НА ОСНОВІ БІОГЕННОГО ГІДРОКСИАПАТИТУ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

В роботі досліджено вплив міді (1 мас. %) на структуру та властивості трьох типів кераміки на основі біогенного гідроксиапатиту: гідроксиапатитної, склокераміки гідроксиапатит/SiO₂-Na₂O та гідроксиапатит/SiO₂-B₂O₃-Na₂O. Встановлено, що введення модифікуючої добавки зменшує розмір зерна в структурі кераміки, а також позитивно впливає на властивості in vitro, знижуючи рН та збільшуючи в 2-3,5 рази швидкість резорбції зразків у фізіологічному розчині. Дослідження адсорбційної активності показало перспективність модифікованої міддю кераміки як носіїв лікарських засобів.

Ключові слова: кераміка, гідроксиапатит, скло, мідь, структура, пористість, властивості in vitro, адсорбційна активність, імплантат

А.А. Кудя, О.Н. Отиченко, Е. Е. Сыч*Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины***СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ МЕДЬЮ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ БИОГЕННОГО ГИДРОКСИАПАТИТА МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В работе исследовано влияние меди (1 мас. %) на структуру и свойства трех типов керамики на основе биогенного гидроксиапатита: гидроксиапатитной, стеклокерамики гидроксиапатит/SiO₂-Na₂O и гидроксиапатит/SiO₂-B₂O₃-Na₂O. Установлено, что введение модифицирующей добавки уменьшает размер зерна в структуре керамики, а также положительно влияет на свойства in vitro, снижая рН и увеличивая в 2-3,5 раза скорость резорбции образцов в физиологическом растворе. Исследование адсорбционной активности показало перспективность модифицированной медью керамики как носителей лекарственных средств.

Ключевые слова: керамика, гидроксиапатит, стекло, медь, структура, пористость, свойства in vitro, адсорбционная активность, имплантат

O. Kuda, O. Otychenko, O. Sych*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine***STRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER MODIFIED CERAMICS BASED ON BIOGENIC HYDROXYAPATITE FOR MEDICAL APPLICATION**

In the present work the effect of copper (1 wt. %) addition on the structure and properties of three types of ceramics based on biogenic hydroxyapatite was investigated. Samples based on biogenic hydroxyapatite as well as hydroxyapatite and SiO₂-Na₂O glass were obtained at 780 °C. Samples with composition hydroxyapatite and SiO₂-B₂O₃-Na₂O glass were obtained by two-stage sintering at 1100 °C and 780 °C, respectively. It was established that the addition of modified element to the ceramics allows reducing grain size in the structure of ceramics, and also ambiguously affects the porosity. In addition, the addition of copper has a positive effect on the in vitro properties of materials, reducing the pH and increasing the rate of absorption of the samples in saline by 2-3.5 times. According to the studies of the adsorption activity of copper-modified ceramics samples their potential as drug carriers for accelerating the treatment of bone defects in orthopedics, traumatology and dentistry has been shown.

Keywords: ceramics, hydroxyapatite, glass, copper, structure, porosity, in vitro properties, adsorption activity, implant

Вступ

На сьогоднішній день для інженерії кісткової тканини знаходять застосування різноманітні види матеріалів, такі як полімери, метали і їх сплави, кераміка, біоскло та різноманітні композити на їх основі. Щодо біокераміки, то найбільш активно використовують гідроксиапатит (ГА) як синтетичного, так і біогенного походження. Широке застосування гідроксиапатиту пояснюється його хімічною спорідненістю із кісткою та відмінними біосумісними властивостями. Біоскло, в свою чергу, забезпечує кращі механічні властивості біокераміки [1-7].

Організм людини містить величезну кількість хімічних елементів, серед яких Ca, P, O, C, H, P, S, Na, Mg, S, B, Cl, K, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cr, Si, I, F, Se. Більшість хімічних елементів містяться в кістковій тканині та у крові. Мікроелементи є життєво необхідними, оскільки при їх відсутності або нестачі порушується нормальна життєздатність організму. Ще в 70-х роках минулого століття було встановлено, що перебіг біохімічних процесів, який відбувається в кістковій тканині в умовах фізіологічної чи репаративної регенерації, а також паталогічних станів кістки, каталізується (активується) великою кількістю катіонів – мікроелементів, серед яких велике значення мають мікроелементи зі змінною валентністю [8-10]. При цьому у звичайних умовах фізіологічної регенерації кістки мікроелементи відіграють важливу роль не лише в процесах відновлення кристалічної решітки гідроксиапатиту, але й тісно пов'язані

обміном органічних компонентів кістки за рахунок прямого впливу на остеогенні клітинні елементи, сприяючи тим самим підтримці рівня їх диференціації [9].

Мідь в людському організмі бере участь у процесах кровотворення, впливає на стан кісткової, сполучної тканини та епітелію, нормалізує роботу ендокринної системи, укріплює стінки судин, підвищує імунітет і нейтралізує вільні радикали, забезпечує обмін заліза та разом з залізом і вітаміном С бере участь в утворенні гемоглобіну, покращує травлення, бере участь у побудові ряду ферментів і білків, підвищує ефективність лікарських препаратів, в тому числі дію антибіотиків, має протизапальну і протимікробну дію. Нестача міді в організмі призводить до деструкції кровоносних судин, патологічного росту кісток, дефектів у сполучних тканинах. Крім того, вважають, що дефіцит міді служить однією з причин ракових захворювань. У деяких випадках ураження легень раком, у людей похилого віку, лікарі пов'язують із віковим зниженням вмісту міді в організмі. Однак, надлишок міді в організмі призводить до порушення психіки і паралічу деяких органів (хвороба Вільсона). Токсичною для організму вважається доза міді >250 мг. У невеликих дозах мідь використовують в медицині для затримки росту та розмноження бактерій: як приклад, CuSO_4 застосовується при лікуванні кон'юнктивіту у вигляді очних крапель (25%-й розчин), а також для припікання при трахомі у вигляді очних олівців. При опіках шкіри фосфором проводять її рясне змочування 5%-ним розчином CuSO_4 .

Введення міді до складу біокераміки та біоскла дозволяє покращити ангиогенез, і регенерація кісток у порівнянні з нелегованими матеріалами при їх імплантації, а також суттєво покращити антибактеріальні властивості імплантатів. Крім того, введення Cu^{2+} у вигляді CuO у кількості 0,5-3,0 мас. % до складу пористого біоскла не призводить до токсичності [7, 11-14].

Таким чином, мідь демонструє великий потенціал як багатофункціональний терапевтичний засіб для профілактики захворювань, пов'язаних з інфекціями, та для стимуляції регенерації кісток завдяки своїй антисептичній та бактерицидній дії.

Тому метою даної роботи було дослідити вплив міді як модифікуючої добавки на структуру та властивості кераміки на основі біогенного гідроксиапатиту, отриманої як без, так і з додаванням рідкого натрійсилікатного та натрійборосилікатного скла.

Матеріали та методи дослідження

Для проведення досліджень було отримано шість типів зразків склокераміки на основі біогенного гідроксиапатиту (БГА) склад яких наведено в таблиці 1. Всі зразки отримували методом одностороннього пресування при тиску 100 МПа з подальшим спіканням при температурі 780 °С (Т). Легуючу добавку у кількості 1 мас. % для зразків типу БГА+Cu та ОК 015+Cu вводили до складу БГА (або суміші БГА та скла) в сухому вигляді та проводили змішування на рольгангу протягом 4 годин з подальшим пресуванням та спіканням зразків. Для композитів ОК6 застосовували двостадійне спікання – суміш склошихти та БГА у необхідному співвідношенні спікали при температурі 1100 °С (Т₁), потім подрібнювали до розміру частинок < 160 мкм, додавали легуючу добавку (у випадку отримання складу ОК 6+Cu, змішували на рольгангу протягом 4 годин, формували зразки та спікали при температурі 780 °С (Т).

Структуру одержаних зразків досліджували методом скануючої електронної мікроскопії з використанням мікроскопів JEOL Superprobe 733 (Японія), Hitachi S-3500N (Hitachi, Японія) та Zeiss Ultra Plus (Carl Zeiss Meditec AG, Німеччина).

Таблиця 1

Склад зразків склокераміки, режими їх термообробки та пористість після спікання

Назва матеріалу	Склад, мас. %			Тип скла	Температура спікання, °С		Загальна пористість, ± 1 %
	БГА	скло	Cu		Т ₁	Т	
БГА	100	—	—	—	—	780	43
БГА+Cu	99	—	1	—	—	780	44
ОК 015	85	15	—	$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$	—	780	49
ОК 015+Cu	85	14	1	$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$	—	780	44
ОК 6	50	50	—	$\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$	1100	780	21
ОК 6+Cu	50	49	1	$\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$	1100	780	24

Для прогнозування поведінки матеріалу у біологічному середовищі було використано експерименти *in vitro*. Як модельне середовище було використано фізіологічний розчин 0,9% NaCl, який є ізотонічним розчином рідинам живого організму. Зразки попередньо висушували в

сушильній шафі при температурі 100 °С протягом 2 годин, зважували на аналітичних вагах "OHAUS Pioneer PA214C" ("OHAUS Corporation", Китай) з точністю 0,0001 г та поміщали у розчин, витримували 48 годин за температури 36-37 °С в термостаті. Потім зразки виймали з рідини, промивали дистильованою водою та сушили при температурі 100 °С протягом 2 годин та зважували на тих же вагах. Швидкість розчинення матеріалу визначали за втратою маси протягом часу експерименту. Крім того, проводили контроль зміни рН при зануренні зразків у фізіологічний розчин з допомогою портативного рН-метра "Checker HI 98127" ("Hanna Instruments", США).

Оцінку адсорбційної активності отриманих зразків проводили на прикладі лікарського препарату цефтріаксон, який є антибіотиком III покоління цефалоспоринов широкого спектру дії для парентерального введення, що використовують при лікуванні різних захворювань, в тому числі інфекцій кісток (остеомиєліту) і суглобів, для профілактики післяопераційних ускладнень. Насичення проводили розчином цефтріаксону (Ceftriaxon, «Arterium», Україна) у фізіологічному розчині («Arterium», Україна) з концентрацією антибіотику 40 000 мг/г відповідно до рецептурного листа на препарат. Зразки масою ~ 0,5 г поміщали в розчин антибіотику об'ємом 5 мл на різні проміжки часу (0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 год.), після чого проводили центрифугування розчинів (центрифуга ЦЛК-1, Росія) протягом 10 хв. (частота 3000 об./хв.) з подальшим визначенням оптичної густини розчинів фотокалориметричним методом (ФЕК-56М, Росія).

На основі отриманих значень оптичної густини, використовуючи заздалегідь побудований калібрувальний графік, визначали залишкову масову концентрацію цефтріаксону в освітленому розчині. Адсорбційну активність визначали за формулою, мг/г:

$$X = \frac{(C_1 - C_2 \cdot K) \cdot 0.025}{m}$$

де C_1 – масова концентрація вихідного розчину цефтріаксону;

C_2 – масова концентрація розчину після контактування з подрібненим зразком біокераміки, мг/л;

K – коефіцієнт розбавлення розчину, взятого для аналізу, після контактування з подрібненим зразком біокераміки ($K=1$);

m – маса наважки подрібненого зразку біокераміки, г;

0,005 – об'єм розчину цефтріаксону, взятого для освітлення, л.

Результати та обговорення

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд легованих міддю зразків на основі БГА. Різний характер забарвлення зразків, до яких було введено однакову кількість легуючої добавки свідчить про різні механізми модифікування кераміки та склокераміки на основі БГА. У випадку складу БГА+Cu спостерігаємо світло-коричневе забарвлення зразків, що може бути пов'язано з утворенням оксиду міді CuO (для якого характерне саме коричневе забарвлення) при спіканні зразків. Для ОК015+Cu, до складу якого входить 14 мас. % скла системи SiO₂-Na₂O, притаманний білий колір з легким відтінком блакитного. Зразки складу ОК6+Cu мають яскраве блакитне забарвлення, яке, на нашу думку, пов'язано з взаємодією легуючої добавки зі склом системи SiO₂-B₂O₃-Na₂O. З практики скловаріння відомо, що в окисному середовищі мідь у кількості 1-2 % забарвлює силікатне скло, що містить оксид натрію, в блакитний колір.



Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків кераміки на основі БГА

Всі отримані зразки є пористими, причому вплив легуючої добавки на пористість зразків є неоднозначним. Відповідно до отриманих результатів, наведених в таблиці 1, у випадку додавання міді до БГА загальна пористість практично не змінюється та становить 43-44 %. У випадку ж склокерамічних зразків спостерігаємо наступне: при застосуванні скла системи SiO₂-Na₂O та методу одностадійного спікання введення легуючої добавки призводить до зменшення пористості зразків від 49 до 44 %, а при використанні скла системи SiO₂-B₂O₃-Na₂O та методу двостадійного спікання додавання міді збільшує пористість від 21 до 24 %, що може бути пов'язано з особливостями спікання зразків в присутності скла різного складу.

На рис. 2 наведено мікроструктуру на прикладі зламів отриманих зразків. З наведених фотознімків видно, що для складів БГА та ОК 015 характерною є рихла структура, утворена з частинок розмірами $> 1,2$ та $0,2$ мкм, відповідно, які, в свою чергу, формують агломерати, з розвинутою відкритою мікропористістю. Для обох типів складів введення легуючої добавки у кількості 1 мас. % приводить до зменшення розміру зерна. У випадку складу БГА при додавання міді спостерігається також трансформація форми частинок з пластівчастої в округлу. Композити ОК 6 та ОК 6+Cu можна охарактеризувати матричною структурою, в якій натрійборосилікатна склафаза утворює «каркас», в якому знаходяться кристалічні частинки гідроксиапатиту, що формується за рахунок особливостей рідкофазного спікання матеріалу. Наявність різних пор в матеріалі ОК 6 та ОК 6+Cu пов'язано, на нашу думку, з різним характером пороутворення: пори з розміром 100-700 мкм утворюються за рахунок міжзернових пустот, а пори з розміром менше 100 мкм – за рахунок вспінювання скломаси при кінцевому спіканні.

Як відомо, на регенерацію кісткової тканини при імплантації матеріалу значною мірою впливає рН середовища організму. На рис. 3 та в таблиці 2 наведено результати дослідження зміни рН фізіологічного розчину при перебуванні у ньому зразків склокераміки, з яких випливає, що введення міді у кількості 1 мас. % до складу керамічних зразків приводить до зниження рН модельного середовища, що є позитивним фактором з точки зору впливу біоматеріалу на клітини живого організму. Крім того, для складу ОК 015 та ОК 015+Cu спостерігаємо в 2,5 рази більші значення Δ рН розчину, а також вищі абсолютні значення рН у порівнянні зі складами ОК 6 та ОК 6+Cu, що може бути пов'язано з більшою розчинністю скла системи $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$, що входить до складу зразків ОК 015 та ОК 015+Cu, а також осклованістю зразків ОК 6 та ОК 6+Cu.

При подальшому перебуванні зразків у фізіологічному розчині протягом 2 діб було визначено швидкість резорбції композитів, представлену в таблиці 2. Як видно з наведених результатів, введення легуючої добавки підвищує швидкість резорбції обох типів композитів, в той час як склокераміка, отримана на основі БГА та натрійборосилікатного скла, має вищі показники швидкості резорбції у порівнянні зі зразками, отриманими на основі БГА та скла системи $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$.

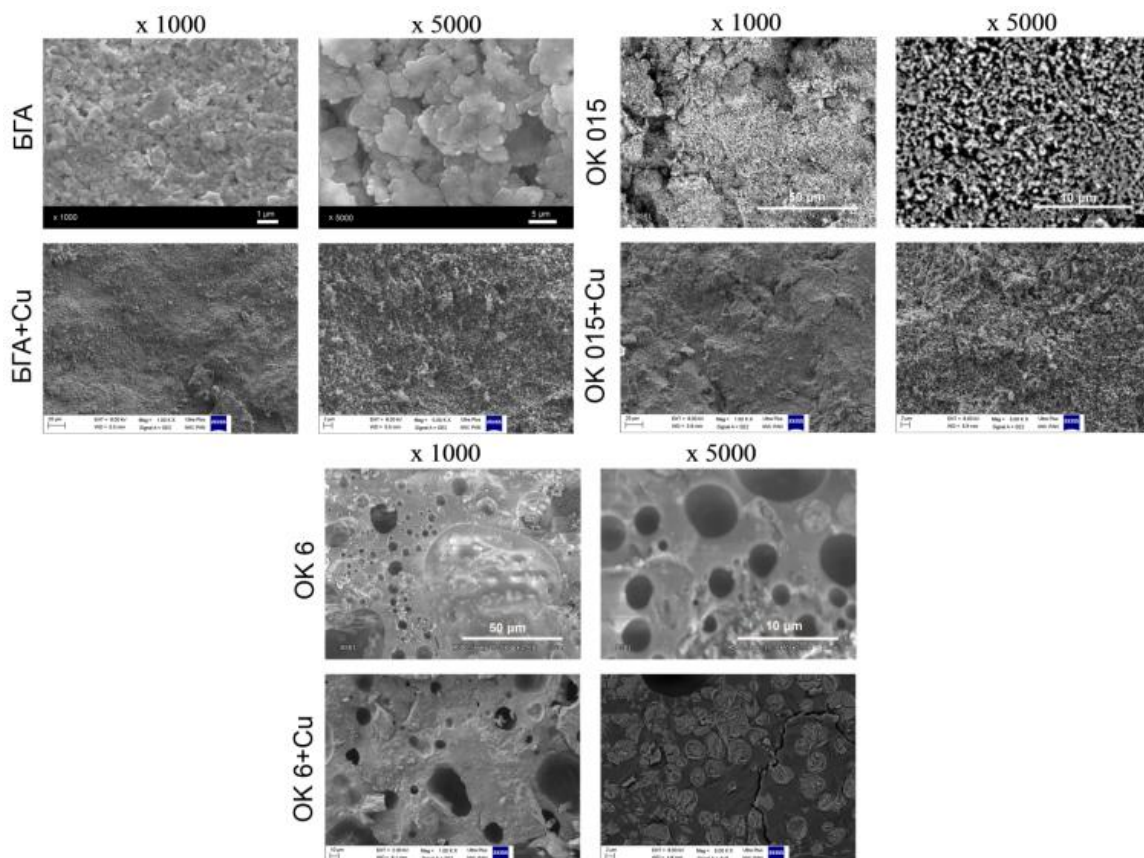


Рис.2. Мікроструктура зразків кераміки на основі БГА

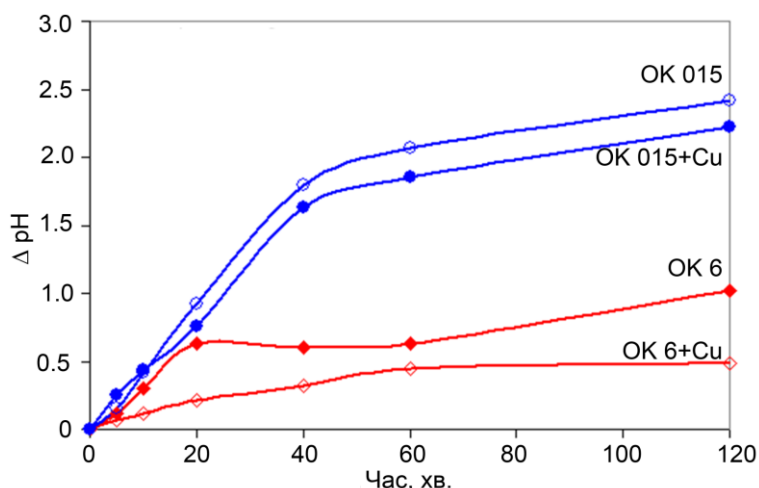


Рис. 3. Зміна рН фізіологічного розчину в присутності зразків кераміки на основі БГА

Адсорбційну активність композитів на прикладі цефтріаксону було досліджено для складів ОК 015+Cu та ОК 6+Cu. Отримані результати (рис. 4) свідчать про те, що насичення композитів антибіотиком залежить від складу застосованого скла, а також пористості отриманих зразків. Незважаючи на те, що для зразків ОК 6+Cu характерні нижчі значення пористості, вони проявляють вищі показники адсорбційної активності.

Таблиця 2

Швидкість резорбції та рН фізіологічного розчину після 2 год. перебування в ньому зразків кераміки на основі БГА

Назва матеріалу	Швидкість резорбції, % мас./добу	рН фізіологічного розчину
ОК 015	0,09	8,69
ОК 015+Cu	0,18	8,55
ОК 6	0,13	7,40
ОК 6+Cu	0,50	6,63

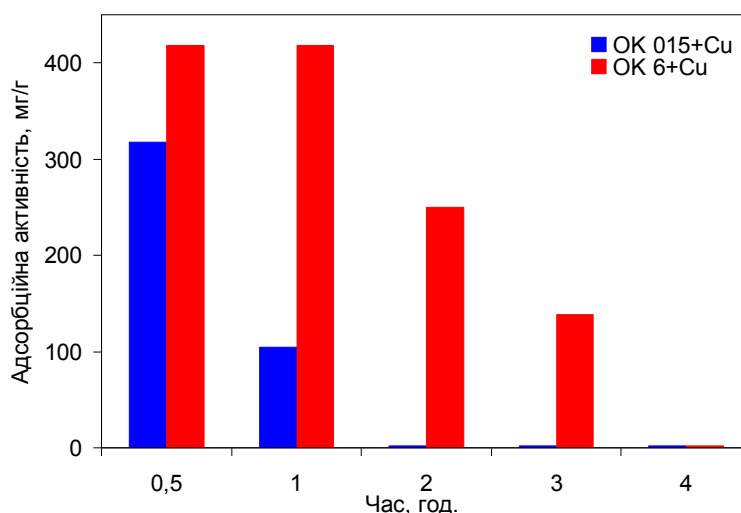


Рис. 4 Адсорбційна активність зразків кераміки на основі БГА

Висновки

Встановлено, що введення легуючої добавки сприяє зменшенню розміру зерна в структурі кераміки, а також неоднозначно впливає на пористість: у випадку додавання міді до біогенного гідроксиапатиту пористість зразків практично не змінюється та становить 43-44 %. Для склокерамічних зразків, отриманих з застосуванням скла системи $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ та методу

одностадійного спікання введення легуючої добавки призводить до зменшення пористості від 49 до 44 %, а при використанні скла системи $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ та методу двостадійного спікання збільшує пористість від 21 до 24 %, що може бути пов'язано з особливостями спікання зразків в присутності скла різного складу.

Показано, що введення міді позитивно впливає на властивості *in vitro*, знижуючи рН та збільшуючи в 2-3,5 рази швидкість резорбції зразків у фізіологічному розчині. На основі досліджень адсорбційної активності модифікованих міддю зразків склокераміки показана їх перспективність як носіїв лікарських засобів для прискорення лікування дефектів кісткової тканини в ортопедії, травматології та стоматології.

Автори висловлюють щире подяку Jan Mizeracki (Лабораторія наноструктур Інституту високих тисків Польської академії наук) за проведення структурних досліджень в рамках гранту для візитів українських учених на місячний термін до Польщі згідно з Протоколом до Угоди про наукове співробітництво між Польською академією наук і Національною академією наук України.

Список використаних джерел:

1. Kaur G. Mechanical properties of bioactive glasses, ceramics, glass-ceramics and composites: State-of-the-art review and future challenges / G. Kaur, V. Kumar, F. Baino et al. // Mater. Sci. Eng. -2019. – Vol. 104. – P. 109895.
2. Ma Y. 3D printing of bioglass-reinforced β -TCP porous bioceramic scaffolds / Y. Ma, H. Dai, X. Huang et al. // J. Mater. Sci. – 2019. – Vol. 54. – P. 10437–10446.
3. Hsu P. Y. Manipulation of the degradation behavior of calcium sulfate by the addition of bioglass / P. Y. Hsu, H. C. Kuo, W. H. Tuan et al. // Prog. Biomater. – 2019. – Vol. 8. – P. 115–125.
4. Sych O. Effect of type of calcium phosphate on microstructure and properties of glass reinforced biocomposites / O. Sych, N. Pinchuk // Process. Appl. Ceram. – 2007. – Vol. 1, Issue 1-2. – P. 1-4.
5. Iatsenko A. Effect of sintering temperature on structure and properties of highly porous glass-ceramics / A. Iatsenko, O. Sych, T. Tomila // Process. Appl. Ceram. – 2015. – Vol. 9, Issue 2. – P. 99-105.
6. Parkhomei O. R. Structural and mechanical properties of bioactive glass-ceramic composites / O. R. Parkhomei, N. D. Pinchuk, O. E. Sych et al. // Powder Metall. Metal Ceram. – 2016. – Vol. 55, No. 3-4. – P. 172-184.
7. Structural and chemical changes of thermally treated bone apatite. / Etok S.E., Valsami-Jones E., Wess T.J. et al. // J. Mater. Sci. – 2007. – V.42. – P. 9807–9816.
8. Барковский Е. В. Основы химии биогенных элементов / Е. В. Барковский, С. В. Ткачев – М.: Высшая школа, 2011. – 192 с.
9. Литвинова Т.Н. Биогенные элементы. Комплексные соединения / Литвинова Т. Н., Выскубова Н. К., Ненашева Л. В. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 283 с.
10. Скоблин А.П.. Микроэлементы в костной ткани / А. П. Скоблин, А. М. Белоус – М.: Медицина, 1968. – 232 с.
11. Radovanovi Z. Antimicrobial activity and biocompatibility of Ag^+ - and Cu^{2+} -doped biphasic hydroxyapatite-tricalcium phosphate obtained from hydrothermally synthesized Ag^+ - and Cu^{2+} -doped hydroxyapatite / Z. Radovanovi, B. Joki, D. Veljovi et al. // Appl. Surf. Sci. – 2014. – Vol. 307. – P. 513–519.
12. Singh R. K. Synthesis, structural analysis, mechanical, antibacterial and hemolytic activity of Mg^{2+} and Cu^{2+} co-substitutions in $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ / R. K. Singh, S. Kannan. // Mater. Sci. Eng. C. – 2014. – Vol. 45. – P. 530–538.
13. Robles-Águila M. J. Structural analysis of metal-doped (Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn) calcium hydroxyapatite synthesized by a sol-gel microwave-assisted method / M. J. Robles-Águila, J. A. Reyes-Avenidaño, M. E. Mendoza // Ceram. Int. – 2017. – V.43. – P.12705–12709.
14. Marquesa C. F. Biocompatibility and antimicrobial activity of biphasic calcium phosphate powders doped with metal ions for regenerative medicine / C. F. Marquesa, S. Olheroa, J. C. C. Abrantes // Ceram. Int. – 2017. – V.43. – P.15719–15728.

Рецензенти:

Бошицька Наталія Віталіївна, провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

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 07.11.2019

УДК: 620.179:534.8 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.10

В.А. Мащенко¹, В.В. Кривцов², В.П. Квасніков³*Одеська державна академія технічного регулювання та якості¹**Рівненський державний гуманітарний університет²**Національний авіаційний університет³***ЧАСТОТНО-ТЕМПЕРАТУРНІ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ**

Резонансним методом зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка на звукових частотах у широкому діапазоні температур проведено вимірювання дійсної частини динамічного модуля пружності та тангенса кута механічних втрат конструкційного полівинілхлориду. Показано, що для амплітуд резонансних максимумів послідовних мод коливань зразків існує лінійна залежність.

Ключові слова: амплітуда коливань, резонансна крива, рівняння регресії.

В.А. Мащенко, В.В. Кривцов, В.П. Квасніков**ЧАСТОТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТИ КОНСТРУКЦИОННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА**

Резонансным методом сдвиговых колебаний свободного конца закрепленного образца на звуковых частотах в широком диапазоне температур проведены измерения действительной части динамического модуля упругости и тангенса угла механических потерь конструкционного поливинилхлорида. Показано, что для амплитуд резонансных максимумов последовательных мод колебаний образцов существует линейная зависимость.

Ключевые слова: амплитуда колебаний, резонансная кривая, уравнение регрессии.

V. Mashchenko, V. Krivtsov, V. Kvasnikov**FREQUENCY-TEMPERATURE MEASUREMENTS OF THE DYNAMIC MODULE OF ELASTICITY OF CONSTRUCTIONAL ON POLYVINYL CHLORIDE**

The resonance method of the shear oscillation of the fixed sample at sound frequencies in a wide range of temperatures measured the real part of the dynamic modulus of elasticity and the tangent of the mechanical loss angle of constructional polyvinyl chloride. It is shown that there is a linear dependence for the amplitudes of the resonant maxima of the sequential modes of oscillations of the samples.

Keywords: oscillation amplitude, resonance curve, regression equation.

Постановка проблеми. Полімерні матеріали широко застосовуються в різних технічних системах, зокрема, для зниження вібрації у конструкціях за допомогою поглинання механічної енергії або ізоляції елементів конструкції, пов'язаних із перетворенням, передачею і поглинанням механічної енергії. Крім цього, вирішення інженерної задачі зменшення маси конструкцій за рахунок використання полімерних матеріалів, які працюють у жорстких динамічних полях напруг при ударно-імпульсному навантаженні, вимагає визначення їх в'язкопружних властивостей.

Дисипації енергії, що мають місце на рівні структурної організації полімерних матеріалів, можуть бути виміряні за зсувом фаз між напругою і деформацією, яка виникає в таких матеріалах при динамічному навантаженні. В'язкоупружні властивості (комплексний динамічний модуль пружності $E^* = E' + iE''$, де E' – дійсна частина модуля, E'' – уявна частина модуля та тангенс кута $tg\delta$ зсуву фаз – механічних втрат, між напругою і деформацією) більшості полімерних матеріалів залежать від частоти та амплітуди напруги зовнішнього збурення, температури та попередньої деформації [1].

У вимірюваннях для визначення динамічного модуля пружності полімерних матеріалів чинне місце займають резонансні методи [2]. Експериментальні значення динамічного модуля пружності (модуля Юнга) будуть повністю надійними лише при отриманні їх із хвильових та квазістатичних експериментів, що відповідають часу навантаження порядку декількох мікросекунд – часу проходження ультразвукового імпульсу через зразок полімерного матеріалу. Результати отримані резонансними методами відповідають часовим інтервалам у мілісекундному діапазоні та можуть використовуватися для уточнення або взаємного доповнення подібних мікросекундних даних при відносно великих часах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в'язкопружних властивостей різного типу полімерних матеріалів резонансними методами на звукових частотах представлено в роботах [3–7]. При цьому, авторами проводився комплекс вимірювань при зміні частоти збудження коливань зразків при одній температурі, або при фіксованій частоті коливань у

визначеному температурному діапазоні. Такі дослідження дещо обмежують аналіз поведінки полімерних матеріалів у температурно-динамічних полях та можливості вимірювань основних параметрів для визначення вязкопружних властивостей.

Постановка завдань. Метою роботи було встановити можливість практичного застосування резонансного методу зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка для частотно-температурних вимірювань дійсної частини динамічного модуля пружності та кута механічних втрат полімерного матеріалу.

Викладення основного матеріалу. Для експериментального визначення E' та $tg\delta$ полімерного матеріалу використовували метод зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка у вигляді стрижня прямокутної форми на звукових частотах.

Суть методу полягає у вимірюванні амплітуди коливань (A) вільного кінця стрижня при зміні частоти збуджуючої сили (F), що прикладена до іншого закріпленого кінця. За вимірами величини $|A|$ при різних частотах збудження будується резонансна крива, параметрами якої є частота коливань (f) та відношення амплітуд ($|A|/A_{max}$), де A_{max} – максимальне значення амплітуди, що відповідає головній резонансній частоті (f_r). Для f_r визначають ширину резонансної кривої (Δf_r) на рівні $|A_{max}|/\sqrt{2}$.

Поведінка зразка полімерного матеріалу (рис. 1) при коливаннях під дією F , що прикладається до закріпленого кінця, описується наступним диференціальним рівнянням [8]:

$$\rho \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + E^* \chi^2 \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

де $v(x,t)$ – функція залежності поперечних зміщень точок осі стрижня від координати x та часу t , ρ – густина полімерного матеріалу.

Розв'язком рівняння (1), із врахуванням граничних умов, є наступна рівність:

$$ch k^* l \cos k^* l + 1 = 0, \quad (2)$$

де k^* – комплексне хвильове число поперечних коливань, l – довжина стрижня.

Покладаючи $k^* l = a + ib$, при резонансі стрижня за умови $b = 0$, можна отримати перші чотири корені рівняння (2) [8]:

$$kl = 1,8751; 4,6941; 7,8548; 10,9965. \quad (3)$$

Величини a та b визначаються наступним чином:

$$a \cong \frac{\omega^2 l}{\left(\frac{E \chi^2}{\rho}\right)^{\frac{1}{4}}}; \quad (4)$$

$$b \cong \frac{1}{4} \frac{\omega^2 l}{\left(\frac{E \chi^2}{\rho}\right)^{\frac{1}{4}}} tg \delta, \quad (5)$$

причому для прямокутного стрижня $\chi = \frac{d}{\sqrt{12}}$, d – товщина зразка, ω – циклічна частота коливань.

При основній резонансній частоті f_r коливання стрижня, якій відповідає найменший за значенням корінь рівняння (2), з врахуванням (4), отримаємо співвідношення для E' [8]:

$$E' = \frac{48\pi^2 \rho l^4 f_r^2}{1,8751^4 d^2}. \quad (6)$$

Для величини $tg\delta$ маємо наступну рівність:

$$tg\delta = \frac{\Delta f_r}{f_r}. \quad (7)$$

Вимірювання $|A|$ для побудови резонансних кривих та визначення f_r проводили на установці, блок-схема якої наведена на рис. 2.

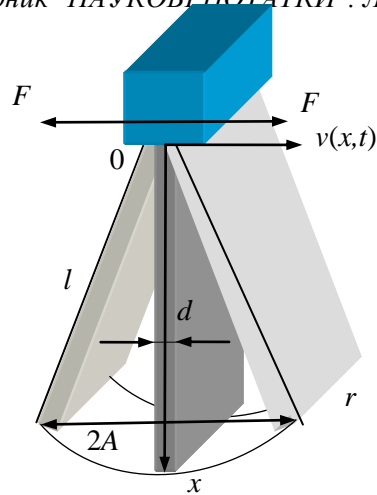


Рис. 1. Схема принципу збудження коливань вільного кінця закріпленого зразка

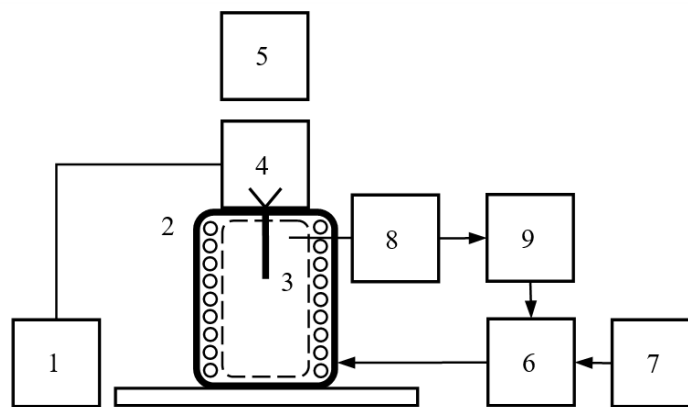


Рис. 2. Блок-схема установки для реалізації методу зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка

В експериментальній установці зразок полімерного матеріалу 3 знаходиться у повітряній термокамері 2, де жорстко закріплений одним кінцем до тяги генератора механічних коливань 5 за допомогою затискача. Термокамера має світлодіодну підсвітку та оглядові вікна для оптичного спостереження амплітуди коливань затиснутого та вільного кінців зразка. Збудження механічних коливань у зразку виконує поляризоване реле 4, живлення до якого надходить від генератора 1 Siglent SDG1010. Амплітуда коливань закріпленого кінця зразка регулюється вихідною напругою генератора.

Вимірювання амплітуди коливань можна проводити при різних температурах (T) полімерного зразка до температури склування (T_c). Обігрів камери електричний від автотрансформатора 7 через твердотільне Crydom H12D4825 6. Температурний режим у термокамері підтримується за допомогою термодатчика 8 та мікропроцесорного регулятора 9 МТР-8.

В процесі вимірювань за допомогою генератора змінюють частоту коливань f зразка у діапазоні 10–140 Гц з кроком 0,5 Гц. Величину A визначають за допомогою спеціального програмного забезпечення, що розпізнає зображення коливання зразка отриманого за допомогою веб-камери 5 з оптичним зумом [9]. Веб-камера з оптичним зумом дозволяє проводити збільшенні зображення коливань зразка у 10 разів. Похибка вимірювань величини A в такому випадку не перевищує 2%.

Результати та обговорення. Вимірювання проводили для листового конструкційного полівінілхлориду (ПВХ) марки PVC-SAW. Зразки ПВХ вирізали у вигляді пластин розміром: $l = 30\text{--}40$ мм, $d \leq 1$ мм та шириною $r = 5$ мм. Густина ρ PVC-SAW рівна 1440 кг/м^3 і контролювалася методом гідростатичного зважування.

Резонансні криві для зразків ПВХ при $T = 248; 273, 298, 323$ та 348 К представлені на рис. 3. Криві мають декілька резонансних максимумів в області частот 10–40 Гц та головний максимум, що відповідає основній резонансній частоті f_r . Із збільшенням температури зразка основна

резонансна частота коливань зменшується в ряді від 121,5 Гц, при $T = 248$ К, 117,5; 113; 103,5 до 89,5 Гц, при $T = 348$ К, при цьому величина Δf_r відповідно зростає в ряді: 5; 6,5; 10; 21,5; 35 Гц.

Розрахунки значень E' та $tg\delta$ для ПВХ при різних температурах за співвідношеннями (6) та (7) представлені на рис. 4. Аналіз отриманих даних показує, що із збільшенням T дійсна частина динамічного модуля пружності зменшується, при чому в діапазоні 248–323 К зміна E' від температури є лінійною від $4,12 \cdot 10^9$ Н/м² до $3,16 \cdot 10^9$ Н/м². При $T = 348$ К спостерігається різке зменшення величини до $2,24 \cdot 10^9$ Н/м², що цілком очікувано оскільки T_c , при якому полімер переходить у високоеластичний стан, рівна 353 К.

Величина тангенса кута механічних втрат ПВХ із збільшенням температури зростає від 0,04, при $T = 248$ К, до 0,39, при $T = 448$ К. Аналіз залежності $tg\delta = f(T)$ показує, що її умовно можна розбити на дві лінійні ділянки з різними коефіцієнтами нахилу прямих, де точкою перегину є температура 298 К. Така залежність тангенса кута механічних втрат від температури характерна для більшості лінійних аморфних полімерних матеріалів і пов'язана з підвищенням молекулярної рухливості структурних елементів макромолекул, при цьому умовна точка перегину залежить від гнучкості макромолекул, міжмолекулярної взаємодії та природи бічних радикалів полімерного ланцюга.

Отримані значення дійсної частини комплексного модуля пружності та тангенса кута механічних втрат добре узгоджуються з результатами отриманими іншими авторами аналогічними експериментальними методами [3, 10].

Аналіз резонансних кривих (рис. 3) показав, що для амплітуд резонансних максимумів при різних частотах збудження (різних модах коливань зразків) при одній температурі характерна лінійна залежність. Для рівняння регресії у вигляді

$$\frac{|A|}{|A_{max}|} = af + b \quad (8)$$

значення величин a , b та коефіцієнта кореляції R^2 в залежності від T представлені в табл. 1. Прямі регресії (8) для різних температур із точками амплітуд резонансних максимумів представлені на рис. 5.

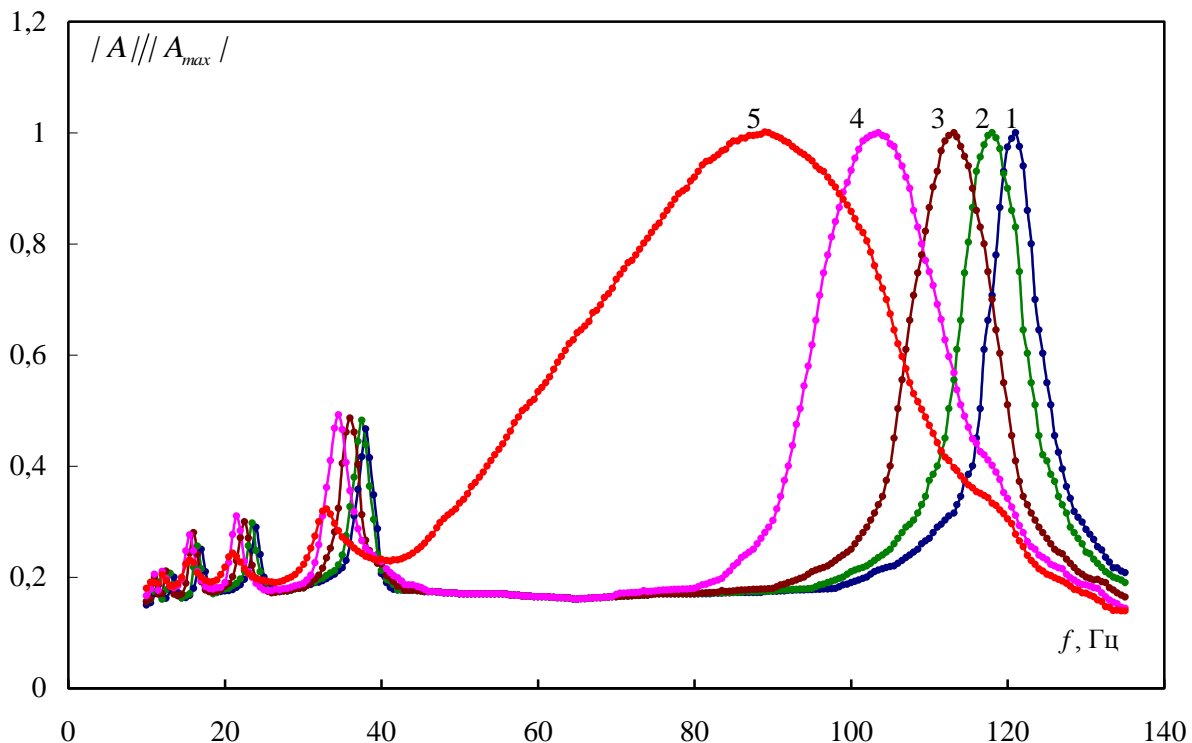


Рис. 3. Резонансні криві для зразків ПВХ в області частот 10–140 Гц при температурах: 1 – 248 К; 2 – 273 К; 3 – 298 К; 4 – 323 К; 5 – 348 К.

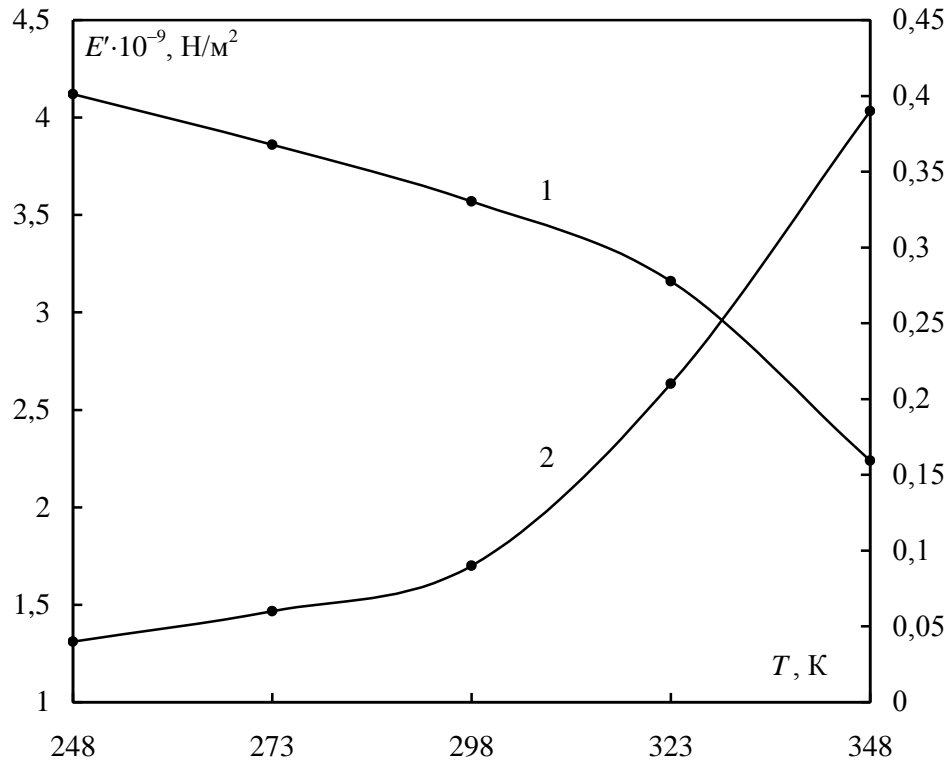


Рис. 4. Температурні залежності динамічного модуля пружності (1) і тангенса кута механічних втрат (2) для ПВХ.

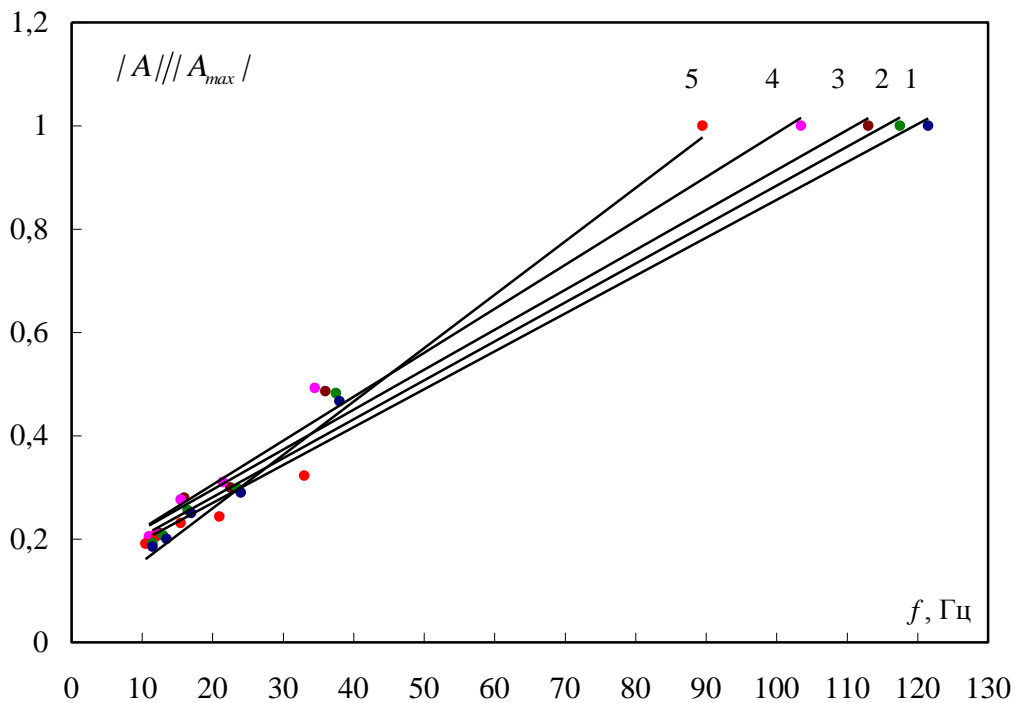


Рис.5. Прямі регресії для амплітуд резонансних максимумів зразків ПВХ в області частот 10–140 Гц при температурах: 1 – 248 К; 2 – 273 К; 3 – 298 К; 4 – 323 К; 5 – 348 К.

Значення величини R^2 при всіх температурах вимірювання лежать в діапазоні від 0,983 до 0,989, причому найменше значення спостерігається для $T = 348$ К. Окремо слід відмітити, що для вказаної температури спостерігається зменшення відносної амплітуди резонансних максимумів в області частот 15–40 Гц.

Таблиця 1.

Параметри рівняння регресії та значення коефіцієнта кореляції

Температура, К	a	b	R^2
248	0,0073	0,1229	0,989
273	0,0075	0,1299	0,987
298	0,0077	0,1407	0,986
323	0,0085	0,1348	0,988
348	0,0103	0,0526	0,983

Висновки. Проведені частотно-температурні вимірювання показали, що резонансний метод зсувних коливань вільного кінця закріпленого зразка має перспективи застосування для визначення в'язкопружних параметрів конструкційних полімерних матеріалів.

Експериментальні значення дійсної частини динамічного модуля пружності конструкційного полівінілхлориду добре корелюють з результатами отриманими аналогічним методами вимірювань.

Резонансні криві дають можливість визначити дисипацію енергії при динамічному навантаженні зразків полівінілхлориду на основних частотах коливань для різних температур.

Для амплітуд резонансних максимумів при різних модах коливань зразків полівінілхлориду при однакових температура існує кореляційна лінійна залежність.

Список використаних джерел:

1. Перепечко И. И. Акустические методы исследования полимеров / И. И. Перепечко. – М.: Химия, 1973. – 269 с.
2. Ferry J. D. Viscoelastic properties of polymers / J. D. Ferry // John Wiley & Sons, INC., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1980. – 672 p.
3. Kolupaev B. B. The acoustic spectroscopy of the PVC-based composition materials in audio frequency range / B. B. Kolupaev, V. V. Krivcov, E. V. Malynovs'kii // Acoustic bulletin. – 2014. – V. 16. – N. 2. – pp. 3–7.
4. Madigosky W. M. Improved resonance technique for material characterisation / W. M. Madigosky, G. F. Lee // Journal of the Acoustical Society of America. – 1983. – V. 73. – N. 4. – pp. 1374–1377.
5. Buchanana J. L. Numerical solution for the dynamic moduli of a viscoelastic bar / J. L. Buchanana Journal of the Acoustical Society of America. – 1987. – V. 81. – N. 6. – pp. 1775–1786.
6. Sound and Vibration Damping with Polymers / J. J. Dlubac, G. F. Lee, J. V. Duffy, R. J. Deigan, J. D. Lee. Edited by R. D. Corsatro and L. H. Sperling // ACS Symposium Series. – 1990. – No. 424. – pp. 49–62.
7. Simple vibrating reed apparatus for determination of thin film elastic modulus / F. Gamboa, J. E. Corona, J. A. Hoy-Benitez, F. Aviles, A. I. Oliva, V. Sosa // 1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences 2014 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/265975755_Simple_vibrating_reed_apparatus_for_determination_of_thin_film_elastic_modulus.
8. Mashchenko V. Simulation of resonance oscillations of a cantilever-fixed polymer rod/ V. Mashchenko, V. Krivtsov V. Kvasnikov // Proceedings of III International scientific and practical conference "2019: Modeling, control and information technologies" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://itconfdoc.nuwm.edu.ua/index.php/ITConf/article/view/60/29>.
9. Мащенко В. А. Інформаційна система для визначення амплітуди резонансних коливань консольно-закріпленого полімерного стрижня / В. А. Мащенко, В. В. Кривцов // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції „Технічне регулювання, метрологія, інформаційні та транспортні технології” / ред. Л. В. Коломієць, Г. Д. Братченко, В. Д. Постоварова; Одеська державна академія технічного регулювання та якості. – Одеса: Бондаренко М. О., 2019. – С. 97–99.
10. Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А. Я. Малкин. – М.: Химия, 1978. – 336 с.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 621.762 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.11

А.О. Михайлов¹, О.В. Михайлов², М.Б. Штерн²Национальный институт пищевых технологий¹,Институт проблем материаловедения НАН Украины²**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК**

Методом компьютерного моделирования исследован процесс обратного выдавливания спеченных порошковых заготовок. Рассмотрено влияние наличия несовершенных контактов между частицами порошка. Установлено, что на начальном этапе происходит осадка и уплотнение заготовки, а затем начинает преобладать процесс выдавливания. Распределения величин остаточной пористости и накопленной пластической деформации материала по объему изделия неравномерны. Непосредственно под деформирующим пуансоном находится зона затрудненной деформации. Минимальные плотность и накопленная деформация соответствуют области у свободной от нагрузки поверхности. Наличие несовершенных контактов приводит к появлению зон разуплотнения порошкового материала и уменьшению величины накопленной пластической деформации в этих зонах.

Ключевые слова: обратное выдавливание, порошковая заготовка, пористость, несовершенные контакты

А.О. Михайлов, О.В. Михайлов, М.Б. Штерн

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНЬОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРИСТИХ ЗАГОТОВОК

Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес зворотнього видавлювання спечених порошкових заготовок. Розглянуто вплив наявності недосконалих контактів між частинками порошку. Встановлено, що на початковому етапі відбувається осад та ущільнення заготовки, а потім починає переважати процес видавлювання. Розподіли величин залишкової пористості та накопленої пластичної деформації матеріалу за об'ємом виробу нерівномірні. Безпосередньо під деформуючим пуансоном знаходиться зона затрудненої деформації. Мінімальні щільність і накопичена деформація відповідають області у вільній від навантаження поверхні. Наявність недосконалих контактів призводить до появи зон розущільнення порошкового матеріалу та зменшення величини накопленої пластичної деформації в цих зонах.

Ключові слова: зворотнє видавлювання, порошкова заготовка, пористість, недосконалі контакти

A.O. Mikhailov, O.V. Mikhailov, M.B. Shtern

MODELING THE PROCESS OF BACK EXTRUSION OF POROUS BLANKS

The process of back extrusion of sintered powder blanks was studied by computer simulation method. The influence of the presence of imperfect contacts between powder particles is considered. At the initial stage, the blank is sedimented and compacted, and then the extrusion process begins to prevail. The distribution of residual porosity and accumulated plastic deformation of the material throughout the part volume is uneven. The zone of difficult deformation is located directly under the deforming punch. The minimum density and accumulated deformation correspond to the field of the surface free of load. The presence of imperfect contacts leads to the appearance of zones of softening of the powder material and a decrease in the amount of accumulated plastic deformation in these zones.

Keywords: back extrusion, powder blank, porosity, imperfect contacts

Постановка проблеми. Методи обробки тисненням спечених порошкових заготовок ефективно застосовуються при отриманні машинобудівних деталей різного призначення [1-3]. Серед цих деталей можна виділити велику групу, відмінною особливістю якої є наявність внутрішньої порожнини. Широко застосованим методом отримання таких деталей є метод зворотнього видавлювання.

Порошкові матеріали характеризуються наявністю пористості та можливістю змінювати свій об'єм при пластичній деформації. В зв'язі з цим процес протікання пористого матеріалу має ряд особливостей порівняно з процесом протікання компактного матеріалу.

Порошкові заготовки можуть містити різні дефекти, зокрема - несовершенні контакти між частинками порошку. Матеріал самих частинок може бути як більш, так і менш пластичним.

Встановлення закономірностей протікання порошкового матеріалу при зворотньому видавлюванні та врахування впливу на цей процес різних матеріальних характеристик деталей представляють собою актуальну задачу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент процес зворотнього видавлювання спечених порошкових заготовок досліджено достатньо повно [3]. Основна увага приділяється розподілу залишкової пористості та аналізу напружено-деформованого стану отриманих деталей. В той же час, вплив наявності дефектів та матеріальних характеристик при видавлюванні пористих порошкових деталей практично не вивчено.

Цель работы - исследовать методом компьютерного моделирования закономерности течения спеченного порошкового материала при получении изделий методом обратного выдавливания, установить влияние наличия в пористой заготовке несовершенных контактов.

Схема обратного выдавливания приведена на рис.1. Порошковая заготовка 3 помещается на выталкиватель 2 и деформируется под воздействием движущегося с постоянной скоростью пуансона 1. Боковая поверхность заготовки ограничена неподвижной матрицей 4.

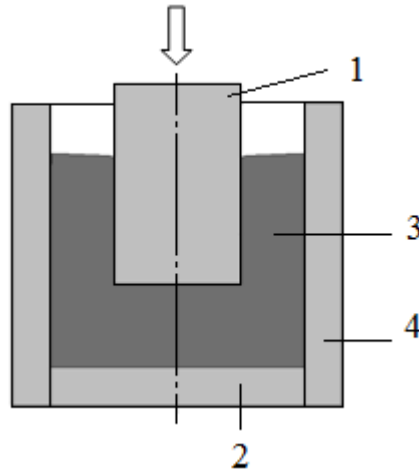


Рис. 1. Схема обратного выдавливания: 1 - пуансон; 2 - выталкиватель; 3 - порошковая заготовка; 4 - матрица

Размеры заготовки были: диаметр - 20 мм, высота - 20 мм. Диаметр пуансона равнялся 10 мм. Величину начальной пористости принимали равной 0.15. Считали, что в начальный момент пористость распределена по объему равномерно. Материал пористой заготовки - алюминиевый сплав. Коэффициент трения между порошковым материалом и инструментом принимали равным 0.10.

Деформируемое тело рассматривали как сплошную, непрерывную среду. Моделирование течения этой среды под воздействием внешней нагрузки проведено на основе соотношений теории пластичности пористого тела [4] и метода конечных элементов [5].

Согласно [4] уравнение поверхности нагружения пористого тела в $P - T$ плоскости имеет вид:

$$F = \frac{(p - p_0)^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi} - \tau_s^2 = 0, \quad (1)$$

где P_0 - значение шаровой компоненты напряженного состояния, при которой объем не изменяется. Размер полуоси эллипсоидального контура принимается зависящим от P :

$$\begin{cases} \psi = \psi_1 & \text{при } p \leq p_0 \\ \psi = \psi_2 & \text{при } p \geq p_0 \end{cases} \quad (2)$$

Величины материальных функций φ , ψ и P_0 определяются по формулами (3) – (6) :

$$\varphi = \frac{1}{(1+m)^2} \cdot (1-\theta)^3 \cdot (1-|2 \cdot a - 1|)^2 \quad (3)$$

$$\psi_1 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{(1-a)^2}{(1+m)^2} \quad (4)$$

$$\psi_2 = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1-\theta)^4}{\theta} \cdot \frac{a^2}{(1+m)^2} \quad (5)$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \tau_s \cdot \frac{(1-\theta)^2}{\sqrt{\theta}} \cdot \left(\frac{1-m-2 \cdot a}{1+m} \right), \quad (6)$$

где, наряду с пористостью θ и приведенным напряжением течения твердой фазы τ_s , входят два параметра a и m , изменяющиеся в диапазонах $0 \leq a \leq 1$, $0 \leq m \leq 1$. Эти параметры характеризуют разнсопротивляемость порошковых заготовок и пористых полуфабрикатов при растяжении и сжатии, а также возможность объемных изменений в отсутствии гидростатической компоненты тензора напряжений. Если $m = 0$, пределы текучести рассматриваемых материалов при всестороннем растяжении и сжатии равны между собой по абсолютной величине. Физическая природа данного параметра может быть связана с качеством контактов порошковых и пористых материалов. Если же $a = 0.5$, то, как следует из закона пластического течения, ассоциированного с поверхностью нагружения (1), скорость объемной деформации, определяемая формулой $e = \lambda \frac{\partial F}{\partial p}$, обращается в нуль при $p = 0$. Во всех остальных случаях данное условие не

выполняется, что является одним из проявлений дилатансии [6 – 8]. Физическая сущность параметра a , который характеризует внутреннюю симметрию поверхности нагружения, по – видимому, больше связана с элементами Кулонового трения, присущего слабозвязанным материалам в условиях преобладания сдвиговых деформаций [7]. При $m = 0$ и $a = 0.5$ условие пластичности (1) переходит в условия пластичности, описанные в [4,6 – 11].

При моделировании рассматривали три варианта сочетаний материальных параметров: $a=0.5$, $m=0.0$ (рис.2,а, контур поверхности нагружения симметричен, несовершенные контакты отсутствуют); $a=0.5$, $m=0.5$ (рис.2,б, порошковое тело имеет несовершенные контакты) и $a=0.55$, $m=0.5$ (рис.2,в, имеются несовершенные контакты и контур нагружения несимметричен).

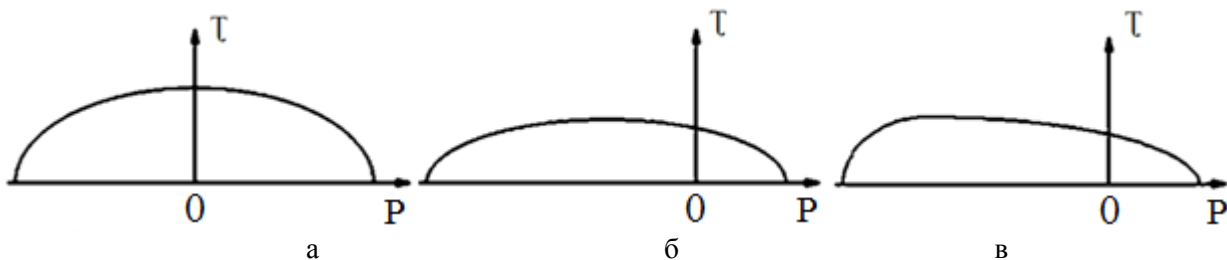


Рис. 2. Контур поверхности нагружения при различных значениях материальных параметров: а - $a=0.5$, $m=0.0$; б - $a=0.5$, $m=0.5$; в - $a=0.55$, $m=0.5$

Результаты моделирования. Компьютерное моделирование показало, что на начальном этапе процесса выдавливания происходит осадка и уплотнение порошковой заготовки, а затем начинает преобладать процесс вытекания материала в зазор между пуансоном и матрицей.

На рис.3 и рис.4 приведены соответственно результаты по распределению остаточной пористости и величины накопленной пластической деформации на последовательных этапах обратного выдавливания для случая, когда несовершенные контакты отсутствуют (рис.2,а).

Максимальное уплотнение материала происходит в области торца пуансона у его наружной поверхности. Непосредственно под пуансоном находится зона затрудненной деформации. По мере протекания процесса очаг деформации смещается в направлении дна заготовки.

Распределение остаточной пористости в полученном изделии неравномерно. Максимальное уплотнение материала произошло в областях дна и нижней внутренней поверхности стенки полученной детали. Минимальная плотность соответствуют верхней части стенки детали в области контакта с матрицей. В области затрудненной деформации под пуансоном также наблюдается уменьшение относительной плотности.

Изменение распределения накопленной пластической деформации происходит аналогично изменению относительной плотности.

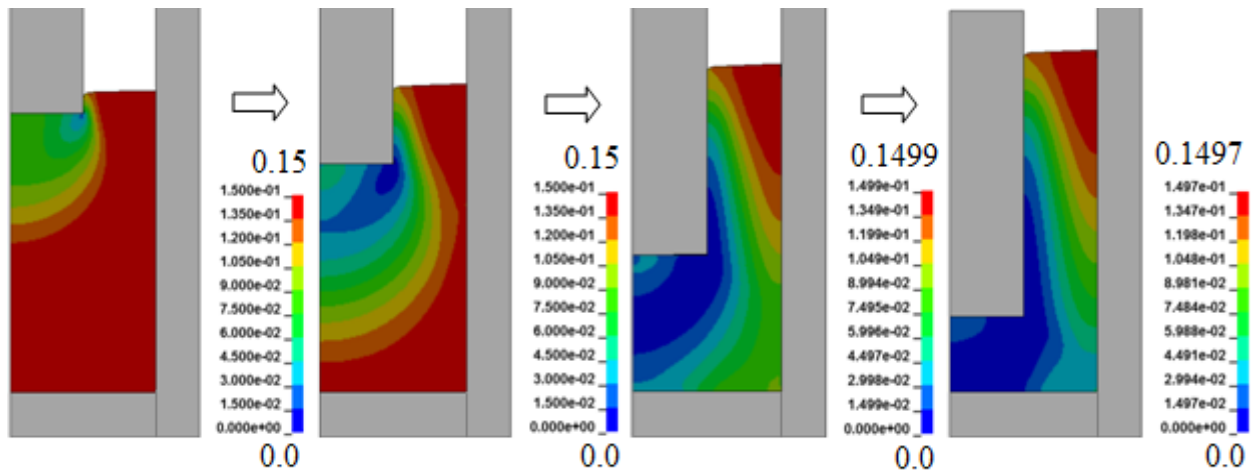


Рис. 3. Изменение распределения пористости в процессе обратного выдавливания ($a=0.5, m=0.0$)

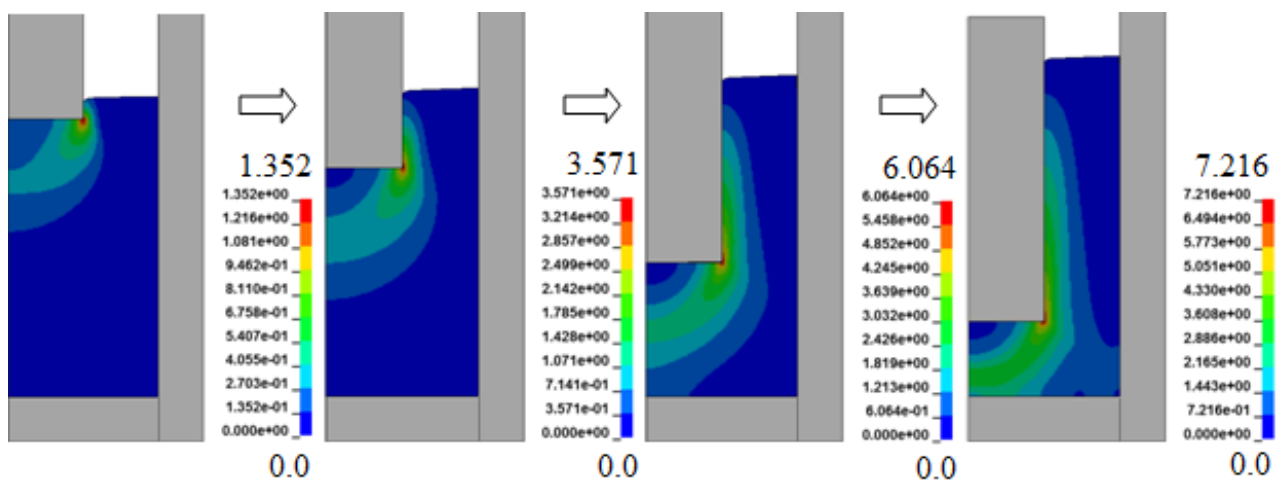


Рис. 4. Изменение распределения накопленной деформации твердой фазы в процессе обратного выдавливания ($a=0.5, m=0$)

На рис.5 и рис.6 представлены результаты по распределению остаточной пористости и величины накопленной пластической деформации при различных значениях материальных параметров порошкового тела. Величина перемещения пуансона была одинаковой и равнялась 5.09 мм.

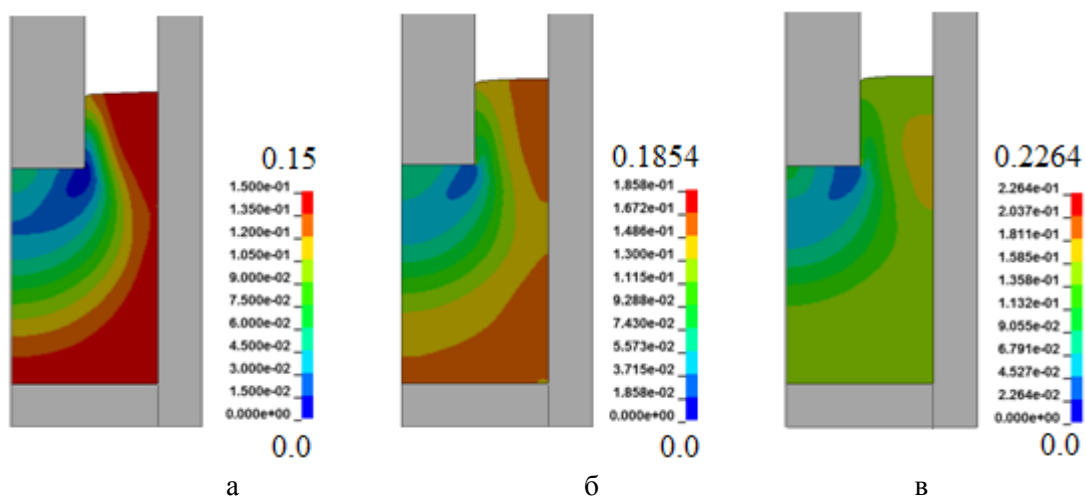


Рис. 5. Распределение пористости при различных значениях материальных параметров: а - $a=0.5, m=0.0$; б - $a=0.5, m=0.5$; в - $a=0.55, m=0.5$

Как видно из рис.5, характер распределения пористости для всех рассматриваемых значений материальных параметров аналогичен. В то же время наличие несовершенных контактов между

частинками (рис.5,б) приводить к появлению зон, в которых величина пористости увеличивается. При этом происходит увеличение высоты выдавленной стенки изделия. В случае несимметричности контура нагружения (рис.5,в) при $a > 0.5$ процесс разуплотнения материала заготовки может усиливаться.

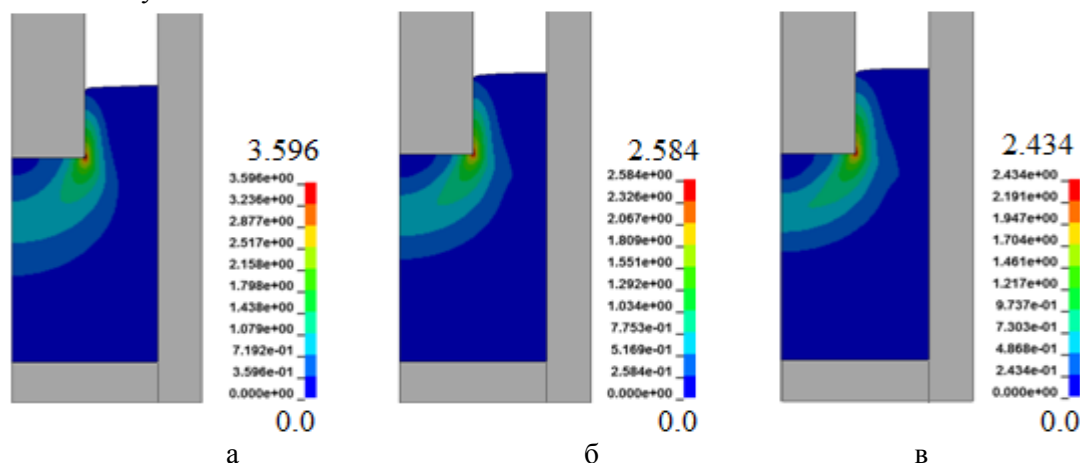


Рис. 6. Распределение накопленной деформации твердой фазы при различных значениях материальных параметров: а - $a=0.5, m=0.0$; б - $a=0.5, m=0.5$; в - $a=0.55, m=0.5$

Наличие несовершенных контактов влияет на величину накопленной пластической деформации материала пористого тела - она становится меньше (рис.6,б). Несимметричность контура нагружения обуславливает еще большее ее уменьшение.

Выводы. Процесс обратного выдавливания спеченных порошковых заготовок происходит в несколько этапов. На начальном этапе происходит осадка и уплотнение пористой заготовки, а затем начинает преобладать процесс выдавливания.

Распределения величин остаточной пористости и накопленной пластической деформации материала по объему изделия неравномерны. Минимальные относительная плотность и накопленная деформация соответствуют области у свободной от нагрузки поверхности. В области затрудненной деформации под пуансоном также наблюдается уменьшение относительной плотности и накопленной деформации.

Наличие несовершенных контактов приводит к появлению зон разуплотнения порошкового материала и уменьшению величины накопленной пластической деформации. Несимметричность контура нагружения порошкового материала также оказывает влияние на распределение этих параметров.

Список использованной литературы.

1. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. - М.: Металлургия, 1988. – 152 с.
2. Рябичева Л. А. Анализ напряженно-деформированного состояния при радиально - прямом выдавливании порошковых заготовок / Л. А. Рябичева, К. В. Любич // Сб. науч. тр. "Вестник НТУ "ХПИ": Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. – № 43. – С. 56-63
3. Горохов В. М. Объемная штамповка порошковых материалов / В. М. Горохов, Е. А. Дорошкевич, А. М. Ефимов, Е. В. Звонарев // Минск: «Навука і техника», 1993. – 272 с.
4. Штерн М. Б. Модифицированные модели деформирования порошковых материалов на основе пластичных и труднодеформируемых порошков / М. Б. Штерн, О. В. Михайлов // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія Машинобудування. – № 62. – 2011. - С. 13-19
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
6. Штерн М. Б. Развитие теории прессования порошков и теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия, 1992. – № 9. - С.12 - 25
7. Рудь В. Д. Експериментальна механіка структурно - неоднорідних матеріалів: Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. – 272 с.
8. Штерн М. Б., Рудь В. Д. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ, Київ – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2010. – 232 с.
9. S. Shima and M. Oyane: "Plasticity Theory for Porous Materials", *Int. J. Mech. Sci.*, 1976, vol. 18, pp. 285–291
10. R. J. Green, "A Plasticity Theory for Porous Materials", *Int. J. Mech. Sci.*, 1972, vol. 14, pp. 215–224
11. I. F. Martynova and M. B. Shtern "Plasticity Equation for Plasticity of Porous Bodies", *Poroshkovaya Metallurgiya*, 1978, No. 1 (181), pp. 23–29

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 669.01:621.762:621.89:621.9.048 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.12

Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНТИФРИКЦІЙНИЙ КОМПОЗИЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ НА ОСНОВІ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВІДХОДІВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН

У статті досліджено вплив технологічних параметрів виготовлення нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом на структуру, механічні та триботехнічні властивості при високих швидкостях тертя (підшипники працюють при швидкості обертання до 700 об./хв. і тиску до 5,0 МПа в повітрі). Проілюстровано механізм формування структури нових матеріалів та її вплив на властивості після використання розроблених технологічних режимів. Така технологія здатна забезпечити мікрогетерогенну дрібнозернисту структуру. Структура композиту складається з матриці на основі відходів інструментальної сталі та рівномірно розподіленого твердого мастила CaF_2 . Металева матриця є перлітною і складається з α -твердого розчину на основі заліза та карбідів легуючих елементів. Така гетерогенна структура сприяє високому рівню антифрикційних властивостей при важких робочих умовах. Тверда змащувальна речовина CaF_2 рівномірно розподіляється по поверхнях тертя. Фторид кальцію та хімічні елементи контактної пари утворюють антифрикційну плівку, яка забезпечує умови самозмащування. Продемонстровано можливість прогнозування та контролю поведінки антифрикційних матеріалів при високих швидкостях обертання шляхом вибору вихідних металевих шліфувальних відходів для забезпечення високого рівня функціональних властивостей. Використання шліфувальних відходів для отримання ефективних антифрикційних матеріалів дає можливість частково вирішувати глобальну проблему охорони навколишнього середовища.

Ключові слова: антифрикційний композиційний матеріал, шліфувальні відходи, інструментальна сталь, тверде мастило, технологія, структура, властивості, фрикційні плівки.

Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк

АНТИФРИКЦИОННЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПЕЧАТНЫХ МАШИН

В статье исследовано влияние технологических параметров изготовления новых антифрикционных композиционных материалов на основе шлифовальных отходов стали 7ХГ2ВМФ с твердой смазкой на структуру, механические и триботехнические свойства при высоких скоростях трения (подшипники работают при скорости вращения до 700 об./мин. и давлениях до 5, 0 МПа на воздухе). Проиллюстрировано механизм формирования структуры новых материалов и ее влияние на свойства после использования разработанных технологических режимов. Такая технология способна обеспечить микрогетерогенную мелкозернистую структуру. Структура композита состоит из матрицы на основе отходов инструментальной стали и равномерно распределенной твердой смазки CaF_2 . Металлическая матрица является перлитной и состоит из α -твердого раствора на основе железа и карбидов легирующих элементов. Такая гетерогенная структура способствует высокому уровню антифрикционных свойств при тяжелых рабочих условиях. Твердая смазка CaF_2 равномерно распределяется по поверхностям трения. Фторид кальция и химические элементы контактной пары образуют антифрикционную пленку, которая обеспечивает условия самосмазывания. Продемонстрирована возможность прогнозирования и контроля поведения антифрикционных материалов при высоких скоростях вращения путем выбора исходных металлических шлифовальных отходов для обеспечения высокого уровня функциональных свойств. Использование шлифовальных отходов для получения эффективных антифрикционных материалов дает возможность частично решать глобальную проблему охраны окружающей среды.

Ключевые слова: антифрикционный композиционный материал, шлифовальные отходы, инструментальная сталь, твердая смазка, технология, структура, свойства, фрикционные пленки.

Т.А. Roik, Yu.Yu. Vitsiuk

ANTIFRICTION COMPOSITE MATERIAL BASED ON TOOL STEEL GRINDING WASTE FOR PARTS OF PRINTING MACHINES

The article studies the effect of the technological parameters for the manufacture of new effective antifriction composite materials based on 7HG2VMF tool steel grinding waste with CaF_2 additions as a solid lubricant, on the structure, mechanical and tribological properties at the high friction speeds (bearings perform at the rotational speeds of 700 rpm and pressure up to 5.0 MPa in air). The paper illustrates the mechanism of new materials' structure formation and its effect for properties after use the developed technological modes. Such technology is able to ensure the microheterogeneous fine-grained structure. The composite's structure consists of the matrix based on tool steel waste and uniformly distributed solid lubricant CaF_2 . The metal matrix is perlite and consists of α -solid solution based on iron with hard grains of alloying elements' carbides. Such heterogeneous structure promotes the high level of the antifriction properties at severe operating conditions. It was shown the behavior of CaF_2 in the friction area under high temperature operating conditions. The solid lubricant CaF_2 is evenly distributed over the entire friction surfaces. Calcium fluoride and chemical elements of the contact pair form an antifriction film, which provides self-lubricating conditions. It was demonstrated the possibility of predicting and controlling the behavior of antifriction materials at high rotational speeds by selection of initial metal grinding waste for

ensuring the functional properties high level. The use of grinding waste to produce the effective antifriction materials makes it possible to partially solve the global problem of environmental protection.

Keywords: antifriction composite material, grinding waste, tool steel, solid lubricant, technology, structure, properties, friction films.

Постановка проблеми. Антифрикційні матеріали, що функціонують за високих швидкостей обертання, підвищених та високих температур, навантажень, у агресивному середовищі займають важливе місце серед існуючих матеріалів. Так, антифрикційні матеріали на основі заліза часто використовуються для жорстких умов роботи вузлів друкарських машин, насамперед, КВА Rapida-105, КВА Rapida-105-5, КВА Rapida-105-10 на повітрі при швидкостях обертання 500-600 об./хв. і підвищених навантаженнях (до 5 МПа), оскільки інші матеріали, зокрема на основі кольорових сплавів мають або незадовільні триботехнічні властивості, або взагалі є неприцездатними за таких важких умов роботи. Це призводить до виходу вузла тертя з ладу, скороченню термінів міжремонтних періодів та збільшенню кількості запасних частин. Окрім цього ряд матеріалів значно підвищують вартість вузла тертя і механізму у цілому [1, 2].

На сьогодні існуючі антифрикційні матеріали на основі заліза для важких умов роботи не задовольняють стрімко зростаючим потребам поліграфічної техніки. Литі матеріали часто мають недостатні показники експлуатаційних властивостей (високий коефіцієнт тертя та знос) або є взагалі неприцездатними, а матеріали, одержані методами порошкової металургії, мають високу вартість в наслідок високої вартості вихідних порошків [1–3].

Втім на промислових підприємствах існують великі потенційні джерела цінної та водночас дешевої сировини. Такою сировиною є шліфувальні відходи металів і сплавів, що утворюються на операціях шліфування на підприємствах металургійної, авіа- та суднобудівної, машинобудівної галузі тощо. Ці відходи вивозяться у відвали в наслідок їх забруднення абразивною крихтою від шліфувальних кругів і не використовуються у повторному виробничому циклі. Шліфувальні відходи містять у своєму складі велику кількість цінних легувальних елементів, таких як W, Mo, V, Co, Al, Ti, Cr, Nb та ін. [4, 5]. Після відповідної переробки їх можна використовувати у подальшому виробничому циклі, зокрема, для виготовлення ефективних композиційних підшипників ковзання, як це було започатковано авторами [4–8].

Тому питання створення нових композиційних антифрикційних матеріалів з високими експлуатаційними властивостями для жорстких умов роботи, у тому числі на основі заліза, при цьому таких, що виготовлені з цінної і дешевої сировини, відповідає вимогам часу і потребує виконання глибоких всебічних досліджень. Це є особливо важливим з погляду пошуку дешевих і доступних видів сировини і вирішення завдань реалізації ресурсо- та енергоощадних технологій.

Наведені аргументи стали підґрунтям для проведення комплексу досліджень, що спрямовані на створення нових антифрикційних самозмащувальних матеріалів на основі шліфувальних відходів швидкорізальної сталі Р7М2Ф6, що можуть використовуватись для роботи у важких умовах експлуатації, зокрема, у вузлах тертя друкарських машин.

Аналіз попередніх досліджень. Аналіз процесів тертя в умовах самозмащення показує, що темп зношування контактних поверхонь визначається властивостями утворених розділювальних антифрикційних плівок (вторинних структур) і значною мірою залежить від їх властивостей [2, 9–11]. Залежно від умов роботи плівки на контактних поверхнях можуть відігравати як позитивну роль, мінімізуючи сили тертя і запобігаючи зчепленню підшипника і валу, так і негативну роль, коли утворена плівка тертя виступає як абразив.

Причому при формуванні плівок тертя не окрема властивість матеріалу є значущою, а весь комплекс властивостей впливає на тривалу і надійну роботу антифрикційного матеріалу.

Ці властивості залежать від наявності у матеріалі легувальних елементів, здатних утворити таку структуру, яка буде забезпечувати утворення стабільних змащувальних плівок у процесі тертя та надасть антифрикційній деталі необхідного рівня функціональних властивостей. У свою чергу характер матричної структури будь-якого матеріалу, і антифрикційного у тому числі, залежить від застосованих технологічних заходів і їх параметрів у процесі виготовлення матеріалу.

На сьогодні проблема використання промислових металевих відходів у повторному циклі виробництва є надзвичайно важливою. Багато вчених в усьому світі присвячують свої дослідження проблемі утилізації і повторного використання відходів чорних і кольорових металів. Зазвичай такі відходи являють собою металеву стружку, скраб тощо [12, 13]. Ці відходи є

вихідною сировиною для виробництва нових конструкційних деталей, інструменту, які виготовляються за різними технологіями.

Однак відомості щодо повторного використання шліфувальних металевих відходів є вельми обмежені.

Роботи вчених за останні роки показали доцільність використання шліфувальних відходів деяких марок сталей і сплавів для виготовлення з них якісних конструкційних деталей [2, 9–11]. Автори [4–8] присвятили наукові дослідження з використання шліфувальних відходів деяких кольорових сплавів та сталей для виготовлення антифрикційних композиційних матеріалів і отримали позитивні результати.

Проте досліджень із застосування шліфувальних відходів широкої номенклатури сталей і сплавів як основи композиційних антифрикційних матеріалів для важких умов експлуатації було проведено у обмеженій кількості. Лише окремі публікації з означеної проблематики показали перспективність цього напрямку [4–8].

Вказані аргументи спричинили виконання всебічних досліджень з визначення особливостей структури, властивостей і характеру плівок тертя нових антифрикційних композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ [4–8] з додаванням твердого мастила до вихідної шихти, що призначені для роботи при швидкостях обертання (до 700 об./хв.) та підвищених навантаженнях (до 5 МПа) на повітрі у вузлах друкарського обладнання.

Це є актуальним завданням як з наукової, так і з практичної точок зору, і його вирішення дозволить розширити номенклатуру цінних металевих шліфувальних відходів для їх застосування у повторному виробничому циклі при виготовленні ефективних композиційних матеріалів різного функціонального призначення. Такий підхід сприятиме не тільки подальшому досягненню цілей щодо пошуку доступних видів сировини, але й частковому вирішенню глобальної проблеми захисту навколишнього середовища.

Мета роботи. Метою дослідження є вивчення структурних особливостей, антифрикційних властивостей і характеру антифрикційних плівок самозмашувального антифрикційного композиційного матеріалу на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом CaF_2 , що призначений для деталей високошвидкісних вузлів тертя друкарських машин КВА Rapida-105, КВА Rapida-105-5, КВА Rapida-105-10.

Експериментальна частина з обґрунтуванням отриманих результатів

Предметом дослідження є новий антифрикційний композиційний матеріал на основі шліфувальних відходів інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом CaF_2 (Табл. 1) [8].

Таблиця 1.

Хімічний склад матеріалу на основі шліфувальних відходів сталі 7ХГ2ВМФ

Вміст компонентів, мас. %										
C	W	Cr	Mo	Si	Mn	V	S	P	Fe	CaF_2
0,68- 0,76	0,55- 0,90	1,5- 1,8	0,5- 0,8	0,2- 0,4	1,8- 2,3	0,10- 0,25	0,02- 0,03	0,02- 0,03	основа	4,0- 8,0

Відходи інструментальної сталі 7ХГ2ВМФ утворюються на операціях шліфування штампів і є забрудненими абразивними частинками від шліфувальних кругів. Тому зазвичай такі відходи не використовуються у подальшому циклі виробництва. Проте ця сталь містить у своєму складі цінні легувальні елементи (табл.1). Тому вона є привабливою для використання як основи антифрикційного матеріалу саме для важких умов роботи.

Методика магнітної сепарації була застосована для очищення шліфувальних відходів від абразиву [1] з використанням магнітного сепаратора. Залишок абразиву становить 1–2 % після очищення металевих порошків-відходів.

Після очищення металеві порошки піддавали відновлювальному відпалу при температурах 870-1000°C в середовищі водню для видалення надлишкового кисню, що присутній у вигляді оксидів заліза та легувальних елементів. Відновлювальний відпал знижує загальну концентрацію кисню у порошках до 0,4 %. Це сприяє одержанню однорідної мікроструктури. Залишки литої структури спостерігаються у зразках з невідпалених порошків у вигляді зернограничних виділень карбідів біографічного характеру. Проте, після відновлювального відпалу карбіди заліза і легувальних елементів сфероїдизуються, зростає міцність матеріалу [14].

Кількість CaF_2 було обрано у межах 4.0-8.0 мас.% з таких причин: при кількості менше 4% CaF_2 не повною мірою виконуються функції твердого мастила, а при вмісті більше 10% дуже знижуються характеристики міцності та пластичності матеріалу [4–8].

Компоненти шихти (відходи сталі 7ХГ2ВМФ та порошки CaF_2) змішували протягом 4 год. та піддавали пресуванню при тисках 800–900 МПа. У результаті пресування композиційних сумішей були одержані пресовки, що мали пористість 20–22%. Пресування при тисках менших за 800 МПа призводило до одержання пористості в межах 34–36 % й майже повної втрати цілісності брикетів, а при тисках більше 900 МПа відбувалося розшарування пресовок, пов'язане з різницею густини вихідних компонентів шихти.

Після пресування проводили спікання зразків матеріалів у муфельній печі у середовищі висушеного водню (точка роси становить -40°C). Дослідження впливу умов спікання проводили в інтервалі температур 800–1200 $^\circ\text{C}$. Отже, було встановлено, що спікання доцільно проводити за температур 1100–1150 $^\circ\text{C}$, які забезпечують одержання максимальної щільності (після спікання пористість становила 11–13%) й високого рівня механічних властивостей (рис. 2).

Структуру вивчали за допомогою оптичних та растрових електронних мікроскопів [8, 10]; фторид кальцію в матриці визначали за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM). Триботехнічні випробування проводилися на машині тертя ВМТ-1 (швидкість обертання $V = 700$ об./хв., навантаження P до 5,0 МПа), контртіло виготовлено з литої інструментальної сталі Р18 (твердість 57–59 HRC). Матеріал контртіла сталь Р18 відповідає матеріалу реальних валів у високонавантажених вузлах тертя.

В результаті розроблених режимів технологічних операцій виготовлення в матеріалі середнього складу 7ХГ2ВМФ + 5% CaF_2 утворилась складна гетерогенна структура, що складається з металевої матриці та розподілених в ній частинок твердого мастила CaF_2 , зображення якої наведено на рис. 1.

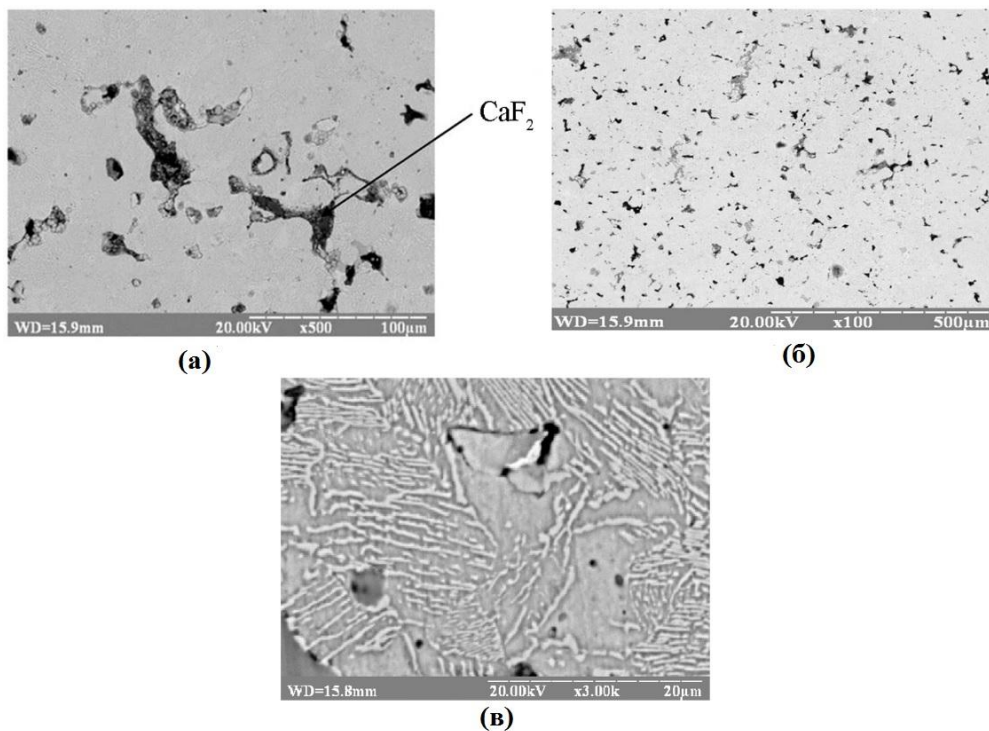


Рис. 1. Зображення мікроструктури композиту, не травлений шліф, (а) електронно-мікроскопічне фото; (б) оптична мікроскопічна фотографія; (в) фрагмент перлітної фази

Як видно з рис. 1, тверде мастило CaF_2 рівномірно розподілене по всьому композиційному матеріалу.

Легувальні елементи утворюють ряд складних карбідів, що описуються формулами Me_{23}C_6 , Me_2C , Me_6C і MeC [14, 15]. Наявність карбідів визначали методом електронної дифракції, зображення яких наведено на рис. 2, 3.

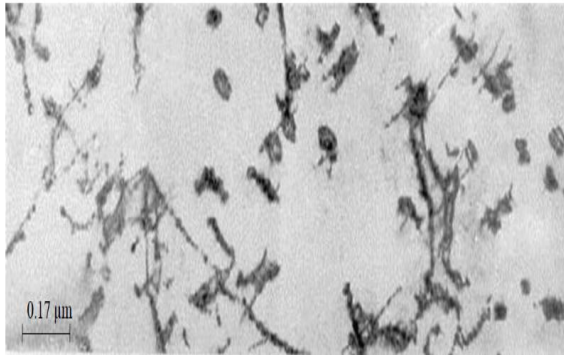


Рис. 2: Карбіди Mo_2C в металевій матриці

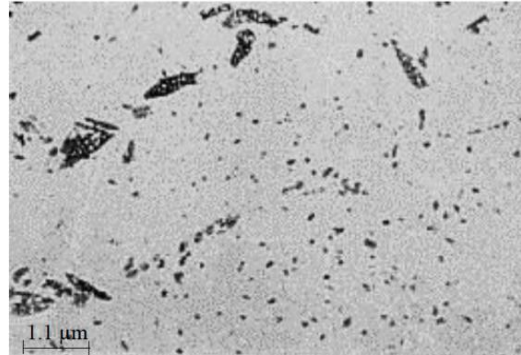


Рис. 3: Карбіди $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$, VC та $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mo})_6\text{C}$ в металевій матриці

Легувальні елементи в порошках-відходах сприяють утворенню в матеріалах фаз, що відповідають за формування експлуатаційних властивостей сплавів. Слід відмітити, що вплив легувальних елементів на характеристики матеріалів залежить від способу їх введення у матеріал.

Так, хром виявляє себе по-різному залежно від способу його введення. При додаванні чистого порошку Cr призводить до формування надто гетерогенної структури. Це обумовлено уповільненням процесів розчинення хрому у залізній основі внаслідок його високої здатності до окиснення та карбідоутворення [15]. Проте одержання матеріалу з легованої сировини (порошків-відходів) забезпечує формування більш однорідної структури. Така структура забезпечила формування властивостей, що наведені у табл. 2.

Таблиця 2.

Властивості досліджених матеріалів

Склад, мас. %	Міцність при згині, МПа	Ударна в'язкість, КС, Дж/м ²	Твердість НВ, МПа	Коеф. тертя/знос, мкм/км (при 700 об./хв.)	Максимально допустиме навантаження, МПа/швидкість, об./хв.
7ХГ2ВМФ + 4 CaF ₂	590–630	650–680	2590–2640	0,18/41	5/750
7ХГ2ВМФ + 6 CaF ₂	570–620	630–670	2570–2630	0,16/39	5/750
7ХГ2ВМФ + 8CaF ₂	560–600	620–640	2550–2620	0,17/42	5/750
ЖГр3М15 [1, 3]	240–300	350–520	850–950	0,31/176	1,5/350

Триботехнічні та механічні властивості досліджуваних матеріалів представлені в таблиці 2 порівняно з відомим порошковим матеріалом на основі Fe [1, 3], який використовується в аналогічних умовах. У табл. 2 показано, що новий композиційний матеріал на основі відходів демонструє більш високі антифрикційні властивості при терті в режимі самозмащування при більш високих швидкостях обертання і навантаженнях, ніж відомий композиційний матеріал на основі Fe, який показав незадовільні триботехнічні характеристики при таких умовах експлуатації.

Щільні антифрикційні плівки утворились на контактних поверхнях, як на поверхні досліджуваного матеріалу, так і на контртілі при триботехнічних випробуваннях.

Скануюча електронна мікроскопія підтвердила наявність тонкого щільного антифрикційного шару на поверхнях тертя після триботехнічних випробувань (рис. 4).

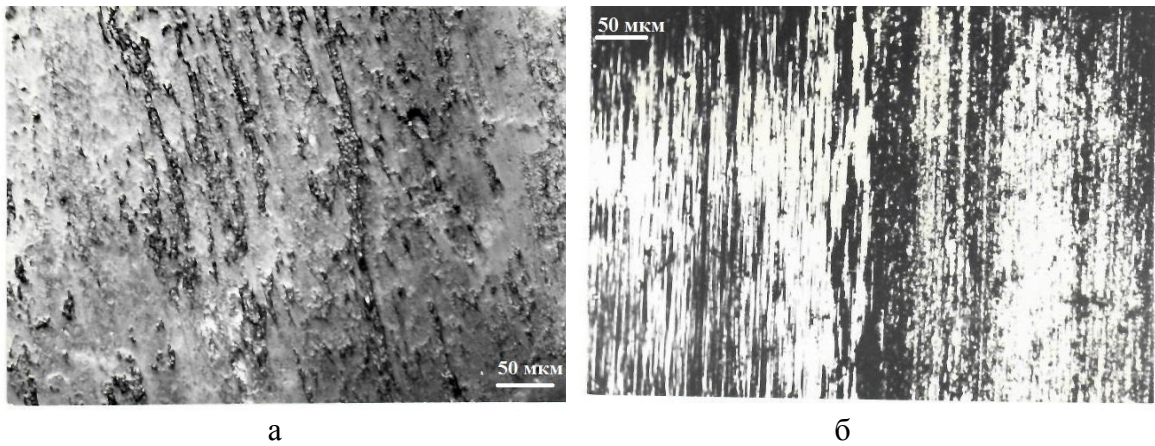


Рис. 4: Поверхні тертя після трибовипробувань: а-поверхня матеріалу; б-поверхня контртіла

Плівки тертя, ймовірно, складаються з складних оксидних і фторидних утворень, які покривають контактні поверхні і оберігають матеріал від об'ємного окислення. У даних умовах тертя має місце баланс між темпом зносу цих плівок і темпом утворення нових ділянок плівки тертя. Таким чином, режим самозмащення реалізується. Плівки тертя (вторинні структури) мають гладку мікротопографію (рис. 4), що мінімізує знос і стабілізує роботу пари тертя.

Висновки. Результати досліджень на прикладі нового антифрикційного композиційного матеріалу на основі відходів сталі 7ХГ2ВМФ з твердим мастилом CaF_2 , показують можливість визначати особливості формування структури матеріалів на основі відходів легованих сталей з урахуванням природи присутніх легувальних елементів і утворюваних ними фаз у металевій матриці. Це дозволяє прогнозувати природу зміцнення та антифрикційності матеріалів.

При цьому відкривається можливість керувати структурою композитів та їх властивостями через вибір вихідних легованих порошків-відходів для створення необхідної матричної основи та кількості твердого мастила.

Аналіз триботехнічних властивостей дозволив визначити діапазони раціональних режимів експлуатації досліджуваних матеріалів: навантаження до 5.0 МПа, швидкість обертання 700 об./хв., на повітрі, і рекомендувати їх для роботи у вузлах тертя друкарського обладнання.

Використання цінних шліфувальних відходів дозволить не тільки виготовляти нові ефективні композиційні матеріали і деталі з них, але й сприятиме частковому вирішенню проблеми охорони навколишнього середовища.

Подальші дослідження будуть присвячені встановленню складу плівок тертя і їх вплив на фрикційну поведінку залежно від умов експлуатації матеріалу. Це дозволить цілеспрямовано обирати склад матеріалу і встановлювати раціональні режими його використання у вузлах друкарської техніки.

Література

1. Киричок П.О., Роїк Т.А., Гавриш А.П., Шевчук А.В., Віцюк Ю.Ю. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин: Монографія.- К.: НТУУ КПІ, 2015.- 428 с.
2. Роїк Т.А., Киричок П.О., Гавриш А.П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації: Монографія. - К.: НТУУ „КПІ”, 2007.- 404 с.
3. Косторнов А. Г. Триботехническое материаловедение: Монография. — Луганск: «Ноулидж», 2012. — 701 с.
4. Роїк Т.А., Холявко В.В., Луфференко О.С. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11Р3М3Ф2// Наукові Вісті НТУУ «КПІ» – частина 1.- Технологічні фактори одержання матеріалів і їх вплив на структуру.- №3.- 2009.- С. 47-52.
5. Роїк Т.А., Холявко В.В., Луфференко О.С. Вплив легувальних елементів на формування структури і властивостей композиційних підшипникових матеріалів на основі відходів сталі 11Р3М3Ф2// Наукові Вісті НТУУ «КПІ» – частина 2.- Фазовий склад, структура і властивості матеріалів.-№4.- 2009.-С. 72-78.
6. Roik, T., Gavriush, O., Oliynik, V., Vitsiuk, Iu., Analysis of the properties of antifriction composites based on aluminum alloy's grinding waste. Eastern-European Journal of Enterprise technologies, 4/12 (94), PC Technology Center, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, pp. 16–22, 2018.

7. Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Ефективні композиційні антифрикційні матеріали на основі шліфувальних відходів сталі ШХ15СГ для середньоважких умов роботи// Наукові нотатки, Луцьк. - №61. -2018.-С. 198-203.
8. Jamroziak K., Roik T. New Antifriction Composite Materials Based On Tool Steel Grinding Waste// Materials Characterisation 2019, 9th International Conference On Computational Methods And Experiments In Material And Contact Characterisation, WIT, Wessex Institute, UK, 22 – 24 May 2019, Lisbon, Portugal.
9. Roik, T., Gavrish, A., Kirichok, P., Vitsyuk, Y., Effect of secondary structures on the functional properties of high-speed sintered bearings for printing machines. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Springer, New York, 54 (1-2), 119–127, 2015.
10. Jamroziak, K., Roik, T., Structure and Properties of the New Antifriction Composite Materials for High-Temperature Friction Units. Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Fatigue and Wear. FFW-2018, Book ID: 459769_1_En., Chapter No: 57, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore, pp. 628–637, 2019.
11. Jianxin, D., Tongkum, C., Self-lubricant mechanisms via the in situ formed tribofilm of sintered ceramics with CaF₂ additions when sliding against hardened steel, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 25(2), pp. 189–197, 2007.
12. Ramachandra, S.Rao, Resource Recovery and Recycling From Metallurgical Wastes. Waste Management Series, Elsevier, 557 p., 2011.
13. Шпак П.А., Гречанюк В.Г., Осокин В.А. Влияние электронно-лучевого переплава на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // Проблемы специальной металлургии. – 2002. – №3. - С. 14–17.
14. Геллер Ю. А. Инструментальные стали.- М.: Металлургия.- 527 с., 1983.
15. Анциферов В. Н., Акименко Б. Н., Гревнов Л. М. Порошковые легированные стали. - М.: Металлургия, 1991. – 318 с.

Рецензенти:

Величко Олена Михайлівна – Завідувач кафедри репрографії КПІ ім. Ігоря Сікорського, професор, доктор технічних наук.

Уманський Олександр Павлович – Завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства НАН України, професор, доктор технічних наук.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2019

УДК 004.74-047.36 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.13

А.В. Рубець*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***СИСТЕМА МОНИТОРИНГУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ**

У статті автори роблять детальний аналіз необхідності та актуальності використання систем моніторингу при роботі розподілених систем, зокрема при плануванні використання ресурсів, а саме: організації обслуговування, апаратного та програмного забезпечення, різноманітних комунікаційних зв'язків, логіки рішень.

Проводиться аналіз літературних джерел, де описуються, як теоретичні так і практичні аспекти використання моніторингових систем у багатьох сферах людського життя. Досліджується структура та основні підходи до побудови систем моніторингу.

Ключові слова: розподілені системи, моніторинг, ієрархія, програмне забезпечення, автоматизація, комплексна модель.

А.В. Рубець*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»***СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ**

В статье авторы делают подробный анализ необходимости и актуальности использования систем мониторинга при работе распределенных систем, в частности при планировании использования ресурсов, а именно: организации обслуживания, аппаратного и программного обеспечения, различных коммуникационных связей, логики решений.

Проводится анализ литературных источников, где описываются, как теоретические так и практические аспекты использования мониторинговых систем во многих сферах человеческой жизни. Исследуется структура и основные подходы к построению систем мониторинга.

Устанавливается, что формирование структуры системы мониторинга для распределенных систем является длительным процессом поэтапного решения задач относительно рационального выбора основных элементов и подсистем, а именно: принятие решений об определении подсистем и узлов и объединение их целей; классификация поставленных задач относительно узлов функциональных подсистем; определение оптимальных средств, которые позволят оперативно в поставленный срок решить задачи.

Ключевые слова: распределенные системы, мониторинг, иерархия, программное обеспечение, автоматизация, комплексная модель.

A. Rubets*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***FULL MONITORING SYSTEM FOR FORECASTING THE USE OF RESOURCES IN DISTRIBUTED SYSTEMS**

In the article, the authors make a detailed analysis of the necessity and relevance of the use of monitoring systems in the operation of distributed systems, in particular when planning the use of resources, namely: organization of service, hardware and software, various communications, decision logic.

Literary sources are analyzed, describing both theoretical and practical aspects of the use of monitoring systems in many areas of human life. The structure and basic approaches to the construction of monitoring systems are investigated.

It is established that the formation of the monitoring system structure for distributed systems is a lengthy process of step-by-step solution of tasks for the rational selection of the basic elements and subsystems, namely: making decisions regarding the definition of subsystems and units and combining their goals; classification of tasks assigned to nodes of functional subsystems; identifying the best tools to help you solve problems quickly.

Keywords: distributed systems, monitoring, hierarchy, software, automation, integrated model.

Постановка проблеми. Розподілені системи (РС) успішно використовуються майже у всіх сферах людської діяльності, оскільки перед ними ставиться вирішення пріоритетних задач, таких як: організація технологічних процесів на виробництві, енергетичне постачання, реалізація соціальних та різноманітних медичних проєктів, підтримка наукових програм, логістичне обслуговування, організація телекомунікаційного зв'язку, підтримка різних напрямків у державній діяльності [1].

Наслідком успішно організованої роботи РС є вагомі напрацювання та прийняття ефективних рішень перш за все у таких структурах як: політичні, соціальні, фінансові, військові тощо. Якщо звернути увагу на будову розподілених систем, то легко бачити, що в їх основі закладені різнопланові засоби програмного, технічного характеру, які дають змогу підтримувати

як окремий вид інформаційних процесів так і їх комбінації з метою надання необхідних інформаційних послуг. При вивченні структури сучасних РС, можна виокремити, такі особливості: функціональне розмежування, високий рівень розподілу використання ресурсів, трапляються поодинокі випадки єдиних центрів управління [4].

Таким чином, перед науковцями сьогодення, постає питання використання систем моніторингу у РС, це можна пояснити, тим, що виникає необхідність диференціації (розподілу) ресурсів для успішної роботи великої кількості структур, які забезпечують життєдіяльність людського суспільства тощо.

Перед системою моніторингу ставляться завдання, результатом вирішення яких, повинні бути достовірні дані, які дозволяють збільшувати ефективність роботи підсистеми інфраструктури відносно розподілу ресурсів. Крім цього, отримавши зменшення витрат того чи іншого об'єкта на інформаційні системи, системи моніторингу дають можливість для успішного функціонування ІТ-інфраструктури у подальшому потрібному напрямі. Це можна пояснити тим, що управлінська сторона об'єкта повинна володіти інформацією, стосовно інформаційних процесів, які відбуваються на певному рівні розбудови ІТ-інфраструктури, а також які дії для її вдосконалення потрібно здійснювати на перспективу. Оскільки новачі провадження сервісів та технологій вимагають відповідного рівня ІТ-інфраструктури. На практиці, досить поширеною проблемою під час впровадження програмно-апаратних засобів, якраз є «слабка» ІТ-інфраструктура, яка в результаті не може повноцінно виконувати свої завдання [2, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи моніторингу для виконання тих чи інших прогнозів володіють багатьма перевагами в порівнянні з традиційними підходами до прийняття рішень. Аналізуючи наукові розробки, бачимо, що вкрай непростою та актуальною задачею є правильна автоматизація та обробка різноманітної інформації з метою побудови комплексної моделі, для успішного управління тією чи іншою системою, на основі продуманого та підтвердженого використання ресурсів [1-3].

Даний напрям дослідження є досить актуальним серед науковців сьогодення, про що свідчить наявність великої кількості публікацій по даній тематиці, але разом з цим виникають нові задачі, які пов'язані із моніторингом та прогнозуванням для раціонального розподілу ресурсів у розподільних системах. Вагомий внесок у розбудову апарату розподілених систем зробили такі вчені, як: В.В. Бурзін, В.С. Бурцев, В.В. Васильєв, В.В. Воеводін, А. Г. Додонов, В. В. Домарьов, Е.В. Євреїнов, J. Knight, І.В. Прангішвілі, P. Varner, Б. Шнейер та інші [1,5].

Велику роль для формування теоретичного та практичного застосування розподілених систем ввідіграла книга Ендрю Таненбаума та Мартіна ван Стеєна «Розподілені системи. Принципи та парадигми», де детально описані основні технології, концепції розподілених систем, такі як: зв'язок, єдиність та реплікація, захист від атак, синхронізація. Крім цього, у книзі значна увага приділена першому веб-браузеру World Wide Web, всесвітня популярність якого і викликала підвищений інтерес в колі науковців, що призвело до дослідження та подальшої розбудови ієрархії розподілених систем, зокрема до вивчення питання створення архітектури системи моніторингу.

Виходячи з цього, виникає необхідність у ґрунтовному аналізі та систематизації матеріалу, стосовно необхідності у системах моніторингу, для створення вдалого прогнозу використання ресурсів у розподілених системах.

Формулювання цілей статті. Дослідити теоретико-практичні основи створення архітектури систем моніторингу, та розглянути особливості використання таких систем для прогнозування раціонального використання ресурсів у розподілених системах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо систему моніторингу для розподілених систем, яка містить програмний комплекс апаратних рішень, які здатні акумулювати, опрацьовувати та відтворювати різноманітну інформацію. Відмітимо, що структурні компоненти системи моніторингу функціонують на різних гетерогенних вузлах від спільної об'єднаної системи, які розташовані на різній відстані та є незалежними один від одного [1].

Особливості процесу моніторингу полягають у тому, що моніторинг дає змогу досліджувати поточний стан ресурсів у розподілених системах та прогнозувати їх використання на майбутнє. Головним завданням будь-якого моніторингу є: 1) накопичення інформаційних даних із усіх доступних джерел; 2) встановлення кореляцій; 3) знаходження характеристичних ознак.

Системи моніторингу успішно використовуються для розподілених систем під час прогнозування використання ресурсів, оскільки вони мають такі особливості: самостійний обмін даними, де добре відомі методи комунікації та синхронізації не активні; відправник та одержувач представляються як партнери із рівними можливостями, які беруть участь в неструктурованій

передачі інформації.

Проведемо дослідження основних вимог до побудови розподіленої системи моніторингу, перш за все необхідно брати до уваги особливості РС, які демонструють наступні принципи: 1) ієрархічну структуру – система складається із множини множин (булеану), де виокремлені зв'язки як між підсистемами РС та і із зовнішнім середовищем; 2) гетерогенність – складові частини системи є ресурси різного походження; 3) розподіленість – загальна система у своєму складі містить територіально розмежовані підсистеми; 4) динамічність – система є нестійкою і постійно перебуває під впливом, як зовнішніх так і внутрішніх факторів; 5) багатофункціональність – систему можна використовувати для відшукування розв'язку різнопланових задач; 6) потужність – система оперує великими обсягами інформації, яка в ній розташована.

Під час планування створення системи моніторингу перед розробником ставляться такі задачі, як: 1) ієрархія та функціонал системи; 2) структурування апаратних та програмних комплексів та опрацювання інформації на рівні будь-якої підсистеми; 3) вибір найоптимальніших методів для виконання поставлених задач і організація успішного функціонування; 4) встановлення зв'язків системи моніторингу для всіх її елементів; 5) забезпечення безпеки для зберігання інформації стосовно документів та операцій над даними [4].

При виборі методу для побудови описаної системи моніторингу, необхідно звернути увагу, щоб вони за своєю будовою та характеристичними ознаками, відповідали поставленим задачам із конкретними вимогами, а в результаті отримана система для моніторингу повинна забезпечувати потреби користувачів за всіма заданими характеристиками та мати ефективний функціональний механізм для оперування необхідними ресурсами та процесами, а також, отримана система повинна бути стійкою до зміни структури та різноманітних модифікацій під час роботи.

Життєвий цикл моніторингу складається з 4-х фаз: 1) ідентифікації ресурсів і проблем; 2) визначення основних можливостей (істотні, несуттєві; проблемні області, способи їхнього усунення й ін.); 3) визначення другорядних можливостей (істотні, несуттєві; проблемні області, способи їхнього усунення й ін.); 4) аналізу живучості (виявлення тенденцій із використання ресурсів, визначення динаміки росту, вироблення політики).

З метою кращої візуалізації матеріалу, формулювання основних вимог до систем моніторингу зобразимо у вигляді блок-схеми на *Рис. 1.*:



Рис. 1. Джерела формування вимог до моніторингових систем

В кінцевому результаті, повинен бути спеціальний документ, де будуть викладені всі типи вимог, які відповідають конкретно вказаним стандартам проектування і розташовані, в такому порядку: – функціональні; – інтерфейсні; – до продуктивності; – специфічні; – характеристики якості; – інші [3].

При вивченні питання структури системи моніторингу з'ясувалося, що успішне її функціонування здійснюється через визначення необхідних робочих показників, регулярну звітність, своєчасне реагування та усунення тих чи інших похибок у роботі. Тому що, ІТ-процеси є досить складними у своєму функціонуванні і можуть виникнути ризики стосовно захисту даних.

Головною вимогою до систем моніторингу – є виконання гарантії стосовно інформаційного забезпечення, бо воно дає змогу досягнути поставлених цілей та виконати поставлені завдання ІТ [2].

Основними об'єктами для моніторингу ІТ є: сервери; мережеве обладнання; додатки; бази даних; користувальницькі станції; спеціальні системи.

Отримані результати від проведення моніторингу ІТ дають змогу: оптимізувати витрати на комп'ютерні технології; отримати характеристику та оцінку якості ІТ-послуг; скоротити час простою та ліквідації несправностей в роботі надзвичайно важливих сервісів; централізувати управління сервісами компанії.

Моніторинг здійснюється шляхом автоматизованої перевірки та методом ручної перевірки.

Більшість процесів моніторингу ІТ залежать від конкретних потреб та умов досліджуваних об'єктів, проте можна виокремити декілька загальних ознак: всебічність – здійснення моніторингу повинно полягати у зрозумілих, чітких вимірниках та зосереджуватися на винятках; відповідність – моніторинг повинен відповідати поставленими завданням до об'єкта; прийнятність – метод моніторингу повинен не втручатися у щоденні обов'язки об'єктів; своєчасність – отримані результати моніторингу мають оперативно повідомляти про ті чи інші відхилення з метою прийняття правильних рішень.

Системи моніторингу ІТ використовують для виконання таких завдань: забезпечення функціонування обчислювальних систем без збоїв; зменшення проміжку часу на відшукування та ліквідацію несправностей; спостереження за функціонуванням роботи обчислювальних систем та додатків; проведення оцінки несправностей та їх впливу на роботу сервісів; побудова баз, які будуть містити інформаційні поради стосовно ліквідації несправностей; спрощення роботи системних адміністраторів [5.]

Моніторингові ІТ-системи мають такі функціональні властивості своєї роботи як: встановлення об'єктів моніторингу та інших необхідних компонентів відбувається автоматичним шляхом; забезпечення та підтримка програмних комплексів; надходження інформаційних даних із різнопланових джерел; чітко сформульовані правила для процесу моніторингу типових систем; встановлення та детальна діагностика неполадок; здійснення оцінки впливу неполадок на решту систем, сервісів, додатків; встановлення засобів сповіщення; формулювання правил моніторингу; візуалізація у вигляді графіків; аналіз віддалених систем, за межами зони брандмауера; побудова ієрархічної структури системи моніторингу; синхронізація з іншими правилами для проведення моніторингу [3].

Розглянемо приклад сучасних систем моніторингу та їхні характеристики. До основних засобів моніторингу відносять: 1) Remstats – включають багато серверів і маршрутизаторів. Основу системи складають додатки трьох категорій – сервери, колектори, програми монітори; 2) Alertmon – дозволяє визначати позаштатні ситуації, про які автоматично повідомляється адміністраторові, ведеться журнал проблем, і автоматично починаються спроби відновити нормальний режим роботи. На кожному із серверів з alertmon здійснюються функції спостереження за роботою «сусідів», що дозволяє створити розподілену систему моніторингу з можливістю централізованого спостереження за станом кожної ЕОМ в розподілених системах; 3) NCM — Network Complex Monitor – система комплексного моніторингу для всіх компонентів розподіленої системи. На даний момент, дозволяє моніторити: BGP, VOIP, хости, сервіси. У розробці використовується MySQLi PHP; 4) Autostatus – невелика за розмірами програма для моніторингу працездатності ЕОМ у мережі і перевірки активності наданих ними видів сервісу; 5) Wifi Scanner – сканер безпроводної мережі для виявлення точок доступу й активних кінцевих клієнтів. Працює під Linux, з більшістю драйверів безпроводних пристроїв (Cisco, Hermes/Orinoco, Atheros, Centrino, Prism II і т.п.). Результат може бути представлений як в інтерактивному режимі, так і у вигляді звіту чи графіка. 6) Netwhistler – програма по заданій масці, сканує всі адреси мережі й малює за отриманими даними структуру взаємодії хостів у вигляді карти, на якій відбиває статус пристроїв. Програма здійснює перевірку досяжності хоста, роботи типових сервісів, аналізує дані, які можна одержати по SNMP. Написана на Java. 7) Zenoss – Open Source Network/Systems Monitoring – розповсюджується під ліцензією GPL система моніторингу інфраструктури PC. При створенні PC може використовуватися в якості відкритої альтернативи продуктам IBM Tivoli, HP Open View, BMC Patrol. Програма написана мовою Python із використанням Zope, у якості СУБД використовується MySQL 5.0.x. У web-інтерфейсі активно використовуються Ajax технології. У програмі можна використовувати модулі моніторингу від системи Nagios, а також одержання інформації про стан об'єктів використовуючи SNMP, SNMP

Trap, Ping/ICMP, SSH/Telnet, Syslog, WMI, XML/RPC інтерфейс [5].

Таким чином, при розробці системи моніторингу важливе значення, з точки зору успішної роботи та аналізу системи, відіграє розташування, як окремих елементів, так і груп в цілому. Прикладом таких систем є: функціонування економіки, екологія, транспортна система (повітряна, наземна), виробничі комплекси тощо. Кожен із приведених засобів дозволяє виконувати ту чи іншу задачу моніторингу та формування звітності, виявляти певні фактори впливу різноманітних ресурсів.

До однієї з ключових функцій моніторингових систем є здійснення прогнозу ресурсів та ґрунтового аналізу інформаційних даних системного аудиту, створення звітності про характеристику роботи розподіленої системи та роботу системи в рамках реального часу.

Відмітимо, що існуючі засоби моніторингу розподілених комп'ютерних систем не відповідають повністю сформульованим вимогам, і можуть бути інтегровані до моніторингових систем у якості окремих підсистем. У зв'язку з цим виникає необхідність для подальшого вивчення та узагальнення матеріалів, з метою практичної реалізації вимог до систем моніторингу для факторів впливу на прогнозування ресурсів в розподілених системах.

Висновки. В статті проведено дослідження основних підходів та методів, які активно використовуються для розробки систем моніторингу, а також наведені ключові завдання, які постають перед розробниками апаратного та програмного комплексів для моніторингових систем та описані основні етапи проектування вказаних систем.

Побудова програмного забезпечення у вигляді моніторингових систем шалено набирає популярність у зв'язку із значною кількістю переваг для більшості галузей людської діяльності, які були розглянуті. Детальний аналіз наукових досягнень в даному напрямку, дав змогу систематизувати отримані, на даний час, новітні результати, та зрозуміти фундаментальне значення поставленої задачі в рамках даної статті.

Показано, що однією із ключових проблем при використанні розподілених систем є розробка та виконання раціональних рішень, які ґрунтуються на основі достатнього обсягу інформації з достовірних джерел, у зв'язку з цим активно розвиваються ідеї побудови систем моніторингу як в теоретичному так і практичному аспекті, які дають можливість здійснювати прогнози стосовно використання ресурсів у розподілених системах.

Список використаних джерел:

1. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и теория игр / Е.А. Берзин; под ред. Е.В. Золотова. – М.: Радио и связь, 1983. – 216 с.
2. Кузнецова М. Г. Забезпечення захищеності інформаційних ресурсів у розподілених системах: Сб. науч. тр. «Информационные технологии и безопасность». Вып. 7. — К.: ИПРИ НАНУ, 2004. — С. 38–40.
3. Таненбаум Эндрю. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Эндрю Таненбаум, Мартин ван Стеен. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с. – ISBN 5-272-00053-6.
4. Abdur Chowdhury, Ophir Frieder, Peng-Jun. On the Design, Development, Deployment, and Network Survivability Analysis of the Dynamic Routing System Protocol. Department of Computer Science. Illinois Institute of Technology. <http://www.ir.iit.edu/publications/downloads/DRS-NSA-SUPE.pdf>.
5. Robert J. Ellison, David A. Fisher, Richard C. Linger, Howard F. Lipson, Thomas A. Longstaff, Nancy R. Mead. Survivability: Protecting Your Critical Systems. <http://www.cert.org/archive/html/protect-critical-systems.html>

Стаття надійшла до редакції 16.10.2019

DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.14

П.П. Савчук, Д.М. Матрунчик, В.П. Кашицький, О.Л. Садова, Г.Ю. Петрук
Луцький національний технічний університет

СТРУКТУРУВАННЯ ЕПОКСИПОЛІМЕРІВ ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Досліджено вплив обробки епоксидних композицій в електромагнітному полі на процеси структурування, формування дефектної структури та міцність епоксидних полімерів. Визначено доцільність стадій охолодження епоксидних композицій після кожної обробки в електромагнітному полі. Встановлено оптимальну кількість циклів обробки, що включає стадії електромагнітного впливу та охолодження. Оптимізовано тривалість витримки на цих етапах.

Ключові слова: склад, електромагнітні поля, теплова енергія, сегменти макромолекул, реактивні групи, міцність на стиск.

П.П. Савчук, Д.Н. Матрунчик, В.П. Кашицкий, О.Л. Садовая, Г.Ю. Петрук
СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЕПОКСИПОЛИМЕРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Исследовано влияние обработки эпоксидных композиций в электромагнитном поле на процессы структурирования, формирования дефектной структуры и прочность эпоксидных полимеров. Определена целесообразность стадии охлаждения эпоксидных композиций после каждой обработки в электромагнитном поле. Установлено оптимальное количество циклов обработки, которое включает стадии электромагнитного воздействия и охлаждения. Оптимизировано продолжительность выдержки на этих этапах.

Ключевые слова: состав, электромагнитные поля, тепловая энергия, сегменты макромолекул, реактивные группы, прочность на сжатие.

P. Savchuk, D. Matrunchyk, V. Kashytskyi, O. Sadova, G. Petruk
STRUCTURING OF EPOXY POLIMERS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD

The influence of treatment of epoxy compositions in the electromagnetic field on the processes of structuring, formation of defect structure and strength of epoxy polymers is investigated. The expediency of the stage of cooling epoxy compositions after each treatment in an electromagnetic field is determined. The optimum number of processing cycles, which includes the stages of electromagnetic impact and cooling, is established. The duration of the shutter speed at these stages is optimized.

Keywords: composition, electromagnetic fields, thermal energy, segments of macromolecules, reactive groups, compressive strength.

Вступ. Епоксидні олігомери є основою для створення перспективних і високотехнологічних полімерних композитів [1, 2], у зв'язку з чим закономірності їх формування є об'єктом різностороннього вивчення. Серед матричних композитів епоксидні полімери посідають важливе місце, оскільки при їх твердненні формується просторова сітка, структура якої може бути направлено змінена фізичною і структурною модифікацією [3, 4]. Основними напрямками фізичної модифікації є піддавання полімеру дії зовнішніх фізичних полів (електричного, магнітного, теплового тощо), що дозволить отримати необхідні властивості модифікованого епоксиполімеру.

Однак для створення якісних полімерних матеріалів з покращеними термомеханічними, теплофізичними та іншими властивостями необхідно знати і враховувати комплекс хімічних і фізико-механічних явищ, які відбуваються в процесі структурування полімеру. З наукової та практичної точки зору необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів, зокрема магнітного та електричного полів на структуру та властивості полімерів [5-7].

Практична цінність фізичної модифікації епоксиполімерів полягає в підвищенні швидкості утворення хімічних зв'язків в реактопластах, оскільки за нормальних умов час переходу епоксидного олігомера у твердий стан становить 24...48 год. На виробництві проводити формування за класичним режимом є економічно не вигідним, тому необхідно застосовувати нові ефективні способи обробки, які б забезпечили інтенсифікацію технологічного процесу отримання виробів на основі епоксидних полімерів.

У випадку інтенсифікації процесів структурування реакційноздатних полімерів відбувається формування напруженого стану, який знижує міцнісні характеристики та скорочує ресурс роботи виробів на основі епоксидних полімерів. Тому актуальність роботи полягає у дослідженні процесів

структурування епоксидних полімерів в умовах впливу електромагнітного поля, що дозволить отримати високоміцні композитні матеріали за скороченим режимом формування виробів.

Мета роботи. Дослідити вплив тривалості обробки та потужності електромагнітного випромінювання на інтенсивність структурування та міцність епоксиполімерів.

Матеріали та методика досліджень. Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), що представляє собою високов'язку рідину з масовою долею епоксидних груп в кількості 20,0–22,5 % та летких речовин 0,2–0,8 %. Для структурування епоксидних смол при кімнатній та знижених температурах в умовах підвищеної вологості застосовують твердник поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70).

Формування дослідних зразків полягало в отриманні однорідної маси, до складу якої входили дозовані порції епоксидної смоли та твердника. Для забезпечення високої однорідності системи проведено механічне вимішування з низькою частотою обертання лопатей для запобігання нагріву в'язкої композиції. Підготовлену композицію заливали у спеціальні одноразові форми та піддавали впливу електромагнітного поля.

Границю міцності при стисканні визначали за ГОСТ 4651-82. Зразки у формі циліндрів діаметром $10 \pm 0,5$ і висотою 15 мм піддавали стиску з швидкістю наближення площадок 2 мм/хв.

Результати досліджень. Під впливом електромагнітного поля підвищується рухливість сегментів макромолекул епоксидної смоли, в результаті чого зростає температура композиції та швидкість реакції утворення хімічних зв'язків. При цьому виникає необхідність дослідження впливу потужності електромагнітного випромінювання та тривалості витримки на процеси структурування епоксиполімерних композицій, оскільки дані фактори спричиняють інтенсивне нагрівання композиції. З ростом температури відбувається виділення летких речовин, які призводять до формування пористої структури (рис. 1) з низькими механічними характеристиками.

В результаті аналізу експериментальних даних встановлено, що за тривалості обробки менше 20 с суттєвих змін в процесі структурування епоксидних композицій не відбувається, в результаті чого епоксиполімер містить значну кількість вологи і залишається непрозорим (рис. 2). За тривалості обробки більше 40 с композиція починає інтенсивно нагріватися, тому оптимальний діапазон тривалості обробки в електромагнітному полі знаходиться в межах 20–40 с за потужності випромінювання 125 Вт.

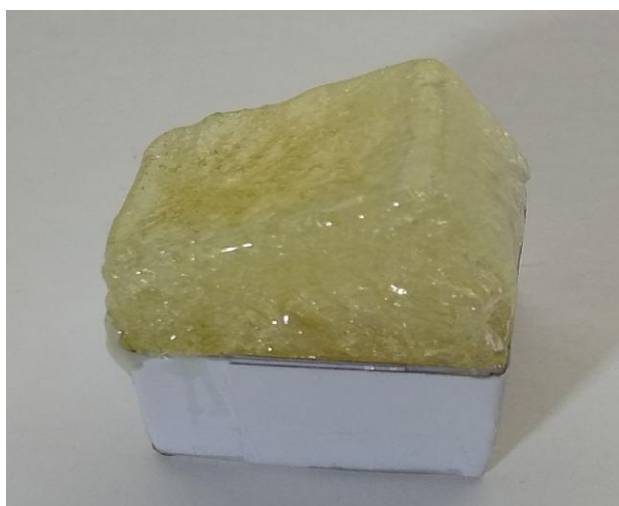


Рис. 1. Загальний вигляд спіненого епоксиполімеру

За тривалості витримки композиції 20 с границя міцності при стисканні епоксиполімерів становить 12,3 МПа, однак дана характеристика зростає у 2,8 рази у випадку застосування витримки в електромагнітному полі протягом 30 с (рис. 3). Це пов'язано з тим, що система отримала необхідну кількість енергії, яка не спричиняє перехід у твердий стан, однак підвищується рухливість сегментів макромолекул, в результаті чого створюються сприятливі умови для формування сітчастої структури епоксиполімеру. Витримка композиції протягом 40 с призводить до акумулювання теплової енергії, яка через низьку теплопровідність створює градієнт температур і спричиняє нерівномірне структурування.

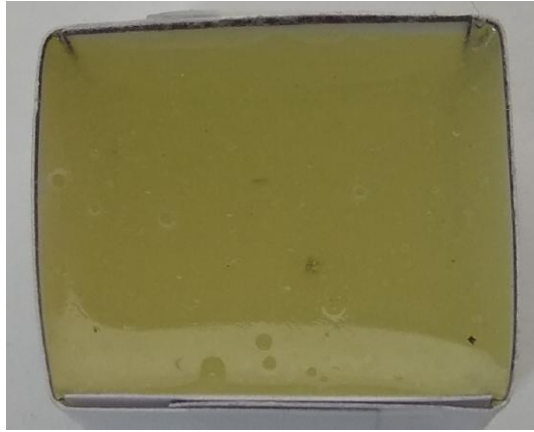


Рис. 2. Загальний вигляд зразка епоксиполімеру за тривалості обробки 10 с та потужності випромінювання 125 Вт

У випадку збільшення потужності випромінювання до 250 Вт відбувається інтенсивне виділення теплової енергії, яка призводить до локального структурування протягом 20 с, в результаті чого межа міцності при стисканні знижується на 30 – 35 % порівняно з обробкою за потужності 125 Вт. Із збільшенням тривалості витримки за потужності випромінювання 250 Вт відбувається різке зниження даної характеристики, оскільки крім локального структурування відбувається виділення летких речовин, які формують пористу структуру та знижують конструкційну міцність епоксиполімеру.

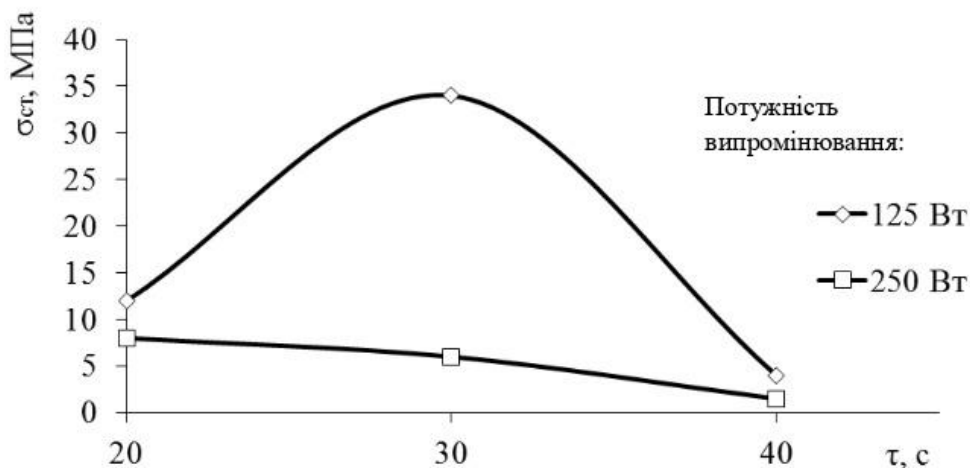


Рис. 3. Вплив тривалості витримки композиції в електромагнітному полі на межу міцності при стисканні епоксиполімерів

Очевидно, що обробка в електромагнітному полі не призводить до переходу композиції з в'язкого стану у твердий за малої витримки, а підвищення тривалості спричиняє формування дефектного стану. Тому необхідно забезпечити дисипацію теплової енергії, яка відбувається під час перерви, коли відсутній вплив електромагнітного поля. При цьому необхідно визначити тривалість перерви, під час якої відбувається охолодження системи.

Експериментально встановлено, що тривалість обробки композиції протягом 20 с не забезпечує високі значення межі міцності при стисканні за тривалості охолодження 5 хв, оскільки значна тривалість охолодження призводить до втрати теплової енергії, необхідної для ініціювання процесів структурування (рис. 4). Підвищення даної характеристики у 4,5 рази в результаті охолодження протягом 2 хв вказує на наявність в системі необхідного запасу акумульованої теплової енергії.

Однак за тривалості витримки в електромагнітному полі 30 с та 40 с кращі результати отримано у випадку охолодження 5 хв порівняно з тривалістю охолодження 2 хв, що вказує на потребу системи в рівномірному розподіленні реакційноздатних груп, які виступають центрами утворення хімічних зв'язків в епоксиполімерній системі.

Експериментально встановлено, що найвище значення межі міцності при стисканні мають епоксиполімери після обробки протягом 30 с (34 МПа), однак дана характеристика зростає на 34-

37 % у випадку проведення наступної обробки з охолодженням тривалістю 5 хв. Таким чином, ефективність структуривання підвищується за умови двоетапної обробки з перервою, яка забезпечує дисипацію теплової енергії. При цьому необхідно визначити оптимальну тривалість обробки на другому етапі обробки композиції в електромагнітному полі, оскільки встановлено, що епоксиполімерна система у в'язкому стані є досить чутливою до впливу енергетичного поля.

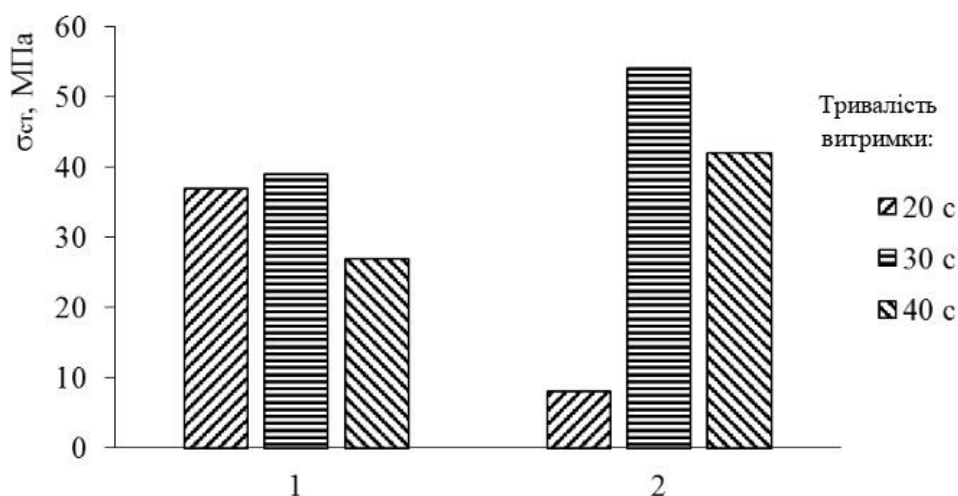


Рис. 4. Залежність межі міцності при стисканні епоксиполімерів структурованих в електромагнітному полі від тривалості охолодження: 1 – 2 хв; 2 – 5 хв

Встановлено, що оптимальна тривалість обробки в електромагнітному полі на другому етапі складає 30 с, що забезпечує підвищення межі міцності при стисканні до 54 МПа порівняно з тривалістю 40 с та 50 с (рис. 5), оскільки за даних умов відбувається зниження межі міцності на 9,2 % та 57 % відповідно.

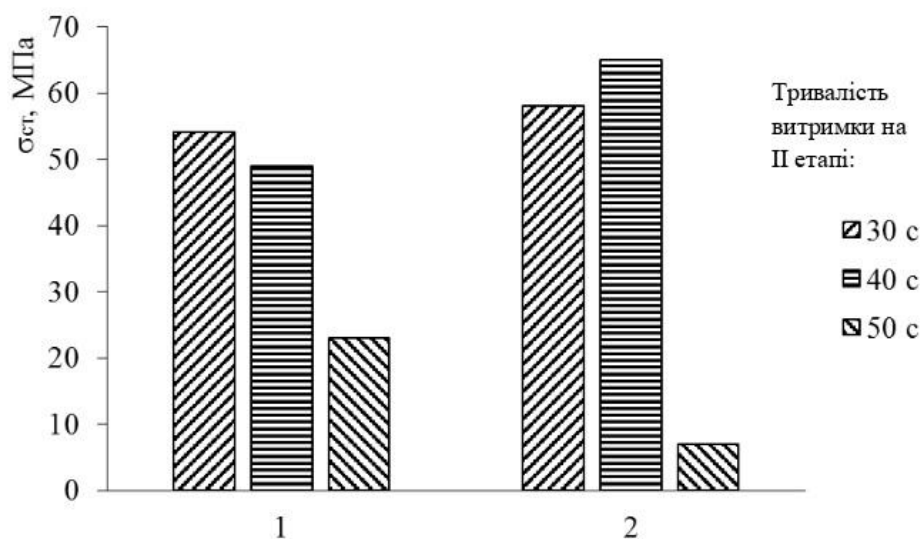


Рис. 5. Залежність межі міцності при стисканні епоксиполімерів структурованих в електромагнітному полі від кількості етапів: 1 – II етапи; 2 – III етапи

Очевидно, що на другому етапі структуривання система поводить себе аналогічно як на першому етапі, оскільки композиція знаходиться у в'язкотекучому стані. Тому значне підвищення тривалості обробки на другому етапі спричиняє підвищення теплової енергії, надлишок якої негативно позначається на формуванні напруженого стану.

Оскільки перехід композиції у твердий стан за два етапи не відбувається, тому доцільним є проведення третього етапу електромагнітної обробки з тривалістю обробки на першому етапі 30 с та витримкою під час охолодження 5 хв. Найвище значення межі міцності при стисканні (65 МПа) мають епоксиполімери структуровані за циклічним режимом електромагнітної обробки (30 с + 40 с + 30 с), коли тривалість обробки на другому етапі є вищою, а на третьому – нижчою. Очевидно, що тривалість на другому етапі 30 с не забезпечує генерування достатньої енергії для

протікання процесу структурування, а тривалість 50 с призводить до виділення надлишкової кількості теплової енергії.

Очевидно, що тривалість четвертого етапу електромагнітної обробки повинна складати 40 с, в результаті чого відбувається перехід епоксидної композиції у твердий стан з формуванням рівноважної структури полімеру з мінімальною кількістю дефектів (рис. 6) у вигляді повітряних або газових включень.

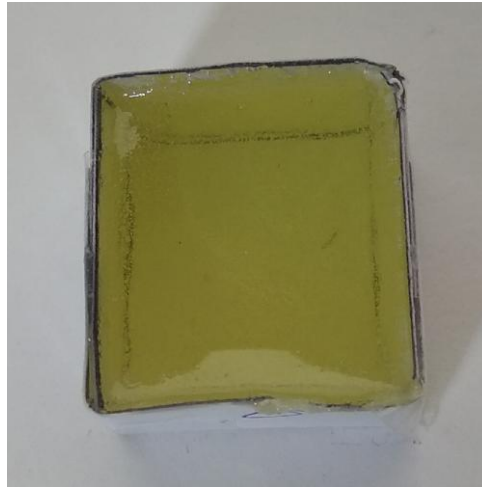


Рис. 6. Загальний вигляд зразка епоксиолімеру структурованого за циклічним режимом електромагнітної обробки

Експериментально встановлено, що дана циклічна електромагнітна обробка не забезпечує завершеність процесів структурування, оскільки значення механічних характеристик та вмісту гель-фракції залишаються на низькому рівні, тому необхідно проводити додаткову електромагнітну або термічну обробку для утворення вторинних хімічних зв'язків між реакційноздатними групами компонентів епоксидного полімера.

Висновок. Встановлено, що тривалість електромагнітної обробки на першому етапі повинна складати 30 с, що забезпечує генерацію оптимальної кількості теплової енергії, з наступним охолодженням протягом 5 хв, під час якого відбувається дисипація теплової енергії та рівномірне структурування епоксиолімерної системи.

Встановлено, що тривалість охолодження (5 хв) є високою у випадку обробки тривалістю 20 с, оскільки відбувається втрата теплової енергії, яка є необхідною для ініціювання процесів структурування, що призводить до гальмування структуроутворюючих процесів.

Застосування циклічного режиму електромагнітної обробки забезпечує формування твердої фази епоксиолімерів з невисоким ступенем структурування ($G = 78,6\%$), який підвищується до $88,2 - 88,7\%$ за рахунок наступної обробки у тепловому полі.

1. Чернин И.З., Смехов Ф.Н., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – Химия, 1982. – 232с.
2. Федоров В.В. Дослідження впливу природи наповнювачів на реологічні властивості епоксидних композицій / Федоров В.В., Білий Л.М. // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ. – 2006. – Випуск 17. – С.406-411.
3. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк, Є.М. Кальба. – Терноп. держ. техн. ун-т ім. І.Пулюя. – Т.: Збруч, 2005. – 182 с.
4. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями: монографія / П.Д. Стухляк, А.В. Букетов, І.Г. Добротвор. – Терноп. держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – Т.: Збруч, 2008. – 208 С. 3-5.
5. Полімерні композиційні матеріали в ракетно -космічній техніці : підручник / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399 с.
6. Букетов А. Дослідження властивостей модифікованих епоксикомпозитів під впливом теплового поля // Вісник ТДТУ. – 2004. – Т.9, №3. – С. 34-38.
7. Демченко В.Л., Віленський В.О. Вплив магнітного та електричного полів на структуру і властивості наповнених полімерів // Полімерний журнал. – 2009. – С. 97-110.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 621.9.048 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.15

Б.А. Саржанов

Сумський національний аграрний університет

НОВЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

В работе описан новый способ восстановления изношенных поверхностей деталей из нержавеющей стали 12X18H10T методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), электродами из твердого сплава T15K6 и из этой же стали 12X18H10T. Результаты проведенных исследований могут быть применены в ремонтных технологиях при восстановлении посадочных мест под подшипники качения, шкивов, защитных втулок и рабочих колес роторов, полумуфт и других деталей.

Ключевые слова: восстановление, качество, шероховатость, сплошность, толщина покрытия, электроэрозионное легирование, металлополимерные материалы.

Б.О. Саржанов**НОВИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОКРИТТІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ЛЕГУВАННЯ**

У роботі описаний новий спосіб відновлення зношених поверхонь деталей з нержавіючої сталі 12X18H10T методом електроерозійного легування (ЕЕЛ), електродами з твердого сплаву T15K6 і цієї ж сталі 12X18H10T. Результати проведених досліджень можуть бути застосовані в ремонтних технологіях при відновленні посадочних місць під підшипники кочення, шківів, захисних втулок і робочих коліс роторів, напівмуфт і інших деталей.

Ключові слова: відновлення, якість, шорсткість, суцільність, товщина покриття, електроерозійне легування, металлополімерні матеріали.

B.A. Sarzhanov**A NEW METHOD FOR INCREASING THE QUALITY OF COATINGS WHEN RESTORING PARTS BY THE METHOD OF ELECTROEROSION ALLOYING**

This work describes a new method for restoring worn surfaces of parts made of stainless steel 12X18H10T by electroerosive alloying (EEA), electrodes made of hard alloy T15K6 and the same steel 12X18H10T. In this case, the coating is applied in two stages, and at the first stage, a layer is applied using the modes that provide the greatest surface thickness with the greatest continuity, then a coating layer is applied to the resulting surface with the same electrode and EEA method with such a discharge energy and its corresponding productivity, at which form a surface with a roughness of approximately 2-4 times higher than in the previous step. As a result, at a relatively acceptable thickness of the reconstructed layer, the most rational roughness value is formed and the surface continuity increases to 100%. A reserve for increasing the thickness of the restored layer can be a combined technology, including EEA and the subsequent deposition of metal-polymer materials. In this case, individual technologies do not in any way reduce the dignity of each other, but supplement them and eliminate the disadvantages inherent in each technology individually. The results of the research can be applied in repair technologies when restoring seats for rolling bearings, pulleys, protective sleeves and impellers of rotors, coupling halves and other parts.

Key words: restoration, quality, roughness, continuity, coating thickness, electroerosive alloying, metal-polymer materials.

Постановка проблеми. При длительной эксплуатации машин изнашивание деталей сопровождается снижением эксплуатационных показателей. Износ рабочих поверхностей деталей нередко требует их полной замены, что повышает себестоимость производимой продукции. Важнейшими задачами ремонтно-обслуживающего производства являются поддержание работоспособности, восстановление ресурса машин и оборудования, обеспечение их высокой надежности и возможности эффективного использования. Повышение износостойкости отремонтированных деталей машин - одна из актуальных задач технического обслуживания и ремонта.

Для решения этих задач предусматривается улучшение качества ремонта за счет внедрения современных методов его организации и оптимальных технологических процессов упрочнения и восстановления деталей. Следовательно, ресурс восстановленных деталей должен быть, как правило, значительно выше, благодаря использованию эффективных способов восстановления и улучшенным свойствам упрочненных поверхностей.

Анализ основных достижений и публикаций. Современные ремонтные технологии располагают многочисленными методами восстановления деталей машин и оборудования. Значительное количество технологических приемов нанесения и многообразие областей применения покрытий, широкий спектр материалов для этих целей делают непростым в условиях

конкурентного подхода объективное решение по выбору покрытия и оптимальной технологии его нанесения.

Согласно [1] работоспособность и ресурс восстановленных деталей складывается в среднем 60...80% этих показателей для новых. Однако в настоящее время известны технологические методы (электрохимические, электрофизические и др.), с помощью которых можно полностью восстановить первичный ресурс деталей или даже увеличить его.

Восстановление деталей позволяет сэкономить значительное количество дефицитных материалов, в 2...3 раза продлить срок их службы, уменьшить выпуск товарных запасных частей на заводах-производителях и снизить себестоимость ремонта машин и оборудования.

Одним из путей улучшения качества поверхностного слоя и снижения стоимости ремонта машин является многократное восстановление формы деталей металлопокрытиями и обеспечение их взаимозаменяемости. На сегодня существует много разных технологических методов компенсации изношенного слоя металла деталей [1 - 4]. Наиболее распространенные из них, их преимущества и недостатки приведены в табл. 1.

В результате анализа таблицы можно отметить, что основными недостатками, которые негативно влияют на конечный результат или значительно повышают себестоимость ремонта являются: наличие поволоков и короблений; слабая адгезия нанесенного слоя с основой; наличие пор, трещин и шлаковых включений; снижение усталостной прочности; повышенная экологическая опасность.

Среди рассмотренных методов восстановления деталей большого внимания заслуживают электроэрозионное легирование (ЭЭЛ) и нанесение металлополимерных материалов (МПМ), которые экологически безопасны и последнее время все чаще используются в ремонтном производстве.

При выборе технологического способа восстановления большое значение имеет величина максимального износа, при которой деталь становится непригодной к эксплуатации. В общем случае 85% деталей машин становятся непригодными при износах, не превышающих $(0,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$ м [5].

В [6] исследованиями установлено, что на алюминиевых сплавах при помощи ЭЭЛ, электродами из сплава Al-Sn можно получить износостойкое покрытие, которое в 5-6 раз превышает стойкость закаленной стали. Особенностью такого покрытия является наличие в его структуре микро и нановолокон оксида олова, которые обладают высокой микротвердостью HV 1200 кг/мм².

Для получения покрытия повышенной толщины до $0,3 \cdot 10^{-3}$ м использована технология «барьерных» слоев [7]. Сущность технологии заключается в следующем: после нанесения 3÷4 слоев сплава АО20-1, когда приращение слоя приостанавливается, наносится так называемый «барьерный» слой, который изолирует нанесенное покрытие из сплава АО20-1 от следующего слоя такого же состава и позволяет продолжать наращивать толщину покрытия.

Следует отметить, что с увеличением режима ЭЭЛ (энергии разряда), как правило снижается сплошность (наличие сквозных пор) формируемого покрытия [8].

Резервом увеличения толщины восстановленного слоя могут быть комбинированные технологии например ЭЭЛ и нанесение металлополимерных материалов (МПМ). В данном случае отдельно взятые технологии не в коей мере не снижают достоинства друг друга, а дополняют их и устраняют недостатки, присущие каждой технологии в отдельности.

Преимущества интегрированной технологии ЭЭЛ + МПМ очевидны: сплошность поверхности 100%; шероховатость значительно ниже, чем при ЭЭЛ; твердость значительно выше, чем у МПМ; благодаря возможности нанесения методом ЭЭЛ покрытия с использованием большой гаммы электродных материалов, можно в широких пределах изменять механические, термические, электрические и другие свойства рабочих поверхностей деталей; попадание МПМ во впадины и микронеровности восстанавливаемой детали исключает вероятность образования очагов коррозии в этих впадинах; износостойкость, надежность и долговечность восстановленных деталей выше, чем при восстановлении, с использованием отдельно взятых технологий.

Таблиця 1

Технологии компенсации изношенного слоя металла деталей

Метод	Преимущества	Недостатки
Наплавка.	Повышение твердости и износостойкости, возможность неограниченно наращивать изношенную поверхность.	Образование трещин, высокая пористость, наличие шлаковых включений, снижение усталостной прочности, коробление, повышенная экологическая опасность.
Гальвано-покрытие.	Сохраняет структуру детали, высокая износостойкость и твердость поверхности.	Низкая прирабатываемость и смачивание маслом, снижение усталостной прочности, низкая адгезия, повышенная экологическая опасность.
Металлизация	Механические свойства материала детали не изменяются и деталь не поддается короблению, высокая износостойкость.	Высокая пористость (до 10%), снижение усталостной прочности, низкая адгезия, повышенная экологическая опасность.
Пластическое деформирование.	Повышает твердость, уменьшает шероховатость, повышает износостойкость.	Низкая производительность, возможное деформирование поверхности на 5-10 мкм и больше, могут возникать равномерные наплывы металла толщиной 0,03-0,3 мм.
Электро-эрозионное легирование.	Локальная обработка поверхности - легирование можно проводить на отдельных участках от нескольких мм и больше не защищая остальную поверхность; прочное соединение перенесенного и основного металла; отсутствие общего нагрева детали в процессе обработки, возможность использования в качестве обрабатываемых материалов: чистых металлов, сплавов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений; повышение твердости, жаро-, зносо- и коррозионной стойкости; отсутствие необходимой подготовки поверхности.	Повышение шероховатости, возникновение в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, снижение усталостной прочности.
Нанесение металло-полимерных материалов.	Возможность неограниченно наращивать изношенную поверхность, близкие к металлу деформационные характеристики, высокая адгезия.	Необходимость специальной подготовки поверхности, в том числе формирование шероховатости поверхности. Сравнительно невысокая твердость.

Следует отметить, что при использовании технологии ЭЭЛ + МПМ возможны различные варианты формирования поверхности. Методом ЭЭЛ можно варьировать высотой микронеровностей, а последующей лезвийной обработкой можно обеспечивать различное соотношение площадей из нанесенного металла и металлополимерного материала [9].

В [10] на подложку из стали 20, при различных режимах энергии разряда, наносили покрытия электродами из оловянной бронзы марки БрО10Ф1, твердого сплава Т15К6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Кроме этого на образцы из высокопрочного чугуна, марки ВЧ-60, на установке модели «Элитрон -22А» наносили покрытия из хрома, никеля и твердого сплава Т15К6. В результате предложены новые технологические решения, которые включают нанесение на изношенную поверхность стальных и чугунных деталей покрытия методом ЭЭЛ. При этом покрытие ЭЭЛ наносят в два этапа. На первом этапе наносят слой, используя режимы, которые

обеспечивают наибольшую толщину и сплошность поверхности. На втором – этим же электродом, с энергией разряда и соответствующей ей производительностью, формируют поверхность с шероховатостью приблизительно в 2-4 раза выше, чем на предыдущем этапе.

Многие детали используемые в конструкциях машин, эксплуатация которых подразумевает контакт с окислительными средами, органическими растворителями и неорганическими кислотами умеренной концентрации, например, оборудование химических и нефтеперерабатывающих производств, насосных и компрессорных агрегатов, центрифуг и др. основным материалом, используемым при изготовлении, является хром-никелевая нержавеющая сталь 12X18H10T. Учитывая это возникает необходимость в проведении исследований, направленных на повышение качества покрытий, применяемых при восстановлении этой стали. Работы, проводимые в этой области актуальны и своевременны.

Таким образом, **целью** работы является совершенствование способа интегрированной технологии восстановления деталей из нержавеющей стали 12X18H10T комбинированной технологией ЭЭЛ + МПМ, путем повышения качества покрытия, сформированного методом ЭЭЛ.

Методы исследования. Методом ЭЭЛ на установке модели «Элитрон 52-А» на образцы, размером 20x10x8 и 15x15x8 мм из стали 12X18H10T при различных режимах энергии разряда наносили покрытия электродами из твердого сплава Т15К6 и нержавеющей стали 12X18H10T (рис. 1).

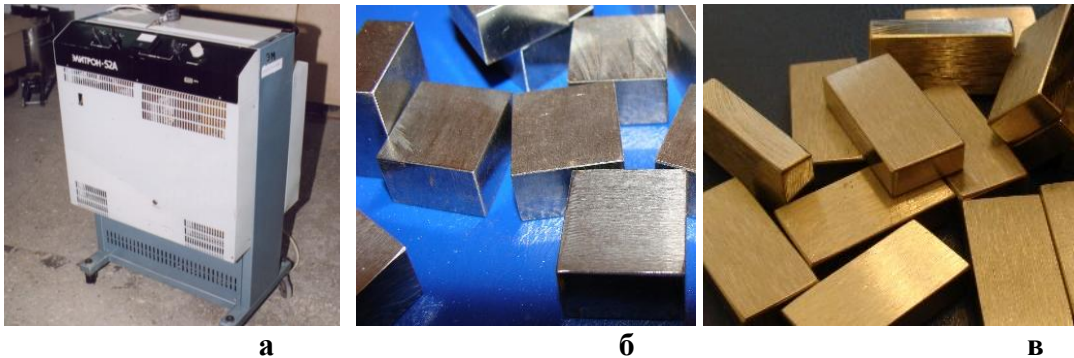


Рис. 1. Установка «Элитрон-52А», предназначенная для чистового и грубого ЭЭЛ (а) и плоские образцы размером: б – 15x15x6 мм; в – 20x10x5 мм.

При этом изготавливали три серии образцов: 1 серия – покрытие проводили в один этап: на один образец наносили покрытие на одном режиме; 2 серия – покрытия проводили в два этапа: первый на режиме, обеспечивающем наибольшую сплошность и толщину покрытия и второй на более грубом, с шероховатостью в 2-4 раза больше чем на предыдущем; 3 серия - покрытия проводили в два этапа в последовательности противоположной серии 2. Толщину покрытия измеряли микрометром, а шероховатость поверхности на профилографе профилометре модели 201 завода «Калибр» (рис 2).











Рис. 2. Измерение шероховатости на приборе профилографе – профилометре мод. 201 завода «Калибр».

Результаты исследований. Для повышения качества, упрочняемого или восстанавливаемого методом ЭЭЛ поверхностного слоя, нами предложен новый способ, при котором покрытие наносят поэтапно, причем на первом этапе наносят слой, используя режимы, которые обеспечивают наибольшую сплошность и толщину покрытия, затем, тем же электродом производят ЭЭЛ с такой энергией разряда и соответствующей ей производительностью, при которой формируют поверхность с шероховатостью приблизительно в 2-4 раза выше, чем на предыдущем этапе. В этом случае происходит выброс металла катода (детали) в местах приложения импульсов, т.е. распыление наиболее выступающих частей поверхности и на их месте образуются впадины вновь образованного покрытия, глубина которых находится на уровне поверхности предыдущего покрытия. В результате, происходит минимальное повышение уровня шероховатости поверхности [11]. Результаты проведенных исследований качественных параметров покрытий сведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость качественных параметров покрытий из твердого сплава Т15К6 и стали 12Х18Н10Т, сформированных методом ЭЭЛ на стали 12Х18Н10Т

Энергия разряда, W_p	Производительность, cm^2/min	Толщина слоя, мм	Шероховатость, Rz, мкм	Сплошность, %	Изображение поверхности
Твердый сплав Т15К6					
*0,55	2,5	0,14	23	100	
*0,90	3,4	0,19	65	85	
**0,55 + 0,90	1-й этап 2,5 2-й этап 3,4	0,22	37	100	
***0,90 + 0,55	1-й этап 3,4 2-й этап 2,5	0,15	54	90	
Сталь 12Х18Н10Т					
*0,35	1,7	0,09	13	95	
*0,55	2,5	0,15	31	80	
**0,35 + 0,55	1-й этап 1,7 2-й этап 2,5	0,22	17	100	
***0,55 + 0,35	1-й этап 2,5 2-й этап 1,7	0,21	34	80	

*- покрытие наносили согласно 1-й серии; ** - покрытие наносили согласно 2-й серии;

*** покрытие наносили согласно 3-й серии.

При нанесении покрытий из твердого сплава Т15К6 (см. табл. 2) сплошность покрытия 100% и толщина слоя 0,12 мм достигается при энергии разряда $W_p = 0,55$ Дж. Шероховатость поверхности при этом составляет $Rz = 23$ мкм. Дальнейшее увеличение энергии разряда приводит к возрастанию толщины слоя до 0,19 мм и значительному снижению качества покрытия (сплошность 85% и шероховатость $Rz = 65$ мкм).

При формировании покрытия поэтапно, согласно предлагаемого способа, с использованием первоначально энергии разряда $W_p = 0,55$ Дж, а затем $W_p = 0,90$ Дж толщина слоя составляет 0,22 мм при 100% сплошности и шероховатости $Rz = 37$ мкм. Нанесение покрытия в обратном порядке: сначала с $W_p = 0,90$ Дж, а затем с $W_p = 0,55$ Дж приводит к снижению его сплошности до 90% и возрастанию шероховатости до $Rz = 54$ мкм.

В табл. 2 представлены результаты качественных параметров покрытий при ЭЭЛ стали 12Х18Н10Т электродом инструментом из этой же стали. Как видно из таблицы наибольшая сплошность покрытия 95% и толщина слоя 0,09 мм достигается при энергии разряда $W_p = 0,35$ Дж. Шероховатость поверхности при этом составляет $Rz = 13$ мкм. Дальнейшее увеличение энергии разряда приводит к возрастанию толщины слоя до 0,15 мм и значительному снижению качества покрытия (сплошность 80% и шероховатость $Rz = 31$ мкм).

При формировании покрытия поэтапно, согласно предлагаемого способа, с использованием первоначально энергии разряда $W_p = 0,35$ Дж, а затем $W_p = 0,55$ Дж толщина слоя составляет 0,22 мм при сплошности приближающейся к 100% и шероховатости $Rz = 17$ мкм. Нанесение покрытия в обратном порядке приводит к снижению его сплошности до 80% и возрастанию шероховатости до $Rz = 34$ мкм.

Таким образом, восстановление деталей из нержавеющей стали методом ЭЭЛ, с использованием электрода инструмента из твердого сплава Т15К6 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т, наиболее целесообразно проводить в два этапа, согласно предлагаемому способу (см. табл. 2). Последующим нанесением МПМ можно неограниченно увеличивать толщину комбинированного покрытия, сформированного в последовательности ЭЭЛ + МПМ.

Выводы:

1. Предложен новый способ восстановления изношенных поверхностей деталей из нержавеющей стали 12Х18Н10Т методом ЭЭЛ, электродами из твердого сплава Т15К6 и этой же стали 12Х18Н10Т. При этом покрытие наносят в два этапа, причем на первом этапе наносят слой, используя режимы, которые обеспечивают наибольшую толщину поверхности при наибольшей сплошности, затем на полученную поверхность наносят слой покрытия тем же электродом и способом ЭЭЛ с такой энергией разряда и соответствующей ей производительностью, при которой формируют поверхность с шероховатостью приблизительно в 2-4 раза выше, чем на предыдущем этапе. В результате, при относительно приемлемой толщине восстановленного слоя, формируется наиболее рациональная величина шероховатости и до 100% повышается сплошность поверхности.

2. Резервом увеличения толщины восстановленного слоя может быть комбинированная технология, включающая ЭЭЛ и последующее нанесение металлополимерных материалов. В данном случае отдельно взятые технологии не в коей мере не снижают достоинства друг друга, а дополняют их и устраняют недостатки, присущие каждой технологии в отдельности.

3. Результаты проведенных исследований могут быть применены в ремонтных технологиях при восстановлении посадочных мест под подшипники качения, шкивов, защитных втулок и рабочих колес роторов, полумуфт и других деталей.

Список использованных источников:

1. Ремонт автомобілів: Навчальний посібник / Упор. В.Я. Чабанний. - Кіровоград: Кіровоградська районна друкарня, 2007. - 720с.
2. Иванов В.П. Технология и оборудование восстановления деталей машин: учебник – Минск: Техноперспектива, 2007. – 458с.
3. Ищенко А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 250 с.
4. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; Под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672с.

5. Канарчук В.Е., Чигринец А.Д., Голяк О.Л., Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование. – М. : Транспорт, 1995. - 303с.
6. Юрченко Е.В., Юрченко В.И., Дикусар А.И. Наноструктурирование поверхности из алюминиевых сплавов в условиях электроискрового легирования. Наноинженерия - 2013. -№2. - С.12-24.
7. Иванов В.И. Увеличение толщины электроискровых покрытий Состояние вопроса. Часть 1. Причины ограничения толщины покрытий. Часть 2. Методы увеличения толщины электроискровых покрытий. Труды ГОСНИТИ том 113. М. 2013 г. 429- 435 с, 150-456 с.
8. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - М.: Машиностроение, 1976.- С. 15- 17
9. Пат. 104664 Україна, МПК В23Н 5/00. Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (варіанти)/ Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Павлов О.Г., Іщенко А.О.; № u201209838; опубл. 14.08.12, Бюл. № 4. – 6с.
10. V Tarelnyk et al 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 233: 012050 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012050>
11. Пат. на корисну модель 138052 Україна, МПК В23Р 6/00, В23Н 1/00, С23С 28/00. Спосіб підвищення якості відновлених покриттів металевих деталей методом електроерозійного легування/ Саржанов Б.О.; № u2019 09758; опубл. 12.09.19, Бюл. № 21. – 19с.

Рецензенти:

Козаченко О.В., д.т.н., професор (ХНТУСХ ім. Петра Василенка, м. Харків)

Конопляченко Є.В., к.т.н., доцент (СНАУ, м. Суми)

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 658:0005.922.1:33(082) DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.16

І.О. Семенова
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПЛАНУВАННЯ БЮДЖЕТУ В ГАЛУЗІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

В статті представлено, що кібератаки здатні привезти організації до різного типу втрат: втрата інформації, прибутку, здатності функціонувати. Оцінка окупності інвестицій завжди була ключовим моментом для технологічних інвестицій. Розроблено метод обробки екстремальних значень, який відрізняється незначними обчислювальними витратами і забезпечує отримання однорідних вибірок даних та можливість їх використання для побудови моделей. Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що використання створеної в роботі інформаційної технології аналізу та прогнозування бюджету моделювання дозволило підвищити точність прогнозу в галузі інформаційної безпеки у реальному часі.

Ключові слова: кібератака, планування, бюджет, інформаційні технології, технологічні інвестиції, обчислення витрат.

И.А. Семенова
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ БЮДЖЕТА В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В статье представлено, что кибератаки способны привезти организации к различного типа потерь: потеря информации, прибыли, способности функционировать. Оценка окупаемости инвестиций всегда была ключевым моментом для технологических инвестиций. Разработан метод обработки экстремальных значений, который отличается незначительными вычислительными затратами и обеспечивает получение однородных выборок данных и возможность их использования для построения моделей. Практическое значение полученных результатов заключается в том, что использование созданной в работе информационной технологии анализа и прогнозирования бюджета моделирование позволило повысить точность прогноза в области информационной безопасности в реальном времени.

Ключевые слова: кибератака, планирование, бюджет, информационные технологии, технологические инвестиции, вычисления расходов.

I.O. Semenova
DEVELOPMENT OF BUDGET PLANNING METHODS IN THE INFORMATION SECURITY

The research paper presents that cyber-attacks can cause different types of losses of the organization: loss of information, profit, ability to operate. Estimating return on investment has always been a key point in technological investment. The method of processing of extreme values is developed, which is characterized by low computational costs and provides for obtaining homogeneous samples of data and the possibility of their use for building models. The practical significance of the obtained results is that the use of information technology of analysis and forecasting the budget created in the work allowed improving the accuracy of forecasting in the field of information security in real time.

Keywords: cyberattack, planning, budget, information technology, technological investment, cost calculation.

Постановка проблеми. Кібератаки здатні привезти організації до різного типу втрат: втрата інформації, прибутку, здатності функціонувати. Також слід пам'ятати про витрати на відновлення системи після атаки. Оцінка окупності інвестицій завжди була ключовим моментом для технологічних інвестицій. Незважаючи на достатній рівень розвитку математичного апарату для аналізу та прогнозування відповідних процесів, існують очевидні проблеми узгодження цих методів. На жаль, фахівці з прогнозування економічних показників не прогнозують екологічні і навпаки, фахівці з прогнозування екологічних процесів не прогнозують економічні. Не в останню чергу це залежить від несхожого математичного апарату прогнозування відповідних процесів.

Аналогічно парадоксу продуктивності ІТ [6], Returns of Investents in Security Investments окупність інвестицій в забезпечення безпеки (ROSI) стала спірною темою в зв'язку з величезним зростанням електронного бізнесу. При розрахунку ROSI здається занадто обтяжливим, збільшення можливостей і масштабів ІТ-безпеки порушення в зв'язку з ростом міжмережевої взаємодії робить це за необхідним. Організації визначили та пріоритезували найбільш важливі загрози для їх організації, використовуючи здебільшого кращі практики та методики галузі, за якими слідує дані про минулі кібератаки на організацію. Кількісні заходи, наприклад рентабельність інвестицій та чиста теперішня вартість, посіла четверте місце, і лише кілька CISO згадували, використовуючи числові показники при визначенні пріоритетності інвестицій

Тим не менше наука моделювання ризику все ще на початкових стадіях розвитку. Було підраховано, що компрометуючі фірми, в середньому, втратили приблизно 2,1% від їх ринкової вартості протягом двох днів оточуючих порушень безпеки [7].

Таким чином, проблема в даному дослідженні, полягає у відсутності ефективного використання інструментів оцінки InfoSec в процесі прийняття інвестиційних рішень InfoSec для визначення того, "в що" інвестувати. Це призводить до наступного головного питання дослідження: "Що повинен включати оптимальний інструмент самооцінки InfoSec, щоб допомогти InfoSec в прийнятті інвестиційних рішень?"

Однією з цілей методик та стандартів Інформаційної Безпеки, що часто використовуються на даний час, змусити керівників організацій замислюватися над своєю перспективою щодо ризику організації, а їх використання вказує на зрілість управління InfoSec. Однак залишається занепокоєння тим, що навіть якщо CISO використовують правильні інструменти, вони можуть не використовувати їх ефективно, тобто вони використовують їх як списки «для галочки».

Аналіз досліджень та публікацій. Усі організації заявляли про різні потреби в нових інструментах, які вони потребували б для керування витратами та визначення бюджету. Література показує, що більшість організацій визначає бюджет просто за рахунок копіювання витрат минулих років. Існує низка публікацій, що присвячені проблемам інформаційної безпеки в інформаційних системах і мережах передачі й обробки інформації. Завдання створення, організації й дослідження процесів функціонування, удосконалювання й розвитку систем забезпечення безпеки інформації тою чи іншою мірою знайшли відбиття в працях ряду вітчизняних і закордонних учених [1 – 4].

Метою цієї роботи є структурувати та спростити процес оцінювання інвестицій в галузі Інформаційної Безпеки. План, який допоможе організаціям зрозуміти, що необхідно розглянути, щоб ефективно визначити, в яку область Інформаційної Безпеки інвестувати.

Предмет дослідження - методи та підходи щодо вдосконалення процесу прийняття рішень щодо бюджетування проектів за напрямом Інформаційна Безпека в організаціях.

Виклад матеріалу дослідження. В ході дослідження було стверджено, що на даний час класичні моделі не є придатними рішеннями для охоплення потреби організацій в прийнятті інвестиційних рішень в InfoSec. Ранні дослідження InfoSec були зосереджені в основному на технологічній стороні, але в той же час то, як вчені відзначають, що недостатньо вивчати тільки технологію InfoSec. Для ефективного оцінки організаційної структури InfoSec необхідно враховувати людей, процеси і технології. Багато проектів в області інформаційних систем, як правило, зазнають невдачі. мають бути враховані при інвестуванні в InfoSec.

Проведені дослідження ґрунтуються на комплексі взаємопов'язаних методів дослідження – дедукція та індукція, синтез та порівняння, моделювання та аналіз, систематизація та узагальнення, використання яких у комплексі, передбачало теоретико-методологічний підхід у вивченні наукової літератури з теми дослідження, що мало на меті осмислення фактичного матеріалу, формування підґрунтя для подальшого дослідження, аналіз концепцій, відомих методик та пропонуваніх теорій для встановлення шляхів розв'язання досліджуваної проблеми; методах експертного оцінювання, опитування, спостереження, тестування; аналізу та прогнозування бюджету в галузі інформаційної безпеки з метою розробки досконалої моделі прогнозу, експертне оцінювання існуючих методів прогнозування часових рядів – з метою визначення рівня розробленості теми дослідження [1]. При статистичних методах аналізу отриманих даних прогнозування з метою встановлення кількісних та якісних характеристик прогнозного фінансового часового ряду, виявлення їх розбіжності за різними методиками.

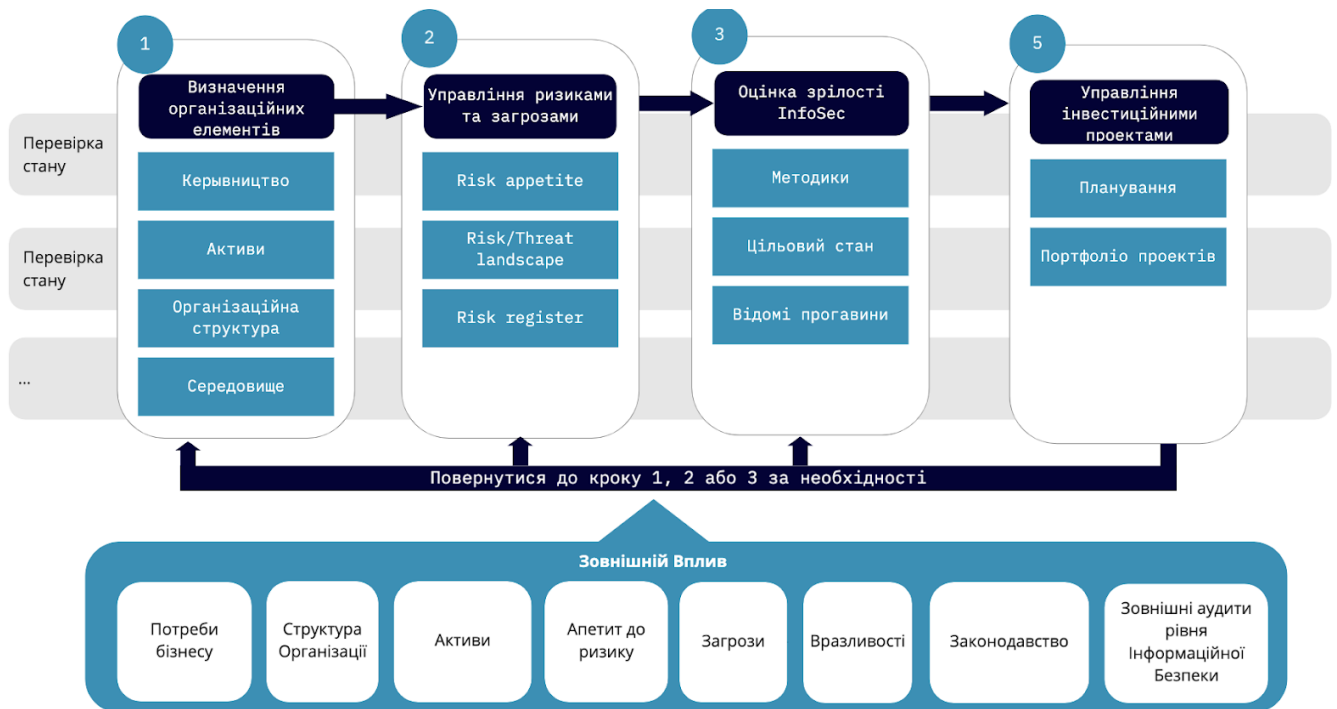
У ході дослідження запропоновано рекомендувати завжди робити огляд наступних концепцій:

- Зовнішнє середовище бізнесу (усвідомлення інформаційної безпеки, потреба у дотриманні інформаційної безпеки)

- Організаційна структура бізнесу
- Розуміння ландшафту кіберзагроз
- Поточний стан зрілості InfoSec в організації
- Аналіз прогавин інформаційної безпеки
- Побудови організаційної стратегії
- Визначення відповідних альтернатив
- Прийняття Рішення
- Змінні Рішення
- Ініціювання, планування та дотримання проекту

Наведені концепції пропонують брати до уваги усі зазначені фактори, але не показують структуру впливу та процесу прийняття рішення щодо бюджету. Після проведених опитувань

було виявлено внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на рішення. Також було запропоновано структуру огляду та підготування даних.



Легенда

1. Визначення організаційних елементів та зовнішні фактори (не вичерпний перелік)
2. Створення специфічного для організації реєстру ризиків та плани їх лікування
3. Оцінка поточної зрілості (суб'єкти господарювання), встановлення цільового стану та визначення прогалів / результати (наприклад, ризики зареєструвати план лікування)
4. Визначення інвестиційних цілей та приймання інвестиційного рішення (проекти)
5. Створення плану розвитку, що містить інвестиційні проекти та їх інформацію (наприклад, ресурси, графік, сфера застосування)
6. Контроль та вимірювання ходу плану/ проекту та, у разі необхідності, повернення до кроків 1, 2 або 3

Організації повинні знати їх організацію (структуру) та активи в межах, які мають важливе значення для нормальної безперервності діяльності. У режимі інструментів InfoSec функціональна структура організаційної структури описує структуру, на яку організація може орієнтуватися на оцінці методології InfoSec та розподіляти активи. Ці функції допоможуть організації вдосконалити оцінку InfoSec з огляду на (ділову) операцію.

Організації роблять оцінки InfoSec, які зазвичай мають деяку шкалу зрілості для оцінки постави InfoSec. Крім того, зазвичай застосовується підхід на основі ризику. Сприйняте зниження ризику вважається одним із найбільших рушійних факторів для інвестицій в InfoSec [4], і, таким чином, функція управління ризиками повинна мати можливість забезпечувати добре загальне розуміння ситуації з ризиком в InfoSec, щоб організація могла максимально орієнтувати інвестиції. необхідні області InfoSec.

Функціонал управління ризиками повинен мати можливість орієнтуватися на виявленні ризики для організаційної структури та активів, щоб визначити пріоритетність критичності інвестицій InfoSec між підрозділами та активами організації.

Функціонал управління загрозами забезпечить реєстр ідентифікованих для організації загроз, які стосуються організації (структури) та активів. Загрози можуть впливати з операційного середовища, оцінок ризику та зрілості InfoSec, а також рамки InfoSec [4]. Загрози можна визначити також із загальних списків уразливості, таких як OWASP (OWASP, 2017), і організація може краще оцінити загрози, спрямовані на поширені вразливості, наприклад. у своїх інформаційних системах, і, таким чином, краще оцінити, у що інвестувати.

Нарешті, слід визначити сфери інвестицій InfoSec для ефективного розподілу ресурсів. Там InfoSec є останньою, але, мабуть, найбільш критичною областю в інструменті. По-перше, методики використовуються в оцінках зрілості InfoSec, і ці оцінки проводяться в організації та в конкретних підрозділах, якщо це необхідно. Ризики, що виникають в результаті цих оцінок, повинні керуватися ними відповідно. Методики використовуються для ідентифікації загроз і можуть розглядатися також як "найкращі практики в галузі", що також є основним джерелом ідентифікації загрози.

Висновки. Розроблено метод обробки екстремальних значень, який відрізняється незначними обчислювальними витратами і забезпечує отримання однорідних вибірок даних та можливість їх використання для побудови моделей. Таким чином, задача створення інформаційної технології для підтримки прийняття рішень щодо прогнозування економічних процесів, що є складовою парадигми якості життя, на основі спільного математичного апарату.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що використання створеної в роботі інформаційної технології аналізу та прогнозування бюджету моделювання дозволило підвищити точність прогнозу в галузі інформаційної безпеки у реальному часі. У комплексі застосовані розроблені методи автоматизованого прогнозування наведено моделі аналізу використовувани при рішенні завдань вибору планування бюджету в галузі інформаційної безпеки

1. Баклан І.В. Математичні моделі прогнозування часових рядів різної природи / Баклан І.В., Селін Ю.М., Шулькевич Т.В. // Вестн. Херсонського національного техн. ун-та. - Херсон: ХНТУ, 2014. - Вып. 3 (50). – С.213-218.
2. Гарбарчук В. Кибернетический подход к проектированию систем защиты информации; Украинская академия информатики; Волынский гос. ун-т им. Леси Украинки; Люблинский политехнический ун-т / В. Гарбарчук, З. Зинович, А. Свиц. – К., Луцк, Люблин, 2003. – 658 с.
3. Киселев В.Д. Современные проблемы защиты в системах ее передачи и обработки / В.Д. Киселев, О.В. Есиков, А.С. Кислицын. – М.: Солид, 2000. – 200 с.
4. Маслова Н.А. Построение модели защиты информации с заданными характеристиками качества / Н.А. Маслова // Штучний інтелект. – Донецьк: ПШ, 2007. – № 1. – С. 51-57.
5. Шаньгин В.Ф. Защита информации в распределенных корпоративных сетях и системах / В.Ф. Шаньгин, А.В. Соколов. – М. : ДМК, 2002. – 134 с.
6. Berinato, S. Finally, a real return on security spending. CIO Magazine 2002, Feb. 15.
7. Denning, D. Reflections on cyberweapons controls. Computer Security J. 2000.- Vol.16(4). - P. 43–53.
8. Dor, D. & Elovici, Y. A model for the information security investment decision-making process. Computers & security. 2016. - Vol. 63. - P. 1-13.
9. Shulkevych T.V. Data Mining Mathematical Apparatus for Forecasting of Nonlinear Nonstationary Processes of Various Nature / T.V. Shulkevych, I.V. Baklan, Yu.M. Selin // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.– Дніпро, 2016. – Вип. 6 (107). – С. 151-158.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2019

УДК 624.012.45 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.17

М.Г. Сур'янінов, С.П. Неутов, І.Б. Корнєєва*Одеська державна академія будівництва та архітектури***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ МОДЕЛІ
ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПУСТОТНОЇ ПЛИТИ ПЕРЕКРИТТЯ**

Наведено результати лабораторних випробувань модельної конструкції багатопустотної плити перекриття. По відношенню до серійної плити, геометричні розміри моделі зменшені в два рази, але, виходячи з технологічних міркувань, плита має не 6, а 5 пустот. Виконано порівняння отриманих результатів з результатами комп'ютерного моделювання та розрахунку в програмних комплексах SOFiSTiK і LIRA-SAPR. Результати розрахунку методом скінчених елементів в двох різних програмних комплексах незначно відрізняються від експериментальних даних тільки до початку тріциноутворення. Згинальний момент від навантаження, яке відповідає початку утворення тріщин в експерименті, відрізняється на 1,36% від значення, отриманого в результаті комп'ютерного розрахунку, а прогин - на 5,9%. А при фактичному руйнівному навантаженню, отриманому в експерименті, згинальний момент перевищує аналогічну величину, визначену чисельно, в 3, 15 рази, а прогин - в 5,2 рази. Це свідчить про те, що лінійна модель, закладена при комп'ютерних розрахунках, є абсолютно непринятною після початку тріциноутворення. Процес утворення тріщин експериментального зразка плити почався при навантаженні 16,6 кН, що склало 59% від фактичної величини руйнівного навантаження.

Ключові слова: плита перекриття, модель, експеримент, несуча здатність, залізобетон, комп'ютерне моделювання, SOFiSTiK, LIRA-SAPR.

Н.Г. Сурьянинов, С.Ф. Неутов, И.Б. Корнеева*Одесская государственная академия строительства и архитектуры***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МОДЕЛИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПУСТОТНОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ**

Приведены результаты лабораторных испытаний модельной конструкции многопустотной плиты перекрытия. По отношению к серийной плите, геометрические размеры модели уменьшены в два раза, но, исходя из технологических соображений, плита имеет не 6, а 5 пустот. Выполнено сравнение полученных результатов с результатами компьютерного моделирования и расчета в программных комплексах SOFiSTiK и LIRA-SAPR. Результаты расчета методом конечных элементов в двух разных программных комплексах незначительно отличаются от экспериментальных данных только до начала трещинообразования. Изгибающий момент от нагрузки, соответствующей началу образования трещин в эксперименте, отличается на 1,36 % от значения, полученного в результате компьютерного расчета, а прогиб — на 5,9 %. А при фактической разрушающей нагрузке, полученной в эксперименте, изгибающий момент, превышает аналогичную величину, определенную численно, в 3, 15 раз, а прогиб — в 5,2 раз. Это свидетельствует о том, что линейная модель, заложенная при компьютерных расчетах, совершенно неприемлема после начала трещинообразования. Процесс трещинообразования экспериментального образца плиты начался при нагрузке 16,6 кН, что составило 59 % от фактической разрушающей нагрузки.

Ключевые слова: плита перекрытия, модель, эксперимент, несущая способность, железобетон, компьютерное моделирование, SOFiSTiK, LIRA-SAPR.

M.H. Surianinov, S.P. Neutov, I.B. Korneieva*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture***EXPERIMENTAL STUDIES OF THE BEARING CAPACITY OF MODEL REINFORCED
CONCRETE EMPTY FLOOR SLABS**

The results of laboratory tests of the model design of a hollow core slab are presented. In relation to the serial plate, the geometric dimensions of the model are halved, but, based on technological considerations, the plate has not 6, but 5 voids. The results obtained are compared with the results of computer modeling and calculation in SOFiSTiK and LIRA-SAPR software systems. The results of the finite element calculation in two different software systems differ slightly from the experimental data only before crack formation began. The bending moment from the load corresponding to the beginning of cracking in the experiment differs by 1,36% from the value obtained by computer calculation, and the deflection by 5,9%. And with the actual breaking load obtained in the experiment, the bending moment exceeds the similar value determined numerically by 3, 15 times, and the deflection by 5,2 times. This indicates that the linear model embedded in computer calculations is completely unacceptable after the onset of crack formation. The cracking process of the experimental plate sample began at a load of 16,6kN, which amounted to 59% of the actual breaking load.

Key words: floor slab, model, experiment, bearing capacity, reinforced concrete, computer simulation, SOFiSTiK, LIRA-SAPR.

Введение. Перекрытия являются важнейшим конструктивным элементом конструкций зданий и сооружений. В гражданских высотных зданиях массовая доля таких конструкций составляет около трети от всего расхода материала, поэтому совершенствование методов расчета и

разработка новых конструктивных решений перекрытий тесно связаны с экономической эффективностью объекта, повышение которой всегда является актуальным.

Как известно, главным недостатком железобетона является внезапное хрупкое разрушение, что в современных условиях становится серьезной проблемой ввиду непредсказуемости влияния разного рода техногенных факторов и террористических угроз. Одним из эффективных решений этой проблемы является использование высокопрочной стальной фибры в качестве добавки к обычному железобетону. Известно, что введение в бетон стальных фибр обеспечивает значительное повышение его прочности, увеличивает сопротивление термическому воздействию и истиранию, позволяет повысить вязкость разрушения. Последнее особенно важно, поскольку решается проблема хрупкого разрушения.

Влияние фибры на прочностные и деформативные свойства конструкции, в данном случае изгибаемой плиты, конечно же, предпочтительно исследовать на полноразмерных образцах серийных плит. Однако такой подход оказывается более дорогостоящим и трудоемким. Вместе с тем, экспериментальные исследования, проведенные на моделях, позволяют установить основные качественные и количественные закономерности, присущие дисперсно-армированным плитам.

Целью данной работы является исследование несущей способности моделей железобетонных многопустотных плит перекрытия в лабораторных условиях для последующего анализа напряженно-деформированного состояния и проектирования на этой основе полноразмерных сталефибробетонных плит перекрытия.

Постановка проблемы. Исследованием несущей способности железобетонных пустотных плит перекрытия занимались многие авторы. В статье [1] рассмотрены результаты экспериментальных исследований пустотных плит перекрытия непрерывного формования; в работе [2] обсуждаются вопросы повышения несущей способности и жесткости перекрытий, образованных многопустотными плитами; результаты исследований сопоставлены с опытом устройства перекрытий, представлены результаты испытания натурального фрагмента плоского перекрытия из двух многопустотных плит. Экспериментальными исследованиями плит перекрытия занимались и другие авторы [3-6], однако в литературе отсутствует обоснование выбора размеров испытываемых образцов и детальное сопоставление результатов испытаний моделей и натуральных образцов конструкций, что является необходимым для прогнозирования несущей способности плит серийного размера при добавлении в бетон компонентов для повышения вязкости разрушения элементов, предупреждения лавинообразного обрушения.

Результаты исследования. Разработана модельная конструкция многопустотной плиты перекрытия (рис. 1). Изготовлена серия таких плит для исследования, а также кубиковые образцы 100x100 из бетона того же замеса. Кубиковые образцы испытаны на сжатие до разрушения, что позволило установить класс бетона (С16/20) в соответствии с нормами [7]. По отношению к серийной плите, геометрические размеры модели уменьшены в два раза, но, исходя из технологических соображений, плита имеет не 6, а 5 пустот. При проектировании учтены требования действующих норм [8, 9].

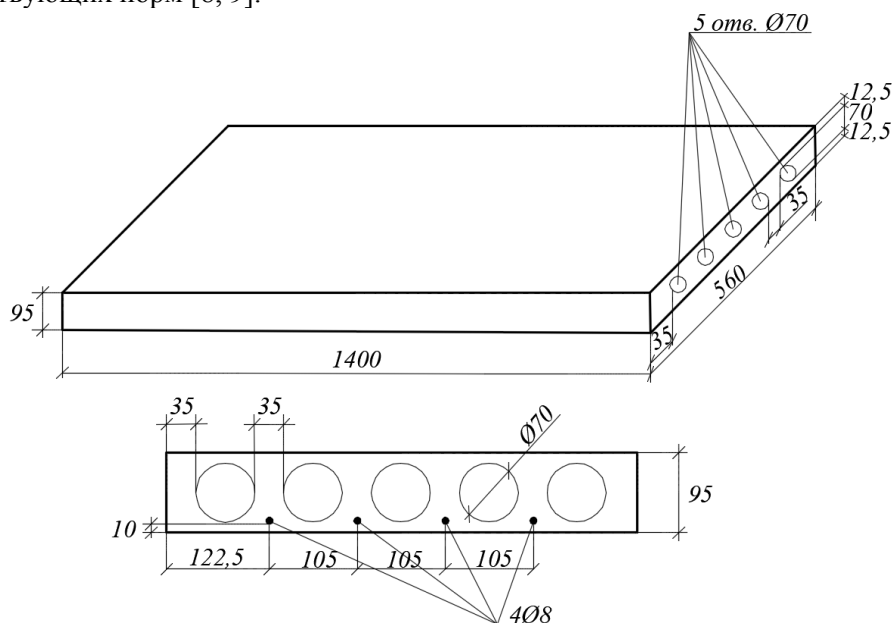


Рис. 1. Модель железобетонной многопустотной плиты перекрытия

Испытания модельных железобетонных плит перекрытия проведены на специально смонтированном стенде (рис. 2). Силовое устройство стенда состоит из плиты нагружения 2 и четырех балок составного сечения — двух верхних 3 и двух нижних 4. Пара верхних балок 3 лежит на плите нагружения 2, на нижние балки опирается модель железобетонной многопустотной плиты 1. Верхние балки связаны с нижними с помощью четырех пластинчатых стержней 5. Плита нагружения 2 опирается на четыре симметрично расположенные стойки 9 и представляет собой жесткий металлический диск прямоугольной формы. Для того, чтобы средняя пролетная часть железобетонной плиты испытывала деформацию чистого изгиба, для ее нагружения использовали двухуровневую перекрестно-балочную систему, на которую нижней плоскостью давит гидравлический домкрат 6 мощностью 100 кН. Нагрузка, прикладываемая к железобетонной плите, контролируется с помощью образцового динамометра (50 кН).

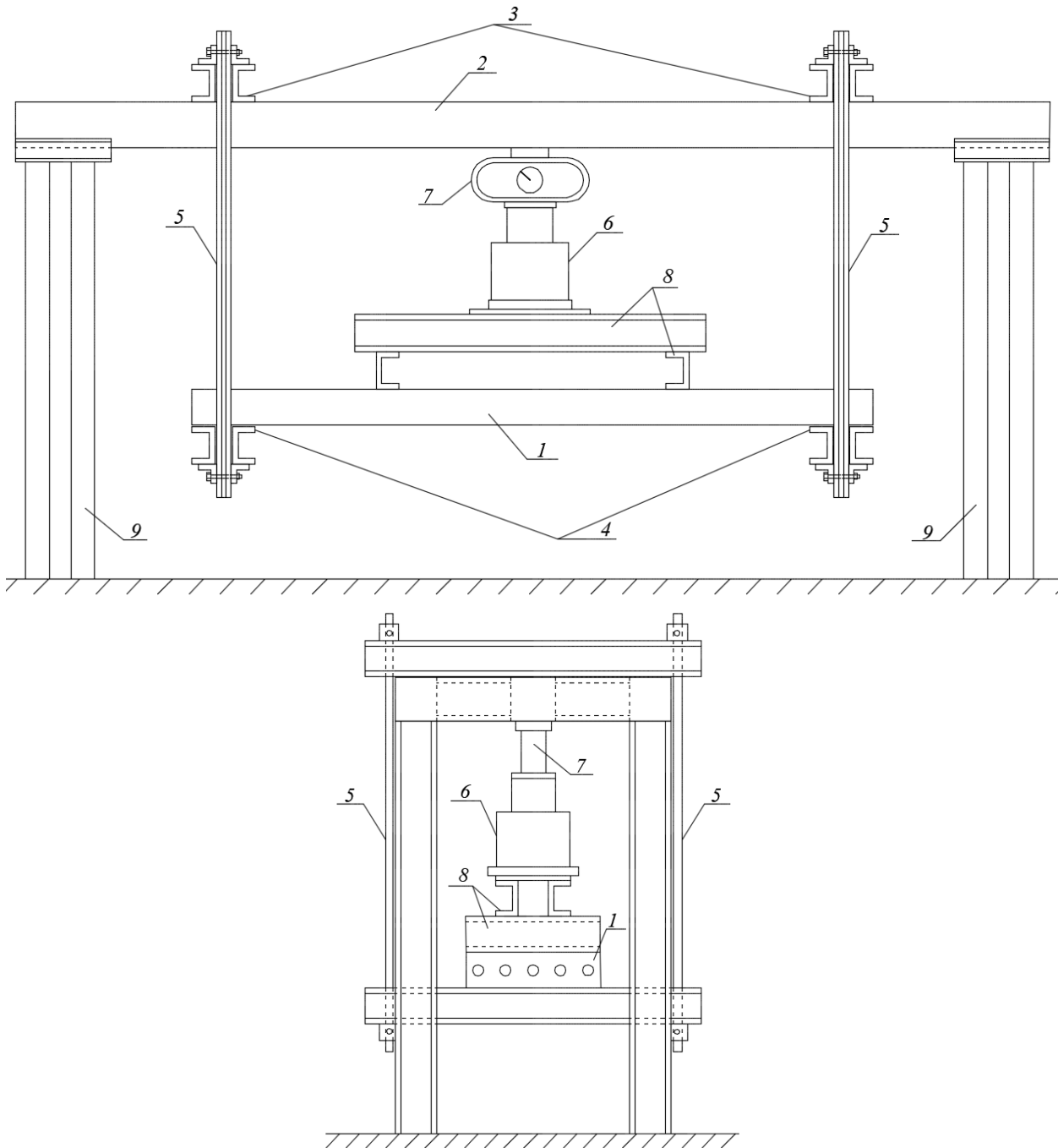


Рис.2. Испытательный стенд

1 – модель многопустотной железобетонной плиты перекрытия; 2 – плита нагружения; 3 – верхняя пара балок нагружения; 4 – нижняя пара балок нагружения; 5 – пластинчатые стержни нагружения; 6 – домкрат 100 кН; 7 – образцовый динамометр 50 кН; 8 – перекрестная система балок, передающая нагрузку на плиту; 9 – опоры.

Разработана программа испытаний, которая регламентирует рабочую схему испытаний конструкций, величины испытательных нагрузок, схемы и порядок их приложения, размещение и тип измерительных приборов, а также содержит указания по проведению испытаний[10]. Расчетная схема представляла собой однопролетную модель нагружения с шарнирными опорами по коротким сторонам плиты (рис. 3). Испытаниям были подвергнуты три плиты.

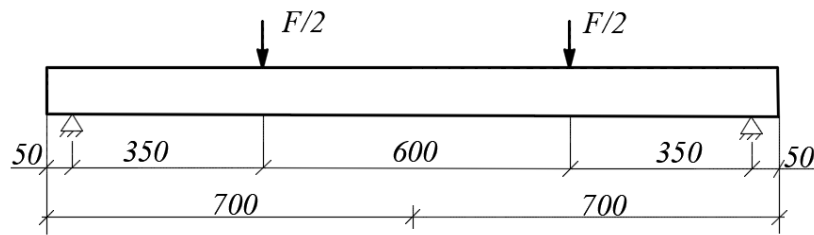


Рис. 3. Схема загрузения

Сначала было проведено пробное нагружение нагрузкой 6,04 кН, что соответствует 80 делениям на динамометре;нагружениеосуществлялось в 3 этапа. После необходимой выдержки под нагрузкой конструкция поэтапно разгружалась до нуля. Делается это для устранения обжатия узлов, опор. Далее нагрузка прикладывалась ступенями, составляющими 10% от расчетной нагрузки, то есть по 20 делений или 1,51 кН. После загрузки каждой ступени осуществлялась выдержка для затухания деформаций и производились отсчеты по приборам. После того, как была достигнута контрольная нагрузка, выполнена выдержка в течение 24 часов, так как деформации в бетоне нарастают постепенно. Измерительные приборы установлены в тех точках и сечениях, перемещения и деформации которых являются наиболее характерными для исследуемой конструкции (рис. 4). Для измерения продольных деформаций установлены индикаторы часового типа в количестве 8 штук и наклеены тензодатчики в соответствующих точках.Прогибы измерялись в середине пролета при помощи прогибомера Аистова.



Рис. 4. Расположение измерительных приборов

На седьмойступенинагружения, при нагрузке 16,6 кН, был зафиксирован момент трещинообразования 2,94кНм, одинаковый для всех трех плит. Разрушающая нагрузка составила 27,9 кН на 16 ступенинагружения при моменте 15,41кНм. Величины изгибающих моментов вычислены на основе обработки показаний тензодатчиков. Значения прогибов для серии модельных плит при этих нагрузках представлены в табл.1.

Таблица 1

Экспериментальные значения прогибов

Характеристики	Модельные плиты			
	1	2	3	Средние значения
Прогиб в начале трещинообразования, мм	1,66	1,72	1,69	1,69
Полный прогиб в конце испытаний, мм	15,2	16,1	15,8	15,7

С целью верификации результатов, полученных экспериментально, выполнено компьютерное моделирование плиты в двух программах — SOFiSTiK[11] (рис. 5) и ПК ЛИРА-САПР [12].

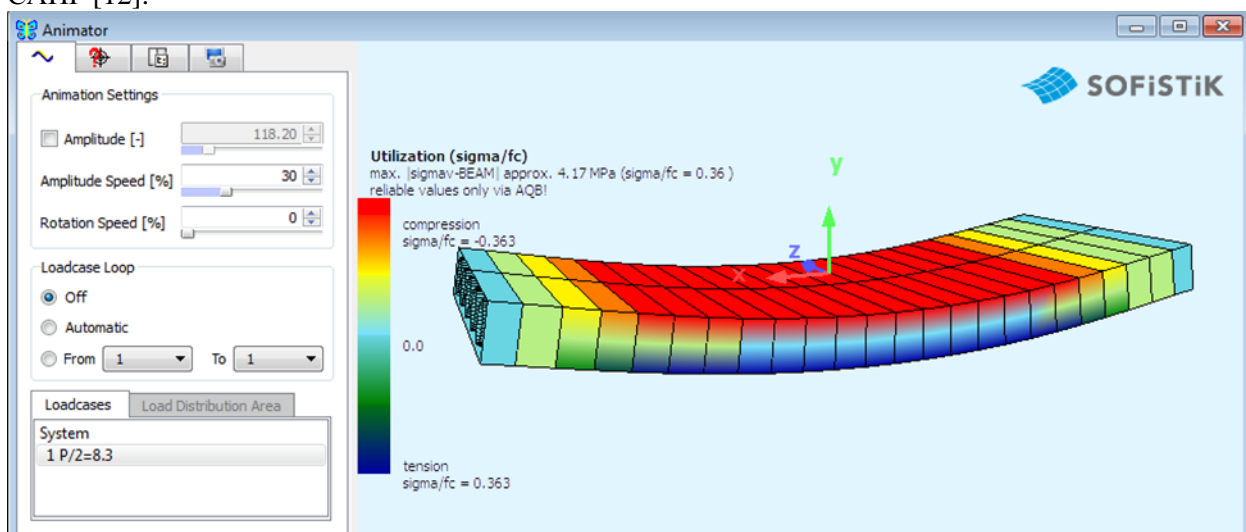


Рис. 5. Компьютерная модель плиты в SOFiSTiK

Расчеты плиты проводились при нагрузке 16,6 кН, которая в эксперименте соответствует началу трещинообразования, а также при нагрузке 27,9 кН, которая привела к разрушению образца.

Числовые значения прогибов и изгибающих моментов, полученные экспериментально и в результате компьютерного моделирования, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прогибы и изгибающие моменты

Начало трещинообразования в эксперименте								
Эксперимент			SOFiSTiK			ЛИРА-САПР		
Нагрузка кН	Момент кНм	Прогиб мм	Нагрузка кН	Момент кНм	Прогиб мм	Нагрузка кН	Момент кНм	Прогиб мм
16,6	2,94	1,69	16,6	2,9	1,59	16,6	2,9	1,58
Разрушение плиты в эксперименте								
Эксперимент			SOFiSTiK			ЛИРА-САПР		
Нагрузка кН	Момент кНм	Прогиб мм	Нагрузка кН	Момент кНм	Прогиб мм	Нагрузка кН	Момент кНм	Прогиб мм
27,9	15,41	15,7	27,9	4,89	3,02	27,9	4,89	3,05

Выводы. Анализ табл. 2 показывает, что результаты расчета методом конечных элементов в двух разных программных комплексах, использующих разные конечные элементы для аппроксимации построенных геометрических моделей плиты, практически совпадают (значения прогибов и моментов в табл. 2). Изгибающий момент от нагрузки, соответствующей началу

образования трещин в эксперименте, отличается на 1,36 % от значения, полученного в результате компьютерного расчета, а прогиб — на 5,9 %. А при фактической разрушающей нагрузке, полученной в эксперименте, изгибающий момент, превышает аналогичную величину, определенную численно, в 3, 15 раза, а прогиб — в 5,2 раза. Это свидетельствует о том, что линейная модель, заложенная при компьютерных расчетах, совершенно неприемлема после начала трещинообразования.

Процесс трещинообразования экспериментального образца плиты начался при нагрузке 16,6 кН, что составило 59 % от фактической разрушающей нагрузки.

1. Фардиев Р.Ф. Исследование несущей способности пустотных плит перекрытия при сниженной величине опирания на ригели / Р.Ф. Фардиев, А.Х. Ашрапов, А.И. Мустафин // Известия КГАСУ. – Казань, КГАСУ, 2014. – № 4 (30). – С. 72–77.

2. Босаков С.В. К повышению несущей способности и жесткости перекрытий, образованных многупустотными плитами / С.В. Босаков, А.И. Мордич, В.Н. Симбиркин // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2017. – № 4. – С. 44–49.

3. Грановский А.В. Экспериментальные исследования несущей способности плит перекрытий кессонного типа / А.В. Грановский, М.Р. Чупанов // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2015. – № 5. – С. 43–48.

4. Palmer K.D., Schultz A. Experimental investigation of the web-shear strength of deep hollow-core units, PCI Journal, 2011, vol. 56 (4), pp. 83–104.

5. Walraven J., Merckx W. The bearing capacity of hollow core slabs, Heron vol. 28, Delft, 1983.

6. X. H. Zhou, W. Chen, F. B. Wu Study on stiffness of assembled monolithic concrete hollow floor with two-way ribs, Journal of Building Structures, 2011, vol. 32, no. 9, pp. 75–83.

7. Бетони. Метод визначення міцності за контрольними зразками. ДСТУ Б.В.2.7-214:2009. – [чинний від 2009-12-22]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с. (Національний стандарт України).

8. Конструкції будинків і споруд. Вироби бетонні і залізобетонні. Загальні технічні умови.: ДСТУ Б В.2.6-2:2009. – [чинний від 2010-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 29 с. (Національний стандарт України).

9. Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6- 98:2009. – Офіц. вид. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Конструкції будинків і споруд. Державні будівельні норми України).

10. Изделия строительные бетонные и железобетонные сборные. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ДСТУ Б В.2.6-7-95 (ГОСТ 8829-94). – [Введен с 1995-11-16]. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. – IV, 30 с. – (Національний стандарт України).

11. Кухтин В.Н. Применение расчетного комплекса SOFiSTiK для расчета мостовых конструкций: учебное пособие / В.Н. Кухтин, И.В. Булаев, И.С. Баранов. — М.: МАДИ, 2015. — 136 с.

12. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2015. Учебное пособие / [Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш, Р.Ю. Водопьянов и др.]; под ред. академика РААСН А.С. Городецкого. – М., 2015. – 376 с.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2019

УДК 539.3 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.18

А. Сяський, В. Кот, В. Вороницька

Рівненський державний гуманітарний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ В ПЛАСТИНЦІ З ПІДСИЛЕНИМ КРУГОВИМ КОНТУРОМ ПРИ ЇЇ ЗГІНІ

Побудовано математичну модель задачі про підсилення замкненим пружним ребром контуру кругового отвору в нескінченній ізотропній пластинці, яка перебуває в умовах циліндричного згину на нескінченності, за наявності на межі поділу матеріалів міжфазної тріщини (розрізу), береги якої в процесі деформації не контактують. Наближений розв'язок системи сингулярних інтегрально-диференціальних рівнянь задачі здійснено методом механічних квадратур і колокації. Розглянуто числовий приклад.

Ключові слова: нескінченна пластинка, підсилювальне ребро, міжфазна тріщина, контактні моменти, сингулярні інтегральні рівняння, ядра Гільберта.

А. Сяський, В. Кот, В. Вороницкая

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕЖФАЗНОЙ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНКЕ С УСИЛЕНИЕМ КРУГОВЫМ КОНТУРОМ ПРИ ЕЕ ИЗГИБЕ

Построена математическая модель задачи об усилении замкнутым упругим ребром контура кругового отверстия в бесконечной изотропной пластинке, которая находится в условиях цилиндрического изгиба на бесконечности, при наличии на границе раздела материалов межфазной трещины (разреза), берега которой в процессе деформации не контактируют. Приближенное решение системы сингулярных интегрально-дифференциальных уравнений задачи осуществлено методом механических квадратур и коллокации. Рассмотрены числовой пример.

Ключевые слова: бесконечная пластинка, усиливающее ребро, межфазная трещина, контактные моменты, сингулярные интегральные уравнения, ядра Гильберта.

A. Siaskyi, V. Kot, V. Voronytska

THE MATHEMATICAL MODEL OF AN INTERPHASE FRACTURE IN A PLATE WITH A REINFORCED CIRCULAR PROFILE DURING ITS BENDING

Under the conditions of cylindrical bending, a mixed contact problem for an infinite isotropic plate with a circular opening, the profile of which has been reinforced by a closed elastic ring (rib) with a stable rectangular cross section, provided that at the connection border there are the materials of interphase section, the margins of which do not contact in the process of deformation, has been considered. The components of bending and torsion deformation at the profile of the plate opening are presented through integral relations with the Hilbertian kernels from the contact moments in the area where the plate and the ring are connected. The main equations, defining the stressed and deformed state of the rib have been recorded when modelling the reinforcement with an elastic line which has a bending and torsional stiffness. The problem's mathematical model has been created in form of a system of integral and differential equations for defining the contact moments between the plate and the rib, inner moments of the reinforcement and the initial parameters of a statistically indefinite rib. A structure of the values being searched at the ends of the area where the plates and the rib are connected, has been established. An approximate solution of the problem has been created using the method of mechanic quadratures and collocation, using which the influence of the type of the external bending load and the relative stiffness of the reinforcing rib on the stressed state of the plate structure, has been studied. It has been established, that all the components of the stressed state of the rib are limited.

Key words: infinite plate, reinforcing rib, interphase fracture, contact moments, singular integral equations, Hilbertian kernels.

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні, як ланки механізмів і машин, широкого застосування набули деталі у вигляді пластинки з круговим отвором, контур якого підсилено тонким пружним кільцем (замкненим пружним ребром). На етапі їх виготовлені чи в процесі експлуатації на межі поділу матеріалів пластинки і ребра можуть виникнути міжфазні тріщини (розрізи нульової ширини). Такі тріщини за дії зовнішнього згинального навантаження спричинюють появу зон високої концентрації напружень. Їх наявність може призвести до передчасного руйнування як окремої пластинчастої деталі так і всього механізму. Тому доцільно ще на стадії проектування проводити дослідження міцності і жорсткості окремих пластинчастих ланок механізмів і машин при згинальних навантаженнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За відсутності міжфазних розрізів задачі про підсилення контурів отворів у ізотропних чи анізотропних пластинках замкненими пружними ребрами достатньо опрацьовані в науковій літературі [1-3].

Розрахунку згинальних напружень в пластинках з отворами, контури яких підсилені розімкненими пружними ребрами, присвячені роботи [4-6]. Моделюючи підсилювальне ребро пружною лінією, наділеною жорсткістю на згин і кручення, математичні моделі таких задач

побудовано у вигляді систем сингулярних інтегральних рівнянь для визначення контактних моментних напружень на контурі отвору пластинки. Методом механічних квадратур і колокації [6,7] встановлено їх наближені розв'язки.

Задачі про часткове підсилення контуру кругового отвору в пластинці замкненим пружним ребром у науковій літературі розглянуті тільки для узагальненого плоского напруженого стану [7,8]. Для пластинки, що перебуває в умовах циліндричного згину такі задачі не розглядалися.

Пропонується наближений розв'язок задачі про підсилення контуру кругового отвору в нескінченній ізотропній пластинці замкненим пружним ребром за наявності на межі поділу матеріалів міжфазного розрізу за дії зовнішнього згинального навантаження на нескінченності.

Постановка задачі. Нехай контур L кругового отвору одиничного радіуса $R_0=1$ нескінченної ізотропної пластинки товщиною $2h$ підсилено тонким замкненим пружним ребром (кільцем) сталі ширини і товщини. На ділянці $L_1 = [\alpha_0, \beta_0]$ вони сполучені між собою, а на решті контуру між ними наявний наскрізний міжфазний розріз. Систему декартових (x, y) і полярних (ρ, λ) координат у спільній серединній площині пластинки і ребра з полюсом в центрі отвору оберемо так, як показано на рис. 1. На нескінченності пластинка згинається рівномірно розподіленими моментами M_1 та M_2 , що діють у напрямках координатних осей. Будемо вважати, що при такому навантаженні береги розрізу не контактують між собою.

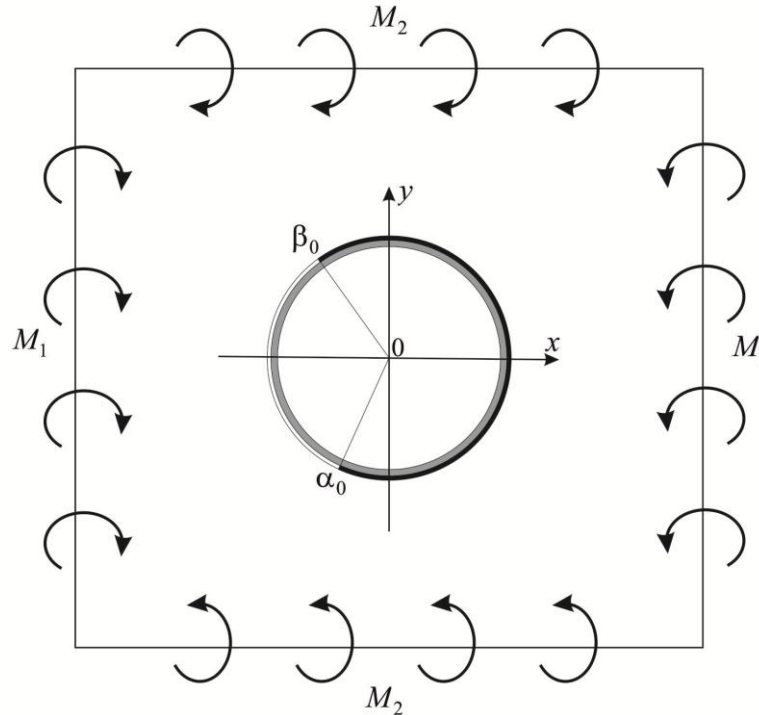


Рис. 1 Розрахункова схема пластинки

Розв'язування задачі полягає у визначенні компонент напружено-деформованого стану на контурі отвору пластинки і в замкненому ребрі.

Викладення основного матеріалу. Умовно відділимо ребро від пластинки, замінивши дію одного тіла на інше невідомими контактними моментами M_ρ і P . У результаті цього приходимо до першої граничної задачі згину для нескінченної пластинки з круговим отвором та пружного кільця.

Пружне кільце перебуває у рівновазі внаслідок дії на нього контактних моментів, прикладених з боку пластинки. Оскільки задача розрахунку напружено-деформованого стану замкненого кільця статично невизначена, умовно розріжемо його площиною $\lambda = \lambda_0$ і до кожного з торців перерізу прикладемо крутний L_λ^0 і згинальний L_ρ^0 моменти (рис.2). Внаслідок цього одержимо статично визначене розімкнене кільце, що перебуває у рівновазі під дією контактних моментів і торцевого навантаження.

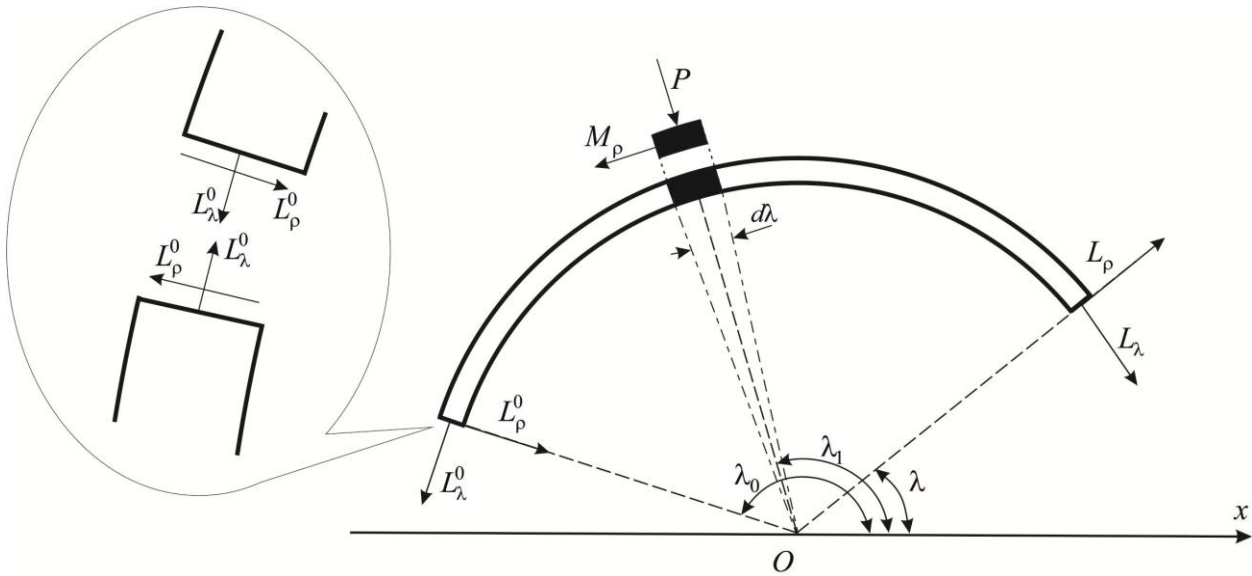


Рис. 2. Розрахункова схема частини розікненого кільця.

Напружено-деформований стан розікненого кільця (рис.2.), яке моделюється пружною лінією, наділеною жорсткостями на згин g_1 і кручення g_2 , визначають[1]:

- умови рівноваги частини кільця між перерізами $\lambda = \lambda_0$ і $\lambda = \lambda$

$$L_\rho - iL_\lambda = -i \int_{\lambda}^{\lambda_0} (M_\rho + iP) e^{i(t-\lambda)} dt + (L_\rho^0 - iL_\lambda^0) e^{i(\lambda_0-\lambda)}, \quad (1)$$

де L_ρ і L_λ - згинальний і крутний моменти в перерізі $\lambda = \lambda$;

- співвідношення Кірхгофа між внутрішніми моментами і відповідними деформаціями

$$L_\rho = -X^c g_1, L_\lambda = -Y^c g_2. \quad (2)$$

Тут X^c, Y^c - деформації кривини і кручення осі кільця, які з урахуванням (1) можна подати такими залежностями [5]

$$X^c = -\frac{1}{g_1} [f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda + L_x \cos \lambda + L_y \sin \lambda]; \quad (3)$$

$$Y^c = \frac{1}{g_2} [f_2(\lambda) \cos \lambda - f_1(\lambda) \sin \lambda + L_y \cos \lambda - L_x \sin \lambda],$$

де введено позначення

$$f_1 + if_2 = i \int_{\alpha_0}^{\lambda} (M_\rho + iP) e^{it} dt; L_x + iL_y = (L_\rho^0 - iL_\lambda^0) e^{i\lambda_0};$$

- умови рівноваги замкнутого кільця як жорсткого цілого

$$\int_{\alpha_0}^{\beta_0} (M_\rho + iP) e^{it} dt = 0,$$

які еквівалентні співвідношенням

$$f_1(\alpha_0) = f_2(\alpha_0) = f_1(\beta_0) = f_2(\beta_0) = 0. \quad (4)$$

Нескінченна пластинка перебуває у рівновазі під дією зовнішнього моментного навантаження та контактних моментів, що передаються до контуру L з боку підсилювального ребра. Відповідні цьому навантаженню деформації кривини X і кручення Y контуру L визначаються за формулами [4,5]

$$X = \frac{k}{3+\nu} \left[(1+\nu)M_\rho(\lambda) + \frac{1}{\pi_\gamma} \int_\gamma M_\rho(t) dt - \frac{1}{\pi_\gamma} \int_\gamma P(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + X_0 \right]; \quad (5)$$

$$Y = -\frac{k}{3+\nu} \left[(1+\nu)P(\lambda) + \frac{1}{\pi_\gamma} \int_\gamma P(t) dt + \frac{1}{\pi_\gamma} \int_\gamma M_\rho(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + Y_0 \right],$$

в яких введено позначення

$$X_0 = -2(M_2 - M_1) \cos 2\lambda - \frac{3+\nu}{1+\nu} (M_1 + M_2); \quad Y_0(\lambda) = 2(M_2 - M_1) \sin 2\lambda + \tilde{C}_1 [3+\nu];$$

$k = \frac{1}{D(1-\nu)}$; $D = \frac{2Eh^3}{3(1-\nu^2)}$ – циліндрична жорсткість пластинки на згин; E, ν – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластинки; \tilde{C}_1 – дійсна стала, для визначення якої слугує умова однозначності прогину пластинки [9].

Кільцеві M_λ і крутні $H_{\rho i}$ моменти на контурі L визначаються за формулами [5]

$$M_\lambda = \nu M_\rho - \frac{1+\nu}{k} X, \quad H_{\rho i} = -\frac{Y}{k}. \quad (6)$$

Крайові умови задачі формулюємо у вигляді рівності деформації на межі сполучення пластинки і підсилювального ребра

$$X^c = X; \quad Y^c = Y; \quad \lambda \in [\alpha_0, \beta_0]. \quad (7)$$

Підставляючи у них вирази (3), (5) отримуємо систему двох сингулярних інтегральних рівнянь з ядрами Гільберта для визначення контактних моментів M_ρ і P

$$f_1(\lambda) \cos \lambda + f_2(\lambda) \sin \lambda + \frac{g_1 k}{3+\nu} \left[(1+\nu)M_\rho(\lambda) + \frac{1}{\pi_{\alpha_0}} \int_{\alpha_0}^{\beta_0} M_\rho(t) dt - \frac{1}{\pi_{\alpha_0}} \int_{\alpha_0}^{\beta_0} P(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + X_0 \right] + L_x \cos \lambda + L_y \sin \lambda = 0; \quad (8)$$

$$f_2(\lambda) \cos \lambda - f_1(\lambda) \sin \lambda + \frac{g_2 k}{3+\nu} \left[(1+\nu)P(\lambda) + \frac{1}{\pi_{\alpha_0}} \int_{\alpha_0}^{\beta_0} P(t) dt + \frac{1}{\pi_{\alpha_0}} \int_{\alpha_0}^{\beta_0} M_\rho(t) \operatorname{ctg} \frac{\lambda-t}{2} dt + Y_0 \right] + L_y \cos \lambda - L_x \sin \lambda = 0.$$

Цю систему доповнюємо умовами зв'язку між функціями $M_\rho(\lambda)$, $P(\lambda)$ та $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$

$$f_1'(\lambda) = -M_\rho(\lambda) \sin \lambda - P(\lambda) \cos \lambda; \quad f_2'(\lambda) = M_\rho(\lambda) \cos \lambda - P(\lambda) \sin \lambda, \quad (9)$$

умовою однозначності прогину пластинки [9]

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_0}^{\beta_0} P(t) dt + \tilde{C}_1 = 0, \quad (10)$$

та умовою однозначності кутів повороту поперечних перерізів ребра [1]

$$\oint_L \left(\frac{L_\lambda}{g_2} - i \frac{L_\rho}{g_1} \right) e^{i\lambda} d\lambda = 0, \quad (11)$$

яку з урахуванням (1), (3) можна перетворити до вигляду

$$\int_{\alpha_0}^{\beta_0} [-f_1(t)I_1(t) + f_2(t)I_2(t)] dt - L_x \int_{-\pi}^{\pi} I_1(t) dt + L_y \int_{-\pi}^{\pi} I_2(t) dt = 0;$$

(12)

$$\int_{\alpha_0}^{\beta_0} [f_1(t)I_3(t) - f_2(t)I_4(t)]dt + L_x \int_{-\pi}^{\pi} I_3(t)dt - L_y \int_{-\pi}^{\pi} I_4(t)dt = 0.$$

Тут

$$I_1(\lambda) = \left(\frac{g_2}{g_1} - 1 \right) \cos \lambda \sin \lambda; \quad I_2(\lambda) = - \left(\frac{g_2}{g_1} \sin^2 \lambda + \cos^2 \lambda \right);$$

$$I_3(\lambda) = \frac{g_2}{g_1} \cos^2 \lambda + \sin^2 \lambda; \quad I_4(\lambda) = \left(1 - \frac{g_2}{g_1} \right) \cos \lambda \sin \lambda.$$

Співвідношення (8)-(12) визначають математичну модель поставленої задачі і слугують для визначення функцій $M_\rho(\lambda)$, $P(\lambda)$, $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$ та сталих L_λ^0 , L_ρ^0 , \tilde{C}_1 . Якщо ці величини стануть відомі, то кільцеві M_λ і крутні $H_{\rho\lambda}$ моменти на контурі отвору пластинки визначаються за формулами (6), а згинальні L_ρ і крутні L_λ моменти в ребрі – зі співвідношень (1).

Результати числового розрахунку. Точний розв’язок системи (8)-(12) знайти не вдається. Для її наближеного розв’язання необхідно встановити структуру шуканих функцій на кінцях ділянки сполучення пластинки і ребра.

Відповідно до (4) функції $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$ на ділянці $\lambda \in [\alpha_0, \beta_0]$ обмежені і неперервні, а на її кінцях дорівнюють нулю. Структуру контактних моментів визначає характеристична частина системи (8). В роботі [10] показано, що в задачах часткового підсилення контурів криволінійних отворів в пластинках, які перебувають в умовах циліндричного згину, контактні моменти мають кореневу особливість, на яку накладається локальна осциляція.

Нехтуючи впливом осциляції, наближений розв’язок задачі можна побудувати методом механічних квадратур і колокації [5,6,7].

Результати числового розрахунку моментних напружень на межі поділу матеріалів пластинки і ребра при $M_2 \neq 0$, $M_1 = 0$ наведені на рис. 3 - 5. Всі розрахунки проведені при $h_0/h = 4/3$, $b_0/R_0 = 1/5$, $b_0/h_0 = 1/2$, $\alpha_0 = -120^\circ$, $\beta_0 = 120^\circ$. Суцільні лінії побудовані для випадку $-\frac{E_1}{E} = 1$, пунктирні $-\frac{E_1}{E} = 5$, штрихпунктирні $-\frac{E_1}{E} = 10$, штрихові $-\frac{E_1}{E} = 20$ (E_1 - модуль Юнга матеріалу ребра).

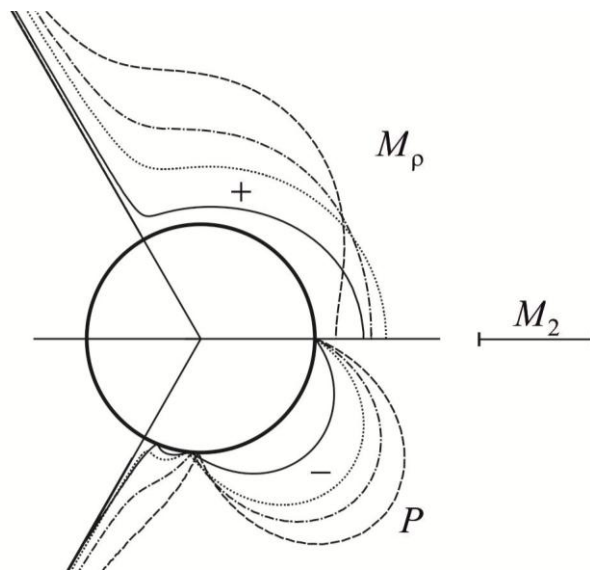


Рис. 3. Розподіл контактних моментів на контурі отвору пластинки

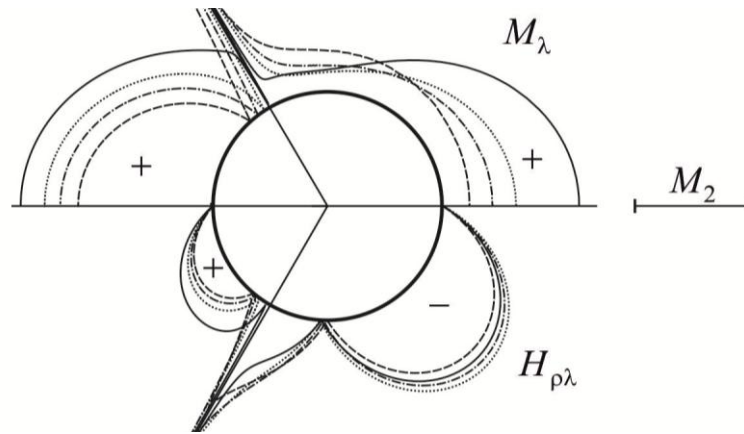


Рис. 4. Розподіл кільцевих і крутних моментів на контурі отвору пластинки

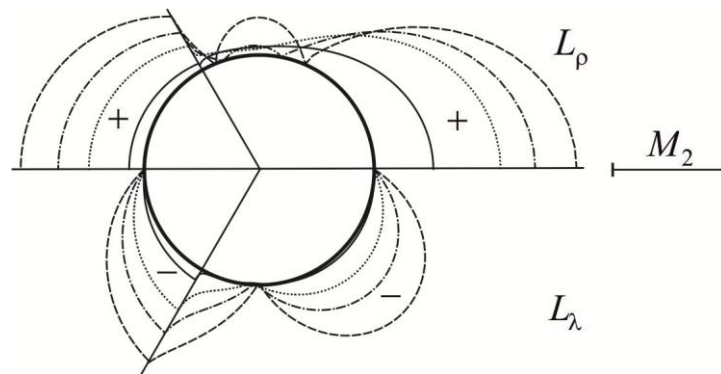


Рис. 5. Розподіл згинальних і крутних моментів у підсилювальному ребрі

Висновки. У результаті проведених числових розрахунків встановлено:

- збільшення відносної жорсткості замкненого ребра призводить до збільшення згинального L_ρ і крутного L_λ моментів. Така ж залежність спостерігається і для контактних моментів на контурі отвору;
- кільцеві моменти при збільшенні відносної жорсткості ребра зменшуються;
- крутні моменти в пластинці практично не залежать від відносної жорсткості ребра;
- в околі торців розрізу всі моменти в пластинці набувають необмежених значень, а в ребрі залишаються обмеженими.

Список використаних джерел:

1. Савин Г. Н. Пластинки и оболочки с ребрами жесткости / Г. Н. Савин, Н. П. Флейшман. – К.: Наук. думка, 1964. – 384 с.
2. Шереметьев, М.П. Пластинки с подкрепленным краем/ М.П. Шереметьев. – Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1960. – 258 с.
3. Пелех Б. Л. Концентрация напряжений возле отверстий в анизотропных оболочках, податливых на сдвиг/ Б.Л. Пелех, А.А. Сяський. – К.: Наукова думка, 1975. – 198 с.
4. Сяський А. Основні інтегральні співвідношення в технічній теорії згину пластин з отворами/ А. Сяський, С. Гаврюсев // Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2006. – Т. 11, №1. – С.12–17.
5. Сяський А. А. Упругое равновесие пластинки с частично подкрепленным криволинейным отверстием/ А. А. Сяський // Прикл. математика и механика. – 1986. Т. 50, №2. – С. 247– 254.
6. Сяський А. Напружений стан пластинки з частково підсиленим криволінійним контуром при її циліндричному згині /А. Сяський, В. Кот // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Т.16, №2. – с.30–36.

7. Сяський А.О. Міжфазний розріз в ортотропній пластинці з підсиленням круговим контуром / А.О. Сяський, Н.В. Шевцова, О.Ю. Дейнека // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 5. – С. 176–181.

8. Сяський А. Міжфазна тріщина в нескінченній ізотропній пластинці з підкріпленням круговим отвором/ А. Сяський, Н. Шевцова, Ю. Дейнека // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : збірник наукових праць. Технічні науки. – Рівне, 2017. – Вип. 4 (80). – С. 168–177.

9. Бережницький Л. Т. Изгиб тонких пластин с дефектами типа трещин / Л. Т. Бережницький М.В. Делявский В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1979. – 400с.

10. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мухелишвили. – М. : Наука, 1966. – 708 с.

Рецензенти:

Гаврилюк Володимир Іванович, доцент кафедри інформаційних систем та обчислювальних методів Міжнародного економіко-гуманітарного університету імені академіка Степана Дем'янука, кандидат технічних наук.

Шинкарчук Назар Володимирович, доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та методики викладання інформатики Рівненського державного гуманітарного університету, кандидат технічних наук, доцент.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2019

УДК 331.45:377 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.19

В.І. Федорчук-Мороз, О.О. Вісин

Луцький національний технічний університет

ФОРМУВАННЯ КУЛЬТУРИ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ У ПРОФЕСІЙНІЙ ОСВІТІ

В роботі увага приділена формуванню культури безпеки праці на основі ризик-орієнтованого підходу у професійній освіті. Розглянуто професійні компетентності кваліфікованого робітника, який працюватиме у потенційно небезпечних галузях господарювання. Показано необхідність викладання безпекових дисциплін у закладах професійної освіти.

Ключові слова: культура безпеки праці, ризик-орієнтований підхід, професійна компетентність, безпекові дисципліни, професійна освіта.

В.И. Федорчук-Мороз, Е.А. Висын

Луцкий национальный технический университет

ФОРМИРОВАНИЕ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ

В работе внимание уделено формированию культуры безопасности труда на основе риск-ориентированного подхода в профессиональном образовании. Рассмотрены профессиональные компетентности квалифицированного рабочего, который будет работать в потенциально опасных отраслях хозяйствования. Показана необходимость преподавания безопасности дисциплин в учреждениях профессионального образования.

Ключевые слова: культура безопасности труда, риск-ориентированный подход, профессиональная компетентность, вопросы безопасности дисциплины, профессиональное образование.

V. Fedorchuk-Moroz, E. Visyn

Lutsk National Technical University

SHAPING SAFETY CULTURE IN PROFESSIONAL EDUCATION

The work focuses on the formation of a culture of occupational safety based on a risk-oriented approach in vocational education. The professional competences of a skilled worker who will work in potentially dangerous industries are considered. The necessity of teaching safe disciplines in vocational education institutions is shown.

Keywords: occupational safety culture, risk-oriented approach, professional competence, safety disciplines, professional education.

Постановка проблеми. Ситуація у сфері безпеки, що складається під впливом складного динамічного процесу, в основі якого лежать глобалізація, науково-технічний прогрес, інформатизація, посилення антропогенного навантаження на навколишнє середовище, супроводжується виникненням нових ризиків та загроз для людей. Тому питання безпеки життя та здоров'я людини розглядається як пріоритетне у контексті забезпечення сталого розвитку держави та суспільства в цілому. Так, концепцією сталого розвитку, прийнятою в 90-ті роки минулого століття, дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей в усіх сферах життєдіяльності людства (матеріально-виробничої, побутової, соціально-політичної, культурної та духовної), визнані пріоритетними у діяльності світової спільноти в умовах глобалізації [1].

Постійні зміни в економічному та суспільно-політичному житті висувають нові вимоги до підготовки сучасного робітника та зумовлюють потребу у формуванні в нього культури безпеки професійної діяльності і, зокрема, культури безпеки праці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підготовки молоді до безпечної життєдіяльності та розробки основ формування в неї культури безпеки певною мірою розглядало багато вчених-педагогів, серед яких С. Абрамова, В. Акімов, А. Алексюк, С. Батіщев, В. Бегун, Ю. Воробйов, В. Гафнер, В. Гінецинський, О. Запорожець, І. Зязюн, Ю. Іванов, О. Ляшенко, В. Мельник, В. Михайлюк, О. Михайлов, Н. Ничкало, І. Немкова, І. Підласій, А. Русаловський, Л. Сорокіна, О. Шароватова, Л. Шершнев, С. Якушева та ін.

На думку Н. Кулалаєвої, знання кожної людини, які необхідні сьогодні для забезпечення безпеки, повинні базуватися на чітких уявленнях про процеси, що відбуваються у складних системах, і містять велику кількість природних, соціальних, техногенних компонентів. Крім того, важливо ще й усвідомлення нею особистої відповідальності за результати своєї діяльності, оскільки від ціннісних настанов людей, мотивів поведінки, особистісних і професійних якостей та здібностей залежить їхня безпечна життєдіяльність, зниження індивідуальних, соціальних і глобальних ризиків. Уважаючи культуру безпеки відповідним станом розвитку особи, слід ураховувати, що він формується протягом усього її існування, в якому певний період займає

професійна підготовка в умовах навчальних закладів. Останнє оминати неможливо, оскільки саме тоді вихованці опанують технології прийняття оптимальних рішень, умінням адаптуватися до різних змін, прогнозувати перебіг розвитку ситуацій, що виникають під час діяльності, попереджувати негативні наслідки небезпечних подій [2]. На цьому етапі професійна освіта вирішує питання формування у молоді культури безпеки праці, тому актуальність статті очевидна.

Формулювання цілей статті. Метою даної статті є дослідження сучасного стану формування культури безпеки праці у професійній освіті. Адже основним завданням, що вирішується на цьому рівні поряд із формуванням професіоналізму, є інтеграція загальнокультурної і професійної складових компетентності майбутнього робітника з основним розумінням необхідності безпеки праці, безпечного поведіння в соціумі й екологічної культури.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно закону України «Про професійну (професійно-технічну) освіту» професійна (професійно-технічна) освіта є складовою системи освіти України. Професійна (професійно-технічна) освіта є комплексом педагогічних та організаційно-управлінських заходів, спрямованих на забезпечення оволодіння громадянами знаннями, уміннями і навичками в обраній ними галузі професійної діяльності, розвиток компетентності та професіоналізму, виховання загальної і професійної культури. Професійна (професійно-технічна) освіта здобувається у закладах професійної (професійно-технічної) освіти [3].

Професійна (професійно-технічна) освіта забезпечує здобуття громадянами професії відповідно до їх покликань, інтересів, здібностей, а також допрофесійну підготовку, перепідготовку, підвищення їх кваліфікації.

Тривалий час у науковому обігу поняття «професійна освіта» ототожнювалось із поняттям «професійно-технічна освіта». Так, Г. Гребенюк під професійною освітою розуміє забезпечення набуття громадянами робітничої професії згідно з їх бажаннями, інтересами, здібностями, підвищення їх виробничої кваліфікації, перепідготовку. Змістом професійної освіти, на думку, Р. Гуревича, є система знань, умінь, навичок, рис творчої діяльності світоглядних і поведінкових якостей особистості, які зумовлені вимогами суспільства до робітників відповідної кваліфікації та профілю; на досягнення їх повинні спрямовуватися зусилля як педагогів, так і учнів у навчальних закладах, що забезпечують здобуття професійної освіти відповідного рівня. Професійна освіта базується на загальній освіті та забезпечує підготовку робітників вищої і середньої кваліфікації, робітничих кадрів; здійснюється у вищих та середніх спеціальних навчальних закладах, професійно-технічних училищах, на професійних курсах, шляхом навчання на виробництві [4].

Зміна виробничих технологій, перехід до інформаційного суспільства ставлять перед професійно-технічною освітою України складні завдання, які безпосередньо пов'язані із забезпеченням високої якості професійної підготовки, професійної мобільності та професійної компетентності випускників професійно-технічних навчальних закладів на ринку праці.

Компетентнісний підхід орієнтується на професійну компетентність як якість особистості майбутнього фахівця, що характеризує рівень його інтеграції у середовище професійної діяльності, як і у різні соціальні середовища, входження у які виявляє необхідність виконувати різні соціальні ролі. Інтегративний підхід забезпечує реалізацію в навчально-виховному процесі принципу інтегральності знань. Інтеграція може бути розглянута як механізм, що забезпечує приведення у відповідність індивідуального рівня мислення і рівня розвитку сукупної свідомості людства. Сутність принципу інтеграції полягає у розумінні умовності диференціації знання на окремі освітні галузі, прагнення до створення синтетичних, інтегрованих систем знань, що дають суб'єктам освітнього процесу уявлення про цілісну картину світу. Цей підхід реалізує принцип взаємодоповнюваності природничо-наукової методичної традиції й гуманітарних способів пізнання, що дозволяє реалізувати інтеграцію – спосіб і процес формування багатовимірної картини світу, заснованої на сполученні різних способів і форм осягнення дійсності.

Компетентний робітник – це такий фахівець, який оволодів ґрунтовними знання в певній робітничій спеціальності, уміє виконувати конкретні види діяльності в межах своєї професії, повинен бути готовим до виготовлення виробів, технологія яких вимагає творчого підходу, а також має самостійно обрати оптимальний варіант їх виготовлення.

Розглядаючи поняття професійної компетентності учнів закладів професійної (професійно-технічної) освіти, виділяють також наступні її види:

– спеціальну (або діяльнісну) компетентність (характеризує оволодіння певною діяльністю на високому професіональному рівні та включає у себе не тільки наявність спеціальних знань, але і вміння застосування їх на практиці);

- соціальну компетентність (володіння способами спільної діяльності та співробітництва, прийнятими прийомами професійного спілкування);
- особистісну компетентність (оволодіння способами самовираження та саморозвитку, здатність планувати робітникові власну професійну діяльність, самостійно приймати рішення, бачити назрілу проблему);
- індивідуальну компетентність (володіння прийомами саморегуляції, готовність до професійного зросту, наявність стійкої професійної мотивації тощо) [5].

Аналізуючи дефініцію «культура безпеки праці» необхідно визначити зміст загального поняття «культура безпеки». Згідно з нормативною функцією культуру розглядають з позиції образу життя або ідеалів та цінностей – культура є способом життя або сукупністю стандартизованих вірувань і практик, яким слідує суспільство (К. Уіслер). Подібну точку зору висловлюють і вітчизняні науковці, на їхню думку, культура – це сукупність цінностей, норм та ідеалів, що виконують як конструктивну, так і передусім регулятивну роль у тому чи іншому конкретному суспільстві. Деякі науковці уособлюють поняття «культура» з процесом адаптації до середовища або процесом навчання та формування звичок – культура є поведінкою, що має засвоюватися кожним новим поколінням шляхом навчання (Р. Бенедикт). Відповідно до структурної організації – культура складається з соціально стандартизованої поведінки та мислення деякої групи людей і матеріальних продуктів її діяльності (Дж. Хонігман). Така позиція спостерігається і в концепціях К. Клакхона, А. Кребера. та Л. Уайта, які вважали, що культура має внутрішні складові, котрі проявляються зовні у вигляді норм, що визначають моделі людської поведінки. До того ж, вона виникає у результаті діяльності людей, втілюючись у матеріальних засобах, а її ядро складають традиційні ідеї, що склалися історично, зокрема ті, що мають особливу цінність. Таким чином, з одного боку, вона є результатом діяльності людей, а з іншого – її регулятором.

Стосовно поняття «безпека» ми погоджуємося з визначенням, що це стан повного фізичного, соціального і духовного благополуччя, що визначається внутрішніми (спадковість, фізичне і психічне здоров'я) і зовнішніми (навколишнє природне, антропогенне, техногенне, соціальне середовище) факторами. Об'єднання понять «культура» та «безпека» вперше було здійснено Міжнародним агентством з атомної енергії у 1986 р. у процесі аналізу причин і наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. Визнано, що відсутність культури безпеки з'явилася однією з її основних причин цієї трагедії [6].

На нашу думку, культура безпеки праці залишається недостатньою. Хоча, прищеплення елементів культури безпеки та виховання особистості безпечного типу, здатної до активної комунікації в ході загального виживання, є однією з невід'ємних умов існування людства. Підтвердженням цього може стати сучасна статистика небезпечних подій, що відбулися в державі у виробничій сфері.

Згідно статистики виробничого травматизму, яка наведена на офіційному сайті Держпраці України, за 9 місяців 2019 року, зареєстровано 2948 нещасних випадків, в тому числі 319 – зі смертельним наслідком. Порівнюючи з аналогічним періодом 2018 року, слід зауважити, що загальна кількість виробничого травматизму зменшилася на 87, а кількість нещасних випадків зі смертельним наслідком зросла на 37 випадків. Однозначно, що покращити стан культури безпеки праці майбутніх робітників можна тільки за використання всього інструментарію освітянського впливу – їх якісного педагогічного та психологічного супроводження увесь час безперервної освіти, переформатування взаємовідносин викладачів і тих, кого вони навчають, до рівня колег, їхньої правової, екологічної, інформаційної, економічної, комп'ютерної та інших видів підготовки.

Науковий аналіз чинників, що впливають на безпеку кожної окремої людини та всього суспільства, складає основу і теоретичні засади курсу безпекових дисциплін у навчальних закладах України, без яких не може бути практичних умінь та адекватних дій у певній ситуації. Нехтування правилами безпеки під час трудової діяльності, незнання основних принципів ергономіки завжди призводить до вкрай важких наслідків. До недавнього часу завдання з формування безпекової компетентності молоді покладалось на дисципліни циклу безпеки в освітніх закладах різних рівнів. Протягом багатьох років реалізовувався принцип безперервного навчання дисциплін цього циклу. Проте, на сьогодні ситуація кардинально змінилася в гіршу сторону [7].

Аналізуючи негативну ситуації щодо скорочення безпекових дисциплін, потрібно відмітити, що вселяє певну надію на її покращення розроблена науковцями «Концепція освіти з безпеки» [8]. Нова концепція передбачає оновлення освіти з безпеки на основі ризиків орієнтованого підходу. У

Концепції зазначено, що її метою є впровадження сучасних форм, методів та змісту навчання з безпеки, які відповідають вимогам сучасного суспільства у сфері управління безпекою на основі нового закону про освіту та принципів запобігання ризиків. Концепція передбачає, що зміст навчальних програм має бути стандартизований за галузевими напрямками. У стандартах освіти повинні зазначатись усі компетенції з безпеки, яких має набути студент за час навчання в університеті. Стандарти освіти повинні бути погоджені з роботодавцями.

Напрями змін освіти в Україні в цілому збігаються із завданнями, сформульованими в Стратегії освіти для сталого розвитку Європейської економічної комісії ООН (2005 р.), однак, не всі. Науковці визначили, що в якості інструментарію реалізації освіти для сталого розвитку потрібно застосовувати ризик-орієнтований підхід, причому, в усіх фахових напрямках. Відомі праці В. Бегуна, О. Запорожця, В. Березуцького, С. Диканя, В. Зацарного, В. Литвиненка, В. Лук'янової, В. Михайлюка, І. Науменка, М. Назаренка, Б. Халмурадова та ін., в яких обґрунтовано використання ризик-орієнтованого підходу для розв'язання прикладних завдань.

У Європейському Союзі ризик-орієнтований підхід закріплено ст. 2, 3 Європейської соціальної хартії (переглянутої), а також так званою «рамковою» Директивою № 89/391/ЄЕС Ради щодо встановлення заходів із заохочення поліпшення охорони здоров'я та безпеки праці працівників (далі – Директива № 89/391/ЄЕС).

Метою цієї директиви є впровадження заходів, що сприяють поліпшенню у сфері безпеки та гігієни праці, тобто заходів превентивного характеру. Для цього вона містить загальні принципи, що стосуються запобігання професійним ризикам (на мові оригіналу – occupational risk), охорони безпеки та здоров'я, виключення факторів ризику та нещасних випадків, інформування, консультування та пропорційної участі відповідно до національних законів та/або практики, навчання працівників та їх представників, а також вказівки з імплементації цих принципів.

Незважаючи на відсутність у Директиві № 89/391/ЄЕС визначень правових дефініцій «ризик» та «професійний ризик», вона постійно ними оперує та визначає основні положення інших 19 окремих директив, що стосуються вимог охорони праці для робочого місця, під час використання устаткування, роботи з хімічними, фізичними та біологічними речовинами, а також захисту на робочому місці певних груп працівників.

Національним законодавством країн-членів ЄС положення Директиви № 89/391/ЄЕС врегульовано на рівні трудових кодексів (у частині забезпечення безпеки та гігієни праці) та/або спеціальних законів. При цьому переважно використовується правова дефініція «професійний ризик», що пояснюється насамперед самою структурою цих законодавств. Справа в тому, що сфера звичної нам охорони праці в Євросоюзі, як правило, регулюється двома нормативно-правовими актами: перший стосується безпеки саме працівника під час роботи, другий – безпечної експлуатації робочого устаткування. Звідси й дефініція, зорієнтована саме на працівника, тобто на його безпеку під час виконання професійних обов'язків.

Привели своє законодавство у відповідність до зазначених директив і країни-кандидати на вступ до Євросоюзу (Ісландія, Македонія, Сербія, Чорногорія). Швейцарія та Норвегія, які не планують свого членства в ЄС, проте тісно з ним інтегровані, успішно використовують ризик-орієнтований підхід у всіх сферах державного управління.

Інші країни світу також визнають ефективність систем управління охороною праці з урахуванням ризик-орієнтованого підходу. Зокрема, Японія та Канада врахували питання оцінювання та управління ризиками для життя та здоров'я працівників під час трудових відносин у своїх спеціальних законах, зважаючи на національні особливості здійснення господарської діяльності.

Слід зауважити, що впровадження ризик-орієнтованого підходу в національне законодавство про охорону праці хоча й позначиться насамперед на рівні підприємств, проте не омине й такі важливі складові державного управління охороною праці, як проведення навчання з питань охорони праці, забезпечення засобами індивідуального захисту, здійснення державного нагляду (контролю), надання пільг та компенсацій за шкідливі та небезпечні умови праці тощо [9].

Повсюдне поширення ризик-орієнтованого підходу у потенційно небезпечних галузях виробництва відбувається не дуже активно. Зрозуміло, що вагомою причиною цього є низька обізнаність кваліфікованих робітників галузі в питаннях ризик-орієнтованого підходу, оскільки до них під час навчання у професійно-технічних навчальних закладах не доводяться основні засади культури безпеки праці, де ризик-орієнтований підхід використовується в якості базового інструментарію [10].

Висновки. Формування у майбутніх кваліфікованих працівників, які працюватимуть у потенційно небезпечних галузях господарювання, належного рівня культури праці на основі ризик-орієнтованого підходу під час їх навчання у закладах професійної освіти є вкрай важливим. Воно має стати невід'ємною складовою навчання молоді для реалізації вимог сталого розвитку суспільства, охорони довкілля, своєчасного запровадження адекватних дій при виникненні небезпечних подій та надзвичайних ситуацій. Відсутність чи недостатня кількість годин при викладанні безпекових дисциплін може стати прямою загрозою для національної безпеки України, оскільки рівень безпеки суспільства значною мірою залежить від якості викладання зазначених спеціальних дисциплін. Тому, на нашу думку, під час підготовки фахівців з рівнем компетентності, потрібним для обслуговування високотехнологічних виробництв, є наявність культури безпеки праці, яку необхідно формувати під час професійного навчання.

Література

1. Проблеми впровадження культури безпеки в Україні. Аналітична доповідь // Національний інститут стратегічних досліджень. – Режим доступу: http://old2.niss.gov.ua/content/articles/files/kultura_bezp-1bcf6.pdf.
2. [Кулалаєва Н.В.](#) Формування культури безпеки в сучасній професійній освіті / Н.В. Кулалаєва // [Збірник наукових праць \[Херсонського державного університету\]. Педагогічні науки](#). – 2013. – Вип. 64. – С. 274-278. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znppn_2013_64_59.
3. Закон України «Про професійну (професійно-технічну) освіту» – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/103/98-%D0%B2%D1%80>.
4. [Сисоєва С.О.](#) Дослідження проблем неперервної професійної освіти: генезис понять / С.О. Сисоєва, І.В. Соколова // [Педагогічний дискурс](#). – 2011. – Вип. 9. – С. 303-309. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/peddysk_2011_9_72.
5. Особливості формування професійної компетентності майбутніх кваліфікованих робітників. Методичні рекомендації Львівського науково-практичного центру професійно-технічної освіти НАПН України – Режим доступу: <http://lib.iitta.gov.ua/4829/1/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BA%D0%B0.pdf>.
6. [Кулалаєва Н.В.](#) Категоріально-понятійний аналіз дефініції «культура безпеки професійної діяльності майбутніх кваліфікованих робітників будівельного профілю» / Н.В. Кулалаєва // *Young Scientist*. – 2017. – № 9.1 (49.1). – С.105-110.
7. [Поведа Т.П.](#) Окремі тенденції щодо вивчення дисциплін безпекового циклу в умовах автономії вищих навчальних закладів України / Т.П. Поведа // [Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія : Педагогічна](#). – 2017. – Вип. 23. – С. 104-107. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znppk_ped_2017_23_34.
8. Кудін В.О. Концепція освіти з безпеки / В.О. Кудін, В.В. Бегун, В.Ф. Гречанінов, О.П. Яцюк // Теорія і практика управління соціальними системами: філософія, психологія, педагогіка, соціологія : щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХП», 2015. – № 3. – С. 33-44.
9. Ризик-орієнтований підхід в Україні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ohoronapraci.kiev.ua/rizik-orientovaniy-pidhid/>.
10. [Кулалаєва Н.В.](#) Володіння викладачами професійно-технічних навчальних закладів ризик-орієнтованим підходом – вимога освіти для сталого розвитку – Режим доступу: <https://jrnl.ivet.edu.ua/index.php> > issue.

Стаття надійшла до редакції 06.12.2019

УДК: 548.5 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.20

Т.В. Фурс*Луцький національний технічний університет***ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОДЕРЖАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ PbI₂**

У роботі проведено дослідження технологічних умов одержання монокристалів PbI₂ різними способами: з водної і паро-газової фаз та розплаву. Проаналізовано переваги, недоліки і особливості кожного способу з врахуванням морфології і якості одержаних монокристалів.

Ключові слова: дийодид свинцю, монокристал, вирощування.

Т.В. Фурс*Луцкий национальный технический университет***ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ PbI₂**

В работе проведено исследование технологических условий получения монокристаллов PbI₂ различными способами: с водной и паро-газовой фаз и расплава. Проанализированы преимущества, недостатки и особенности каждого способа с учетом морфологии и качества полученных монокристаллов.

Ключевые слова: дийодид свинца, монокристалл, выращивание.

T.V. Furs*Lutsk National Technical University***TECHNOLOGICAL FEATURES OF PRODUCING PbI₂ SINGLE CRYSTALS**

The study of technological conditions for the production of PbI₂ single crystals in various ways: from the aqueous and vapor-gas phases and the melt. The advantages, disadvantages and features of each method are analyzed taking into account the morphology and quality of the obtained single crystals.

Key words: lead diiodide, single crystal, growing.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку науки і технологій тісно пов'язаний з одержанням і застосуванням напівпровідникових монокристалів з особливою структурою і заданими властивостями, відмінними від полікристалів. Оскільки границі між зернами полікристалів сильно погіршують електричні властивості напівпровідників, більшість напівпровідникових приладів виготовляється із монокристалів, вирощених за допомогою спеціальних технологій. До таких технологій належать, наприклад, метод Чохральського, метод Бріджмена (розплавні методи), вирощування кристалів з розчинів і паро-газової фази.

Чільне місце серед напівпровідникових матеріалів посідає дийодид свинцю (PbI₂), не поступаючись за властивостями і собівартістю одержання. Однак слід врахувати, що структурна однорідність, дефектність, ступінь чистоти, форма і розміри монокристалів визначаються способом і технологічними умовами одержання, якими можна керувати і змінювати, досягаючи потрібних результатів. Варто зауважити, що і властивості PbI₂ визначаються способом кристалізації, тобто технологічними умовами одержання, а також якістю вихідної сировини (вихідних матеріалів). Саме різноманітність механізмів і способів кристалізації зумовлює складнощі одержання матеріалу із наперед заданими властивостями. Тому питання технологічних особливостей одержання монокристалів PbI₂ різними способами потребує вивчення та аналізу і є актуальним в напрямку практичного їх застосування в якості робочих елементів приладів твердотільної електроніки.

Аналіз досліджень і публікацій. Одержання монокристалів – це поєднання фізико-хімічних процесів кристалізації і технологічних умов. Нині питанням одержання монокристалів PbI₂ з метою практичного використання займаються науковці різних країн, розробляючи свої методики і розвиваючи уже відомі способи. Загалом, змінюючи технологічні умови вирощування, дийодид свинцю можна одержати кристалізацією з паро-газової фази, осадженням з розчинів, а також з розплаву. Кожен із цих способів має свої характерні технологічні особливості, що забезпечують одержання різних за формою, морфологією і розміром монокристалів.

Згідно аналізу наукових публікацій [1-5], кристали PbI₂, вирощені з розчину, бувають чітко огранені, але зазвичай невеликих розмірів (дрібнокристалічний порошок, пластинки товщиною декількох мкм). Форма таких кристалів залежить від вибору розчинника. Найліпшим є той розчинник, у якому розчинність знаходиться в межах 10...60 %. Французькими дослідниками (Ронрон J.P., Аманн M. L.) були отримані полікристалічні шари PbI₂, технологія одержання яких висвітлена в роботах [1, 2]. Вони використали метод нарощування шарів PbI₂ з розчину на різних підкладках, запропонованим А.І. Forty [3].

Відомості про одержання плівок PbI_2 з розчинів знаходимо у роботах [4, 5]. Зокрема, у роботі [4] вивчався вплив умов осадження середовища на електричні та структурні властивості шарів PbI_2 . Дослідження показали гексагональну структуру отриманих полікристалів PbI_2 .

Процес кристалізації PbI_2 з парової фази представляє перетворення, в результаті якого відбувається перехід атомів чи молекул із стану з практично неупорядкованою конфігурацією (пара) в стан з чіткою впорядкованістю (тверде тіло). Аналіз досліджень [1, 2, 6] показує, що морфологія кристалів PbI_2 визначається насамперед умовами росту: температурою, домішками, перенасиченням, порушенням стехіометрії. Залежно від вказаних технологічних параметрів, можна одержати такі морфологічні типи кристалів дийодиду свинцю: видовжені стрічки, голки або їх зростки (часто двійникові), вигнуті стрічки, складні утворення на основі стрічкових кристалів та їх зростків, безформні кристали у вигляді пластинок та дендритні утворення. Але за оптимальних умов росту ріст монокристалів PbI_2 відбувається зазвичай у вигляді пластинок і стрічок. Такі кристали характеризуються низьким вмістом забруднюючих домішок, а для практичного використання не потребують додаткової механічної обробки.

Важливими факторами при одержанні кристалів із газової фази є величина потоку речовини, величина тиску парів над ростовою поверхнею кристалу і швидкість росту кристалу [7]. Аналізуючи процес вирощування кристалів PbI_2 з газової фази, потрібно підкреслити, що ріст може відбуватися у певному діапазоні температур. Причому при кожній температурі швидкість росту можна змінювати шляхом зміни градієнта температур (ΔT) і механізмом переносу [8]. Тобто, вирощування монокристалів PbI_2 із паро-газової фази характеризується достатньо широким діапазоном технологічних умов. Найбільш гнучке управління технологією одержання монокристалів PbI_2 із паро-газової фази здійснюється при горизонтальному варіанті вирощування. Однак такий метод потребує детального дослідження і вивчення умов вирощування і включає дослідження рівноважного складу парової фази, перенесення маси, встановлення впливу технологічних чинників на ріст і морфологію кристалів [7-9].

Для одержання масивних монокристалів PbI_2 використовують розплавні методи: метод Бріджмена (Бріджмена-Стокбаргера), метод пересувної розплавленої зони, метод зонної плавки та ін. [10-15]. Перевагами методу кристалізації PbI_2 з розплаву можна вважати можливість використання великих швидкостей росту (до десятків мм/год) і одержання масивних монокристалів (монокристалічних зливків).

Спосіб вирощування монокристалів PbI_2 з рідкої фази відносять до простих і економічних. Основний недолік даного методу полягає у наявності значної кількості дефектів у вирощеному кристалі, які утворюються за наявності температурних градієнтів в процесі охолодження вирощеного зливка.

Постановка завдань. З аналізу літературних джерел встановлено, що можна виростити монокристали PbI_2 різної форми, лінійних розмірів і якості. Однак, не кожен із відомих методів дає технологічну продуктивність і структурну однорідність вирощених монокристалів. Можна стверджувати, що отримання монокристалів PbI_2 з параметрами, необхідними для практичного застосування, являється складною науково-технічною задачею, для виконання якої необхідні знання фізико-хімічних і технологічних процесів кристалізації з можливістю їх подальшого управління. Адже вибором способу і методики одержання, а також керування технологічним процесом можна змінювати умови вирощування і, відповідно, лінійні параметри та властивості монокристалів в потрібному напрямку. Однак цей процес потребує ґрунтовного вивчення, дослідження і набуття досвіду експериментальним шляхом. Тому, зважаючи на вище викладене, вважається необхідним встановити і узагальнити технологічні особливості одержання монокристалів PbI_2 різними способами.

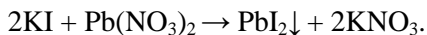
В роботі поставлено мету – вивчення технологічних умов одержання монокристалів PbI_2 з розчину, парової фази і розплаву.

Основні результати дослідження. Джерелами нагрівання в апаратурі для вирощування монокристалів служать різноманітні печі опору. Широке поширення одержали трубчасті печі, що представляють собою вогнетривку трубу з намотаним на неї нагрівальним елементом у вигляді дроту або стрічки, засипаним теплоізолюючим матеріалом. Можна використовувати кварцові труби, адже вони придатні для нагрівання до 1100 °С.

У якості вихідних матеріалів для вирощування монокристалів PbI_2 у даній роботі використано високочистий свинець номінальної чистоти 99,9998 %, що відповідав марці С0000, та йод марки номінальної чистоти 99,99998 % кваліфікації ОСЧ-17-5.

Необхідними компонентами при синтезі PbI_2 з водної фази були йодид калію KI і сіль свинцю $Pb(NO_3)_2$. Під час змішування водних розчинів вихідних компонентів у стехіометричному співвідношенні отримували необхідний розчин. В одержаному розчині утворився осад PbI_2 жовтого кольору.

Встановлено, що дийодид свинцю погано розчиняється в холодній воді і помірно – у гарячій. При змішуванні холодних розчинів (кімнатної температури) йодиду калію KI і нітрату свинцю $Pb(NO_3)_2$ утворюється жовтий осад PbI_2 за реакцією:



При цьому кристалики PbI_2 є низькодисперсними і являють собою дрібнокристалічний порошок порядку декількох мкм. Безпосередньо для практичного використання такі кристалики є малоприсадними, але можуть використовуватись у якості шихти для вирощування монокристалів іншими методами.

Якщо ж змішувати гарячі розчини (80...90 °C) KI і $Pb(NO_3)_2$, осад не випадає, але в процесі охолодження розчину утворюються пластинчасті кристали PbI_2 , які поступово збільшуються і повільно осідають. Окремі пластинчасті кристалики PbI_2 не можуть практично застосовуватись через малі розміри. Але можна реалізувати такі технологічні умови, що забезпечать осадження пластинчастих кристаликів PbI_2 на підкладки певного матеріалу і отримання на них тонких покриттів. Такі структури можуть знайти застосування як робочі елементи в приладах електронної техніки.

Ріст монокристалів PbI_2 з паро-газової фази реалізовували в запаяній кварцовій ампулі, у горизонтальній двозонній печі із заданим градієнтом температур. Піч має дві температурні області: в одній температура вище температури плавлення (сублімації), в іншій – значно нижче. У першій області речовина возгоняється (переходить у газову фазу), у другій – росте на стінках посудини або на затравці. При кристалізації PbI_2 з парової фази відбуваються хімічні транспортні реакції, які дозволяють вести кристалізацію при температурах значно менших, ніж температура сублімації. Суть методу полягає в тому, що над вихідною речовиною проходить потік газу, що реагує із цією речовиною і одночасно несе продукти реакції. У холодній зоні кварцової ампули частинки речовини конденсуються і поступово утворюють кристали. Швидкості росту кристалів з газової (парової) фази невеликі – порядку декількох мікрметрів на годину. Тривалість процесу вирощування становить 2...4 год. З парової (газової) фази отримано монокристали незначних розмірів (до декількох міліметрів) різноманітних форм від нитковидних кристалів, голок, стрічок до пластинок (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд монокристалів PbI_2 , одержаних з парової фази

Головною технологічною особливістю одержання монокристалів PbI_2 з парової фази є інтенсивність зародження центрів кристалізації, що однак є вагомою перешкодою на шляху одержання об'ємних монокристалів великих розмірів. Встановлено, що технологічні фактори, такі як температура, домішки, перенасичення, порушення стехіометрії визначають морфологію кристалів. Зміною цих параметрів одержано такі форми кристалів: пластинки, смужки, голки. Різновиди одержаних монокристалів PbI_2 можуть мати конкретне практичне застосування

(дослідження фізичних властивостей, давачі, детектори випромінювань тощо). Такі дослідження скеровані на вирішення основної проблеми матеріалознавства – одержання матеріалів із заданими структурою і властивостями.

Кристалізація монокристалів PbI_2 згідно розплавних методів Бріджмена-Стокбаргера здійснюється у вертикальній двозонній печі шляхом повільного опускання ампули з розплавом PbI_2 із високотемпературної зони в низькотемпературну при проходженні області температурного градієнту на межі обох зон. Тобто, кристалізація розплаву відбувається на межі поділу рідкої і твердої фаз (при переході з високотемпературної в низькотемпературну зону). Важливе значення при цьому має величина температурного градієнту у зоні кристалізації. Із збільшенням температурного градієнту зростає структурна досконалість і однорідність вирощених монокристалів.

Процес вирощування монокристалів з розплаву охоплює дві основні стадії:

- а) зародження центра кристалічної фази (процес зародкоутворення);
- б) ріст монокристалічного зародка в результаті приєднання атомів із розплаву.

При цьому для одержання задовільної якості монокристалів необхідно враховувати наступні аспекти:

- наявність домішок у вихідному матеріалі і їх вплив на процес вирощування;
- форма границі поділу твердої і рідкої фази (фронт кристалізації);
- дефекти, що утворюються в процесі росту монокристалу.

За наявності радіальних перепадів температур у процесі росту і охолодження кристалу створюються термічні напруження, що зумовлюють тепловий стиск зовнішньої поверхні, і відповідно, появу стискуючих напружень у товщі кристалу та розтяг на поверхні зливка PbI_2 . Для запобігання цьому явищу вирощування монокристалу необхідно здійснювати за умов, що виключають радіальний температурний градієнт. Одночасно при цьому температурний градієнт вздовж осі ампули має бути постійним. Якщо ж радіальний градієнт відмінний від нуля (при постійному градієнті вздовж осі), то навколо осі кристала виникають симетричні напруження. Неоднорідний розподіл домішок в монокристалах PbI_2 також обумовлюватиме концентраційні напруження.

Суттєвий вплив на вирощування кристалів чинять неконтрольовані домішки. За наявності домішок ріст кристалів характеризується нерівноважним процесом, оскільки домішки можуть змінювати швидкість росту і параметри вирощених кристалів, сприяти утворенню дефектів структури чи навпаки їх заліковуванню. Значний вплив на процес кристалізації чинять механічні домішки, тобто ті, що знаходяться в розплаві у вигляді найдрібніших частинок мікронного чи субмікронного розміру. Ці домішки можуть відігравати роль "затравок" при утворенні нових зародків, оскільки робота утворення зародків на наявній поверхні розділу (гетерогенне зародкоутворення) є меншою, ніж робота флуктуаційного зародкоутворення (гомогенне зародкоутворення) в об'ємі розплаву.

На процес зародкоутворення суттєво впливають розчинні домішки. Оскільки зародок при своєму утворенні прагне "відтіснити" домішкові молекули (атоми), то шар розплаву на межі із зародком збагачується домішковими атомами. При цьому гальмується процес приєднання атомів основної речовини до зародка і для досягнення критичного його розміру, необхідного для наступного росту монокристалу, потрібно збільшити переохолодження розплаву.

Тому, врахувавши негативний вплив забруднюючих домішок на процес кристалізації і властивості дийодиду свинцю, запропоновано проводити додаткову очистку вихідних компонентів (Pb і I_2), після чого послідовно проводити процеси прямого синтезу і вирощування монокристалів [16]. Це дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу вирощування монокристалів PbI_2 .

Однією з умов задовільного росту монокристалу є великий (різкий) градієнт температури на межі температурних зон печі (у зоні кристалізації) (рис. 2). Водночас зауважимо, що характеристики теплового потоку між зонами печі сильно впливають на температурний розподіл у зоні кристалізації, обумовлюючи розширення температурного переходу і зменшення температурного градієнту. Такі температурні умови призводять до нерівномірного росту шарів, що сприяє утворенню структурних дефектів, зростає ймовірність вторинного зародкоутворення. Тому для підвищення температурного градієнта у зоні кристалізації і забезпечення однорідності температури у зонах печі доцільно застосовувати одночасно тепловідвід із верхньої частини нижньої зони (зона твердої фази) і додатковий нагрівник у нижній частині верхньої зони (зона

розплаву). Тривалість процесу росту монокристалічного зливка PbI_2 становить при цьому у середньому 16...24 години.

За методом Бріджмена-Стокбаргера вирошено монокристалічні зливки PbI_2 з розплаву діаметром 10...30 мм і довжиною до 100 см залежно від форми і розмірів ампули (рис. 3).

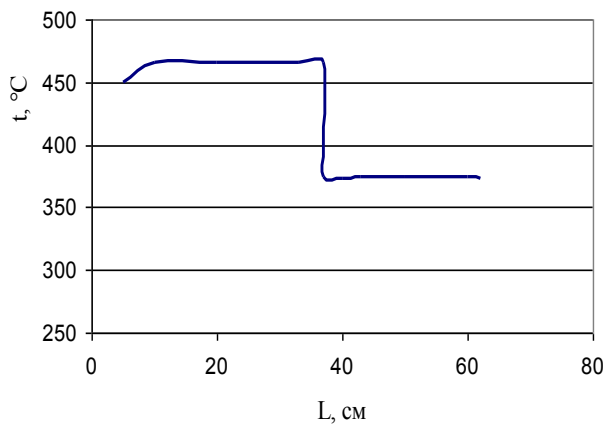


Рис. 2. Оптимальний розподіл температури у печі



Рис. 3. Зовнішній вигляд монокристала PbI_2 , одержаного з розплаву

Недолік методу Бріджмена-Стокбаргера: обмеження росту кристала стінками ампули, у результаті чого можливе виникнення внутрішніх напружень і забруднення кристала домішками з внутрішньої поверхні ампули.

Для реалізації задовільних технологічних умов при вирощуванні монокристалів необхідно виконати наступні вимоги:

- підготувати вихідні компоненти високого ступеня чистоти для вирощування монокристалів за будь-яким із методів;
- вибрати середовище кристалізації (інертне або вакуум);
- вибрати матеріал тигля, у якому буде відбуватися кристалізація;
- підібрати нагрівальний пристрій (піч);
- забезпечити контроль температури і правильний відвід тепла;
- забезпечити стабілізацію і керування температурою кристалізації.

Висновки. Встановлено, що основною вимогою, яка повинна виконуватися при одержанні монокристалів PbI_2 за будь-яким із методів, є забезпечення умов для утворення окремих зародків і вирощування з них монокристалів. Загалом вимоги зводяться до того, щоб вирощений продукт був монокристалом високої чистоти з мінімальною концентрацією дефектів і внутрішніх напружень для даної сполуки. Монокристали PbI_2 задовільної якості одержують із паро-газової фази. Однак вказаний спосіб не є технологічно продуктивним, оскільки розміри вирощених монокристалів обмежуються декількома міліметрами. Окрім того, форма кристалів залежить від технологічних умов вирощування (пластинки, смужки, голки), що теж обмежує придатність одержаного матеріалу. Для отримання об'ємних монокристалів PbI_2 значних розмірів використовують розплавні методи. Однак якість таких монокристалів, зокрема ступінь чистоти, визначається, передусім, чистотою вихідних матеріалів, оскільки наявність неконтрольованих домішок суттєво ускладнює технологічний процес і може негативно впливати на відтворення властивостей матеріалу, зокрема, електрофізичних.

Нині одержанням і дослідженням монокристалів PbI_2 займаються науковці багатьох країн світу. У майбутньому це дозволить вирішити проблему одержання досконалих монокристалів PbI_2 з необхідними властивостями і необхідної форми та розмірів.

Список використаних джерел

1. Ponpon J.P., Amann M. L. Preliminary characterization of PbI_2 polycrystalline layers deposited from solution for nuclear detector applications. Thin solid films. 2001. V. 394. P. 276-282.
2. Ponpon J.P., Amann M. L. et. al. Solution grown PbI_2 layers embedded in PVA. Crystal Res. Technol. 2007. V. 253. P. 253-259.
3. Forty A.I. Phil. Mag., 1960. V. 5. P. 787.

4. Mousa Ali M., Natheer Al-rubaie J. The influence of deposition conditions on structural properties of PbI_2 . V. 20. 2009, Article ID 494537, 7 pages.
5. Mousa Ali M. Natheer Al-rubaie J. Properties of layered PbI_2 doped with Al and Co. J. of Materials Science and Engineering. 2011. V. 5. P. 32-40.
6. Курило І.В., Рибак О.В. Морфологія і структурна досконалість кристалів PbI_2 в зв'язку з умовами їх росту. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2007. № 592. С. 30-36.
7. Набитович Й., Рибак О., Калуш О. Дослідження процесу росту монокристалів PbI_2 із газової фази. Вісник ДУ "Львівська політехніка". Теорія і проектування напівпровідникових та радіо-електричних пристроїв. 1997. № 326. С.118-119.
8. Kurilo I.V., Rybak O.V. Effect of growth conditions on the morphology and structural defection of vapor-growth PbI_2 crystals. Inorganic materials. 2002. V. 38. № 3. P. 288-291.
9. Kalush O.Z., Gas'maev V.K., Voronin V.O. Growth of PbI_2 single crystals from the vapour phase. Interntional Conference „Crystal materials - 2005" (ICCM-2005), Kharkov, 30 may- 2 june,2005. С. 144.
10. S. Hui, Z. Xinghua, Y. Dingyu, H. Zhiyu, Z. Shifu, Z. Beijun, Electrical and Y-ray energy spectrum response properties of PbI_2 crystal grown by physical vapor transport, J. of Semiconductors. 2012. V. 33(5). P. 053002.
11. Hayashi T., Kinpara M., Wang J.F., Mimura K., Isshiki M. Growth of PbI_2 single crystals from stoichiometric and Pb excess melts. Journal of Crystal Growth. 2008. V. 310(1). P. 47-50.
12. He Y., Zhu S., Zhao B., Jin Y., He Z., Chen B. Improved growth of PbI_2 single crystals. Journal of Crystal Growth. 2007. V. 300. P. 448-451.
13. Chaudhary S.K., Kaur H. Impurity induced structural phase transformations in melt grown single crystals of lead iodide. Cryst. Res. Technol. 2011. V. 46(12). P. 1235-1240.
14. Liu J., Zang Y. Growth of lead iodide single crystals used for nuclear radiation detection of Gamma-rays. J. Cryst. Res. Technol. 2017. V. 52(3) :1600370.
15. He Y., Jin Y., Chen B., He Z., Wang L. Growth of PbI_2 single crystal by the top seed vertical zone melting method. J. Cryst. Res. Technol. 2015. V. 50(11). P. 823-827.
16. Matkova A., Shvabyuk V., Furs T., Shvabyuk V. The Influence Technological Aspects to the Formation of Defects in PbI_2 Single Crystals. Actual Problems of Engineering Mechanics : Materials Science Forum. 2019. V. 968. P. 161-167, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.161>.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2019

УДК: 548.5 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.21

Т.В. Фурс

Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОМІШОК НА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ PbI₂ З РОЗПЛАВУ

У роботі проведено дослідження впливу технологічних домішок на процес кристалізації монокристалів PbI₂ з розплаву. Проаналізовано особливості і недоліки методу зонної плавки для очищення монокристалів PbI₂. Запропоновано метод термічної дистиляції у вакуумі для ефективного очищення вихідного компонента Pb.

Ключові слова: дийодид свинцю, монокристал, кристалізація.

Т.В. Фурс

Луцький національний технічний університет

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ PbI₂ ИЗ РАСПЛАВА

В работе проведено исследование влияния технологических примесей на процесс кристаллизации монокристаллов PbI₂ из расплава. Проанализированы особенности и недостатки метода зонной плавки для очистки монокристаллов PbI₂. Предложен метод термической дистиляции в вакууме для эффективной очистки исходного компонента Pb.

Ключевые слова: дийодид свинца, монокристалл, кристаллизация.

T.V. Furs

Lutsk National Technical University

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL IMPURITIES ON THE CRYSTALLIZATION OF PbI₂ FROM MELT

The study of the influence of technological impurities on the crystallization process of PbI₂ single crystals from the melt. The features and disadvantages of the zone melting method for the purification of PbI₂ single crystals are analyzed. A method of thermal distillation in vacuum for the efficient purification of the initial component of Pb is proposed.

Key words: lead diiodide, single crystal, crystallization.

Постановка проблеми. Властивості дийодиду свинцю (PbI₂), який використовується в спектрометрії іонізуючого випромінювання визначаються структурною досконалістю, складом і кількістю домішок, які по різному впливають на процеси кристалізації і росту кристалів. Ці фактори можуть як збільшувати, так і зменшувати швидкість росту, змінювати параметри вирощених кристалів, сприяти утворенню дефектів структури чи навпаки їх заліковуванню. Аналіз впливу технологічних факторів на процес кристалізації і, відповідно на властивості PbI₂, представляє актуальну задачу як в науковому, так і в прикладному аспектах.

Аналіз досліджень і публікацій. Нині вирощування монокристалів PbI₂ з розплаву найчастіше виконують за вертикальним методом Бріджмена [1-5]. Вивчення проблематики одержання високочистих монокристалів PbI₂ показує, що для підвищення чистоти і структурної досконалості виконують операцію очищення одержаного монокристалічного зливка PbI₂. Широкої популярності для очищення PbI₂ набув метод зонної плавки [1-5]. Цей метод полягає у повільному переміщенні ампули із зливком вздовж вузької (декілька сантиметрів) зони плавки, температура якої встановлюється дещо вище температури плавлення PbI₂. При цьому для якісної очистки здійснюють 50-100 і більше проходів зони розплаву, залежно від рівня чистоти вихідних компонентів. Такий спосіб ускладнює технологічний процес і не завжди забезпечує необхідну чистоту одержаного монокристалу, оскільки домішки, коефіцієнт розподілу яких близький до одиниці ($K \approx 1$), погано видаляються зонною плавкою. А деякі домішки у такий спосіб видалити неможливо, особливо у випадку, коли синтезують PbI₂ із розчину. До цього варто зауважити можливий негативний вплив залишкових технологічних домішок на процес кристалізації і в цілому вирощування монокристалів PbI₂, а також на властивості матеріалу.

Постановка завдань. З аналізу літературних джерел встановлено, що вирішення питання зменшення концентрації забруднюючих домішок науковцями цієї проблематики відбувається на етапі вирощування монокристалів PbI₂. Зазвичай така операція займає тривалий час, є не завжди ефективною і негативно впливає на процес кристалізації, оскільки наявна у сировині певна концентрація технологічних домішок гальмує і утруднює його. Властивості одержаних монокристалів з розплаву також визначаються ступенем чистоти вихідних матеріалів і залежать від ефективності операції очищення. Принагідно зауважити, що технологічні домішки можуть впливати на формування різних недосконалостей кристалічної структури на етапі кристалізації,

погіршуючи їх якість і властивості. Тому вивчення впливу технологічних домішок на процес кристалізації PbI_2 , а також встановлення ефективного способу очистки є актуальним завданням з метою одержання структурно однорідних високочистих монокристалів для практичного застосування в приладах електронної техніки.

В роботі поставлено мету – вивчення впливу технологічних домішок на процес кристалізації з розплаву і встановлення ефективного способу очистки монокристалів дийодиду свинцю.

Основні результати дослідження. Дослідження кристалізаційних умов PbI_2 здійснювали за методикою розплавного методу Бріджмена-Стокбаргера [6]. Процес здійснювали шляхом повільного опускання ампули з розплавом у полі температурного градієнта із області вищих температур, в область, де температура нижча. Розподіл температури в печі створював такі умови:

- температура верхньої зони була лише на 20–50К вищою від точки плавлення дийодиду свинцю, щоб градієнти температури в розплаві були якнайменші і не створювали неоднорідностей складу.

- температура нижньої зони була дещо нижчою від точки плавлення, щоб кристал, відпалюючись, повільно охолоджувався.

- перехід між температурними зонами був різким.

Найкращі умови при вирощуванні дийодиду свинцю є тоді, коли вісь c проходить перпендикулярно до площини росту монокристалу. Розподіл температури в установці під час вирощування монокристалів PbI_2 є задовільним, коли границя (межа) рідкої і твердої фази плоска чи хоча б трішки випукла, що зменшує ймовірність вторинного зародкоутворення. При цьому доцільно враховувати вплив теплового потоку на розподіл температури на границі розділу фаз, що визначається властивістю матеріалу шихти, геометрією зразка і печі, швидкістю кристалізації. При використанні ротових ампул невеликих діаметрів можна досягнути більшої швидкості росту монокристалу PbI_2 , оскільки теплота кристалізації, що виділяється в одиницю часу, пропорційна об'єму речовини. Теплота кристалізації викликає переміщення границі твердої і рідкої фаз в напрямку росту, висота стовпчика розплаву збільшується і його вага переважає сили поверхневого натягу, що забезпечує контакт між кристалом і розплавом. Якщо переохолити розплав (тобто понизити його температуру нижче температури плавлення) і створити умови, що виключають незадовільні умови кристалізації, то частина теплоти кристалізації може відводитися в розплав і швидкість росту може бути збільшена.

Значний вплив на процес кристалізації з розплаву мають технологічні домішки, які потрапляють з вихідними матеріалами. Так, наявність включень кисню в PbI_2 може бути відповідальною за термічну нестабільність електричних параметрів приладів на основі PbI_2 . Склад і природа материнської фази в значній мірі визначають кінетику росту, а зміна складу і зовнішніх умов – виникнення різних недосконалостей.

В залежності від умов тверднення в кристалі PbI_2 може бути одержаний різний розподіл домішок. Хімічний вид неоднорідностей зумовлений коливанням умов росту, які викликають флуктуації розподілу домішок в твердій фазі. При шаруватій структурі ростової поверхні виникають неоднорідності, які характеризуються невеликими коливаннями концентрації на малих відстанях довжини кристалу. Ці флуктуації складу розміщуються паралельно до площини шарів дийодиду свинцю. Хімічна адсорбція в площині шару PbI_2 і зв'язані з цим неоднорідності їх руху можуть спричинити збільшення вказаних неоднорідностей складу на декілька порядків.

При вирощуванні дийодиду свинцю із розплаву можливі декілька механізмів утворення дислокацій: 1) термічні напруження; 2) концентраційне переохолодження; 3) механічні напруження; 4) пересичення вакансіями; 5) випадкові утворення. Особливістю шаруватих кристалів є велика кількість в них власних структурних дефектів, особливо гвинтових дислокацій. Однією з причин виникнення дислокацій з гвинтовою компонентою вектора Бюргерса є утворення двох близько розміщених зародків, які виникли одночасно на одній і тій же грані кристалу і, розвиваючись, деформують один одного. Іншою причиною може бути наявність у вихідній сировині неконтрольованих домішок. Внаслідок їх нерівномірного розподілу в тонких кристалічних пластинках можливий зсув однієї частинки кристалу відносно іншої.

Термічні напруження в процесі росту і охолодження кристалу створюються за рахунок радіальних перепадів температур. Тепловий стиск зовнішньої поверхні приводить до появи стискуючих напружень у середовищі кристалу і розтяг на поверхні зливка дийодиду свинцю. Якщо ріст кристалу не супроводжується виникненням радіального температурного градієнту, а градієнт вздовж осі постійний, то термічні напруження в монокристалі PbI_2 не виникають.

Коли радіальний градієнт відмінний від нуля (при постійному градієнті вздовж осі) біля осі кристала виникають симетричні напруження. Концентраційні напруження в монокристалах PbI_2 також можливі і створюються неоднорідним розподілом домішок.

Особливо важливу роль мають механічні домішки, тобто ті, що знаходяться в розплаві у вигляді найдрібніших частинок мікронного чи субмікронного розміру. Вони можуть відігравати роль "затравок" при утворенні зародків. Пояснюється це тим, що робота утворення зародків на готовій поверхні розділу (гетерогенне зародкоутворення) є меншою, ніж робота флуктуаційного зародкоутворення (гомогенне зародкоутворення) в об'ємі розплаву.

Зовсім інакше можуть впливати на процес зародкоутворення розчинні домішки. Суть у тому, що зародок при своєму утворенні прагне "відтіснити" домішкові молекули (атоми). А це викликає збагачення домішковими атомами шару розплаву, який оточує межі границь зародків. Тому участь атомів основної речовини в рості зародка утруднюється і для досягнення критичного розміру зародка необхідно створити дещо більше переохолодження.

Тому процеси росту при наявності технологічних домішок є нерівноважними, так як в кристалі формується неоднорідний розподіл домішок. Причина цих неоднорідностей наступна. Кількість домішок, що захоплюються кристалом в процесі росту не відповідає її кількості в основному середовищі (розплаві). Коли кристал захоплює меншу кількість домішок, ніж міститься в розплаві, то фронт кристалізації працює як вибіркового фільтр на горловині втягуючого насоса: фронт – фільтр повністю пропускає всі атоми чи молекули основного кристалізаційного матеріалу (PbI_2) і тільки деяку частину домішок. В результаті цього процесу домішки гальмуються перед фронтом росту і тому не встигають за зміною швидкості росту. Ще одна причина – це безпосередня залежність частки захоплених домішок від швидкості росту. Такі зонні домішкові смуги дуже часто оточені сітками дислокацій, що створені підвищеною концентрацією домішок. Як наслідок цього, домішкові атоми не в змозі дифундувати із накопичень, так як втримуються пружними полями дислокацій. А дислокації не рухаються, так як в свою чергу втримуються шаром домішок. Розірвати таку сітку неможливо, оскільки дислокації не можуть закінчуватися в об'ємі кристала. Такі неоднорідності не ліквідуються навіть в процесі відпау вирощеного монокристала. Одержані дефектні (недосконалі) монокристали виправити вже неможливо.

Для одержання монокристалів PbI_2 задовільної якості необхідно врахувати можливість кристалізаційного переохолодження, яке пов'язане з накопиченням домішок поблизу фронту кристалізації і зумовлює пониження рівноважної температури плавлення. Якщо ж кристал знаходиться в термодинамічній рівновазі з парою, розчином чи розплавом (тобто не росте і не розчиняється), то кожній даній концентрації домішок в середовищі відповідає певна її кількість в кристалі. Ця кількість визначається термодинамічною діаграмою стану, яку визначають в основному експериментально і отримують переважно при аналізі вирощених кристалів.

Якщо очистити PbI_2 від сторонніх домішок так, щоб їх концентрація була хоча б на порядок нижчою від концентрації власних термодинамічно-активних дефектів, то ці дефекти і будуть визначати основні характеристики PbI_2 (тип електропровідності, концентрацію вільних носіїв заряду і інше). Крім того, саме власні дефекти в значній мірі впливають на процеси легування PbI_2 .

Для одержання монокристалів PbI_2 задовільної якості з відтворюваними властивостями потрібно понижувати вміст технологічних домішок. Врахувавши малоефективний і тривалий у часі спосіб очищення зонною плавкою, у роботі запропоновано для проведення якісної очистки PbI_2 значну увагу зосередити першочергово на очистці вихідних компонентів, особливо свинцю. Для очистки свинцю вибрано метод термічної дистиляції у вакуумі [7]. При цьому здійснювали фільтрацію розплаву свинцю через кварцові волокна з прошарком дрібного склографіту високої чистоти. Потім виконували 3-5 кратну дистиляцію розплавленого свинцю через капіляри різних діаметрів. Розплавлений свинець, витікаючи, створював у склографітовому стаканчику свинцевий зливочок – стовпчик без контакту зі стінками. Нижня частина зливка для синтезу не використовувалася. Загалом вихід очищеного матеріалу становив до 70 %.

Цей метод полягає у використанні склографітового порошку, який проявляє адсорбційні властивості у процесі фільтрації розплаву свинцю. Він особливо ефективний для очистки свинцю від кисневих домішок і їх аніонних комплексів. Пропонованим методом вдається очистити свинець від летких з'єднань до рівня 10^{-7} ат. %, від важких металів до рівня 10^{-6} ат. %. Одержані результати вказують на ефективність пропонованого методу очистки вихідних компонентів PbI_2 . Використання апарату для рафінування дистиляцією у вакуумі, запропонованого в роботі [7], дозволило здійснити комплексну очистку свинцю в одному процесі: плавку у вакуумі, фільтрацію, адсорбцію і поглинання домішок на границях склографітових і вугільних частинок. Результати

хіміко-спектрального аналізу відфільтрованого свинцю показали, що після кожної стадії очистки кількість домішок у середньому зменшується на порядок. Після виконання 3-4 фільтрацій кількість домішок у свинці – поза межами чутливості аналізу незалежно від рівня чистоти вихідного матеріалу. Використання методу термічної дистиляції у вакуумі призвело до підвищення ступеня чистоти свинцю, як вихідного компонента, і як наслідок – до підвищення задовільних умов кристалізації PbI_2 і якості вирощених монокристалів. Тривалість процесу синтезу при цьому скоротилася до 1-3 годин у порівнянні з 24-48 годин при використанні неочищених вихідних компонентів.

Висновки. Наявність забруднюючих домішок у вихідному матеріалі значно ускладнює процес вирощування монокристалів з розплаву, негативно впливає на якість одержаних зливків, сприяючи утворенню недосконалостей їх кристалічної структури, та на відтворення їх фізичних та оптичних властивостей. Аналізом встановлено недостатню ефективність методу зонної плавки для очищення монокристалічних зливків від технологічних домішок. Натомість запропоновано операцію очищення від забруднюючих домішок розпочати для вихідних речовин, використавши метод термічної дистиляції у вакуумі для очищення компонента Pb. При цьому поліпшуються умови кристалізації, зменшується тривалість самого процесу вирощування і покращується якість одержаних монокристалів. Таким чином встановлено, що очистка матеріалу PbI_2 найбільш ефективна, коли починається з очистки вихідних компонентів (свинцю і йоду).

Список використаних джерел

1. Chaudhary S.K., H. Kaur. Impurity induced structural phase transformations in melt grown single crystals of lead iodide. *Cryst. Res. Technol.* 2011. V. 46, № 12. P. 1235-1240.
2. Hayashi T., Kinpara M, Wang K., Mimura J., Isshiki M. Growth of PbI_2 single crystals from stoichiometric and Pb excess melts. *Journal of Crystal Growth.* 2008. V. 310, I. 1. P. 47-50.
3. Hui S., Xinghua Z., Dingyu Y., Zhiyu H., Shifu Z., Beijun Z. Electrical and Y-ray energy spectrum response properties of PbI_2 crystal grown by physical vapor transport. *Journal of semiconductors.* 2012. V. 33, № 5/ 053002.
4. Matuchova M., Zdansky K., Zavadil J. Synthesis of PbI_2 with admixture of rare earth elements: Electrical and optical properties. *Physica status solidi (c)* V. 4 (4). 2007. P. 1532 - 1535.
5. Liu J., Zang Y. Growth of lead iodide single crystals used for nuclear radiation detection of Gamma-rays. *J. Cryst. Res. Technol.* 2017. V. 52(3):1600370.
6. Федосов А.В., Калуш О.З., Філюк Т.В. Вирощування кристалів дийодиду свинцю із розплаву. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). Луцьк: ЛДТУ. - 2002. Вип. 11. Ч.2. С. 88-97.
7. Калуш О.З., Федосов А.В. Апарат для рафінування металу дистиляцією у вакуумі.// Деклараційний патент на винахід. - Бюл. №1 від 15.02.2001.

Стаття надійшла до редакції 22.11.2019

УДК 542.61 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.22

М.М. Челтонов, А.Л.Кириченко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

В современных условиях для Украины актуальным экологическим вопросом является утилизация снаряжённых корпусов двигателей (СКД) с истёкшим сроком хранения. В ходе утилизации образуется полимерная матрица (ПМ) со средним размером фрагментов от 2 - 15 мм, в состав которой входит до 30% циклотетраметилентетранитрамина (нитрамина), производство которого отсутствует в Украине, нитрамин возможно регенерировать с применением диметилсульфоксида (ДМСО). Целью данной работы является установление закономерностей извлечения нитрамина из ПМ с помощью ДМСО в лабораторных условиях с изменением такого параметра как массовый модуль (отношение ДМСО : ПМ) в зависимости от влажности ПМ. На основе экспериментальных данных установлены зависимости массового модуля (отношения ДМСО : ПМ) на степень извлечения нитрамина с помощью ДМСО из ПМ. Наиболее предпочтительным массовым модулем (отношением ДМСО : ПМ) можно считать диапазон 2 – 3, что позволяет достигнуть степени извлечения нитрамина 71,9% (при влажности ПМ 3%). Идентификация извлечённого из ПМ нитрамина подтверждена ИК-спектром и ДТА.

Ключевые слова: твёрдое ракетное топливо, полимерная матрица, циклотетраметилентетранитрамин, диметилсульфоксид.

М.М. Челтонов, О.Л. Кириченко

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕРОБКИ ПРОДУКТІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА

У сучасних умовах для України актуальним екологічним питанням є утилізація споряджених корпусів двигунів (СКД) із закінченим терміном зберігання. В ході утилізації утворюється полімерна матриця (ПМ) з середнім розміром фрагментів 2 - 15 мм, до складу якої входить до 30% циклотетраметилентетранітраміна (нітраміна), виробництво якого відсутнє в Україні, його можливо регенерувати із застосуванням диметилсульфоксиду (ДМСО). Метою даної роботи є встановлення закономірностей вилучення нітраміну з ПМ за допомогою ДМСО в лабораторних умовах зі зміною такого параметра як масовий модуль (відношення ДМСО: ПМ) в залежності від вологості ПМ. На основі експериментальних даних встановлено залежності масового модуля (відношення ДМСО: ПМ) на ступінь вилучення нітраміна за допомогою ДМСО з ПМ. Найкращим масовим модулем (ставленням ДМСО: ПМ) можна вважати діапазон 2 - 3, що дозволяє досягти ступеня вилучення нітраміну 71,9% (при вологості ПМ 3%). Ідентифікації вилученого з ПМ нітраміна підтверджена ІЧ-спектром і ДТА.

Ключові слова: тверде ракетне паливо, полімерна матриця, циклометилентетранітрамін, диметилсульфоксид.

М.М. Cheltonov, A.L. Kyrychenko

RESEARCH PROCESSING OF SOLID PROPELLANT DISPOSAL PRODUCTS

The disposal of expired ammunition, warheads, solid propellant rocket motors (SPRM) is a pressing ecological issue for today's Ukraine. The process of disposal of solid propellant from loaded motor cases results in formation of polymer matrix with fragment sizes of of 2 mm to 15 mm that has found use as an energetic additive to make part of emulsion explosives (EE). The polymer matrix contains: a binder, an oxidizer (ammonium perchlorate), energetic additives (cyclic nitramine, i.e. cyclotetramethylenetetranitramine, and aluminium) and process additives. The first method consists in the use of concentrated mineral acids and destruction of the binder. The major disadvantages of this method include large quantity of by-products and and process exothermicity with evolving toxic nitrogen oxides. The other method lies in selective extraction of cyclic nitramines from polymer matrix using organic solvents. To extract cyclic nitramine from solid propellant matrix from which ammonium perchlorate has been previously removed, a selective organic solvent - dimethyl sulphoxide can be used. At the preliminary stage of works, a water-soluble component, ammonium perchlorate, was extracted from polymer matrix, which is soluble both in dimethyl sulphoxide and in water, and therefore its presence as a strong oxidizing agent in the spent dimethyl sulphoxide solution in the case of dimethyl sulfoxide recovery is undesirable. Then, cyclic nitramine is extracted from the obtained polymer matrix with dimethyl sulphoxide, the solution is filtered off from refined polymer crumb, and cyclic nitramine is precipitated by adding a diluent, water, to the solution. The purpose of this work is to establish regularities of the extraction of cyclic nitramine from polymer matrix with the use of dimethyl sulphoxide in a laboratory environment with changing such parameter as mass module (dimethyl sulphoxide : polymer matrix ratio) dependence on polymer matrix moisture content. The most preferable mass module (dimethyl sulphoxide : polymer matrix ratio) can be considered a range of 2–3, which makes it possible to achieve a degree of cyclic nitramine recovery of 71.9% (with a moisture of polymer matrix - 3%). The identification of nitramine extracted from polymer matrix is confirmed by the IR spectrum the method of differential thermal analysis (DTA).

Keywords: solid propellant, polymer matrix, cyclotetramethylenetetranitramine, dimethyl sulphoxide

Введение. В современных условиях для Украины является актуальным экологическим вопросом утилизация снаряжённых корпусов двигателей (СКД) с истёкшим сроком хранения. Данные работы выполняются на Павлоградском химическом заводе гидромеханическим методом с последующим его измельчением. Одним из наиболее ценных компонентов, который возможно

регенерировать в ходе утилизации, является циклотетраметилентетранитрамин (далее — циклический нитрамин). В Украине отсутствуют технологии, а также методики экстрагирования циклических нитраминов из твёрдых ракетных топлив (ТРТ), в связи с этим необходимо провести в лабораторных условиях экспериментальные исследования по влиянию различных факторов (массового модуля – отношения селективного растворителя и исходной полимерной матрицы твёрдого ракетного топлива) на извлечение нитрамина из полимерной крошки ТРТ (полимерной матрицы).

Литературный обзор. Согласно проведённому литературному обзору [1-13] при утилизации твердотопливных ракетных двигателей наиболее изученной технологией является метод гидромеханического извлечения [1-5] с последующим измельчением полимерной крошки твёрдого ракетного топлива. На рис. 1 представлена принципиальная схема утилизации снаряжённых корпусов двигателей методом гидромеханического вымывания.



Рис. 1. Принципиальная схема утилизации снаряжённых корпусов двигателей твёрдого ракетного топлива

Основная часть. При проведении работ по утилизации снаряжённых корпусов твёрдого ракетного топлива в настоящее время на ГП «НПО «ПХЗ» (г.Павлоград) успешно применяется метод гидромеханической обработки СКД. Такая обработка, заключающаяся в извлечении фрагментов твёрдого ракетного топлива струёй воды высокого давления (300 – 600 атм), позволяет безопасным методом разрушить эти материалы и извлечь их в виде относительно небольших фрагментов и кусков твёрдого ракетного топлива для последующей переработки. На следующем этапе происходит измельчение фрагментов твёрдого ракетного топлива до полимерной матрицы. Средний состав полимерной матрицы твёрдого ракетного топлива представлен в таблице 1.

Таблица 1

Средний состав полимерной матрицы твёрдого ракетного топлива после измельчения

№ п/п	Размер частиц	Содержание фракции, %
1	До 7 мм (7x4x2 мм и менее)	31,7
2	От 8 до 10 мм (от 8x4x2 мм до 10x4x2 мм)	37,8
3	От 11 до 15 мм (от 11x4x2 мм до 15x4x2 мм)	28,9
4	Более 15 мм (15x4x2 мм и менее)	1,1

В состав твёрдого ракетного топлива входит водорастворимый компонент – перхлорат аммония, который в ходе гидромеханической обработки растворяется в воде, однако некоторое его количество (25 – 35%) ещё присутствует в образовавшихся фрагментах полимерной матрицы твёрдого ракетного топлива. Дополнительным выщелачиванием водой возможно повысить степень извлечения - перхлората аммония. После модификации извлечённого перхлората аммония возможно повторно его применять в составах композиционных материалов. Также в полимерную матрицу входит до 30% водонерастворимого компонента — циклического нитрамина, извлечение которого возможно осуществить с применением диметилсульфоксида. После извлечения и

модификации (рис. 1) циклический нитрамин возможно применять в составе волноводов неэлектрических систем инициирования, капсулей детонаторов, в качестве высокоэнергетического вещества в составах композиционных материалов [2, 7].

Информация по параметрам извлечения циклического нитрамина из полимерной матрицы твёрдого ракетного топлива с применением диметилсульфоксида (а именно массового модуля ДМСО : ПМ) отсутствует в литературе. Целью настоящей работы является установление закономерностей извлечения циклического нитрамина из полимерной матрицы (ПМ) с помощью ДМСО в лабораторных условиях с изменением такого параметра как массовый модуль (отношение ДМСО : ПМ) в зависимости от влажности полимерной матрицы и идентификация извлечённого продукта методом ИК-спектроскопии и дифференциально термического анализа.

Материалы и методы исследований. Для проведения исследований были использованы образцы измельченной полимерной матрицы со средним размером фрагментов, указанным в таблице 1.

В состав измельченной полимерной матрицы входит значительное количество перхлората аммония (28,1%). В связи с тем, что перхлорат аммония растворим как в ДМСО, так и в воде — он остаётся в отработанном водном растворе диметилсульфоксида. Что нежелательно, так как нагрев ДМСО в ходе последующей его регенерации с сильным окислителем (NH_4ClO_4) разлагает ДМСО до диметилсульфона. С целью понижения его концентрации выполняли промывку водой при температуре 75-80 °С в течение 2 часов. В таблице 2 представлен химический состав полимерной матрицы до и после промывки водой, из которой следует, что практически 69% NH_4ClO_4 переходит в водный раствор.

Таблица 2

Химический состав полимерной матрицы до и после промывки водой

Наименование компонента	Содержание компонента до промывки водой, %	Содержание компонента после промывки водой, %
Полимерное связующее	9,6	5,9
Перхлорат аммония	28,1	8,8
Циклический нитрамин	29,5	24,4
Алюминий	25,9	19,5
Влага	6,9	41,45

Полученную полимерную матрицу сушили в сушильном шкафу Binder Fed 115 при температуре 100 °С до постоянного веса, периодически взвешивая высушенные образцы.

Процесс экстракции нитрамина диметилсульфоксидом из полимерной матрицы различной влажности (3-41,45%), снабжённого мешалкой при изменении массового модуля (отношение ДМСО : ПМ - 1:1, 2:1, 3:1, 4:1) при температуре 20 °С, частоте вращения механической мешалки $6,7 \text{ с}^{-1}$, время процесса экстракции 2 ч. После экстракции нитрамина рафинированную суспензию полимерной матрицы отфильтровывали, высушивали и взвешивали.

В маточный раствор при перемешивании добавляли воду (разбавитель) в соотношении ДМСО : вода — 1:1. Затем отфильтровали полученный циклический нитрамин, высушили и взвесили. Определяли степень извлечения по отношению фактической массы и теоретически извлекаемой массы циклического нитрамина, у извлечённого циклического нитрамина и для сравнения циклического нитрамина товарного качества был проведен дифференциально-термический анализ (ДТА) дифференциально-термическом анализаторе L81 Lenseis и сняты ИК-спектры на спектрометре Perkin Elmer Spectrum BX II FT-IR System (таблетки с KBr)

Результаты и их обсуждение. На основании результатов проведённых исследований получены зависимости степени извлечения циклического нитрамина от массового модуля (отношения ДМСО : ПМ) которые представлены на рис. 2.

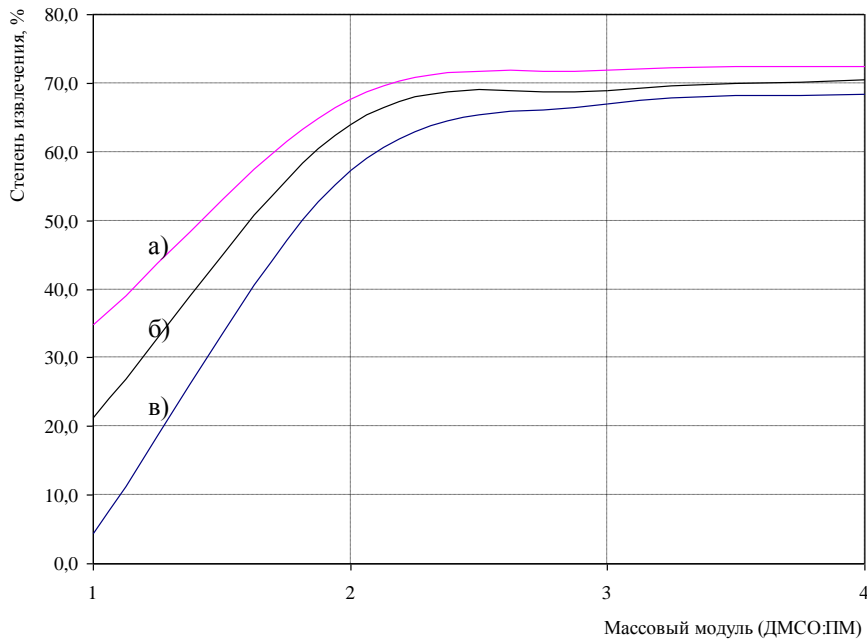


Рис. 2. Зависимость степени извлечения нитрамина от модуля (отношения ДМСО : ПМ) при различной влажности полимерной матрицы: а) 3%, б) 23,5%, в) 41,45% (частота вращения механической мешалки $6,7 \text{ с}^{-1}$, время процесса экстракции 2 ч, температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$)

В соответствии с рис. 2 наиболее предпочтительным модулем (отношением ДМСО : ПМ) является диапазон 2 – 4, как при влажности полимерной матрицы 3%, так и при влажностях 23,5%, 41,45% соответственно. Хотя степень извлечения циклического нитрамина при модуле 4 максимальна во всех случаях, но высокий расход диметилсульфоксида нивелирует это преимущество, следовательно, наиболее рациональным модулем при извлечении циклического нитрамина из полимерной матрицы с влажностью 3 – 41,45% является диапазон 2 – 3.

На рис. 3 - 4 представлены для сравнения ДТА извлечённого циклический нитрамина и циклического нитрамина товарного вида. Из данных приведенных на рис. 3 - 4 следует, что циклический нитрамин, извлеченный из ПМ (диапазон разложения $274,9\text{-}286,9 \text{ }^\circ\text{C}$) имеет сходные теплофизические параметры с товарным продуктом (диапазон разложения $275,9 - 290,3 \text{ }^\circ\text{C}$).

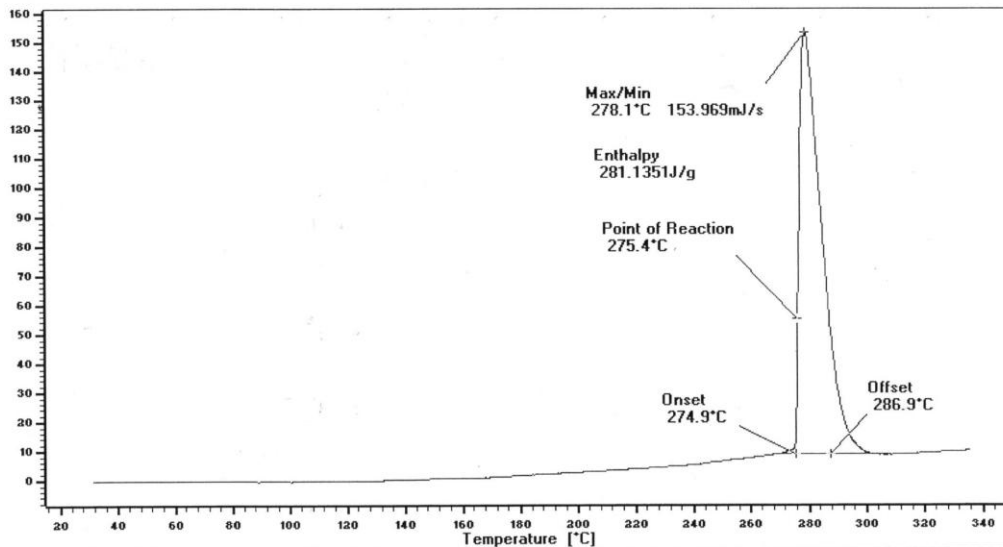


Рис. 3. Термограмма ДТА извлечённого циклического нитрамина (скорость нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$)

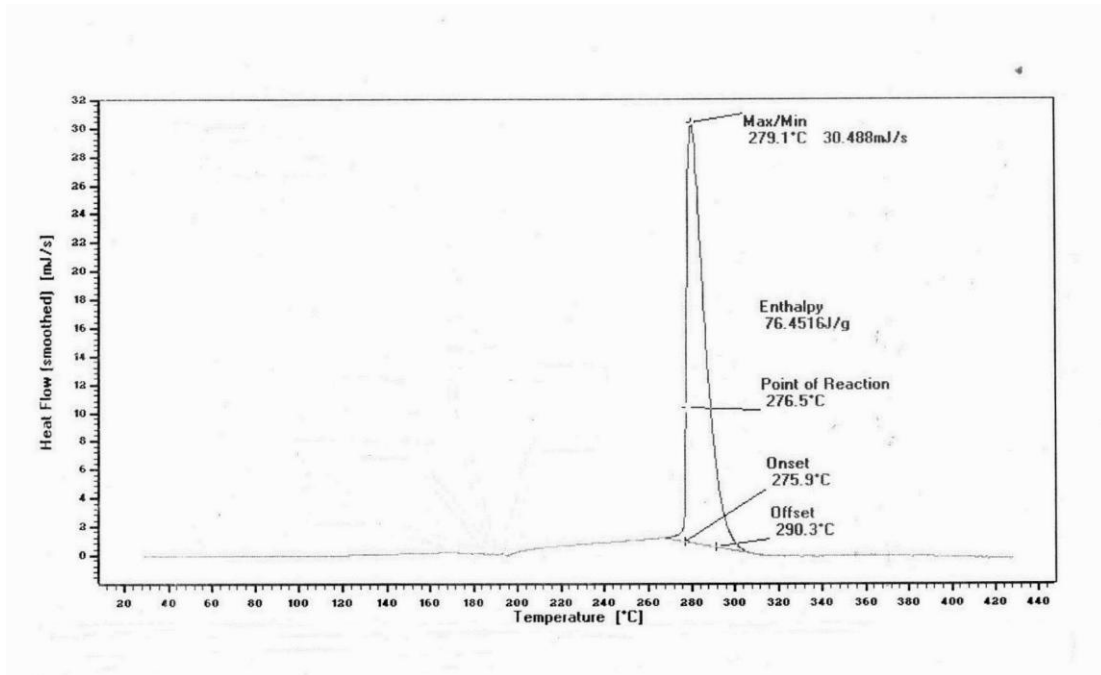


Рис. 4. Термограма ДТА товарного циклического нітраміна (скорість нагріву 10°C/мін)

На рис. 5 - 6 представлені ІК-спектри извлеченого циклического нітраміна і циклического нітраміна товарного якості відповідно.

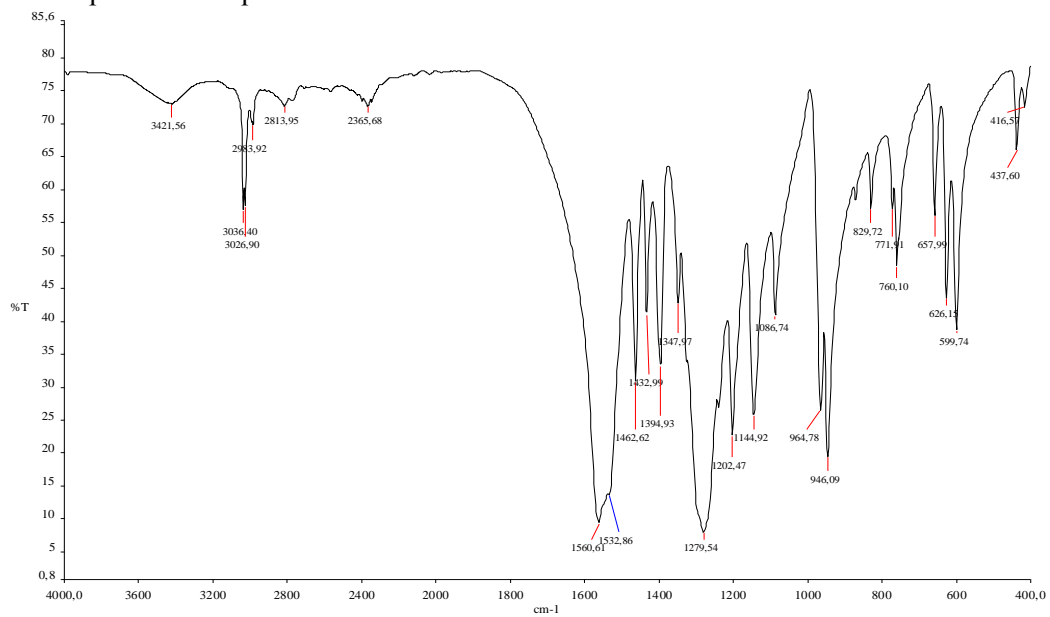


Рис. 5. ІК-спектр циклического нітраміна, извлеченого з ПМ з допомогою ДМСО

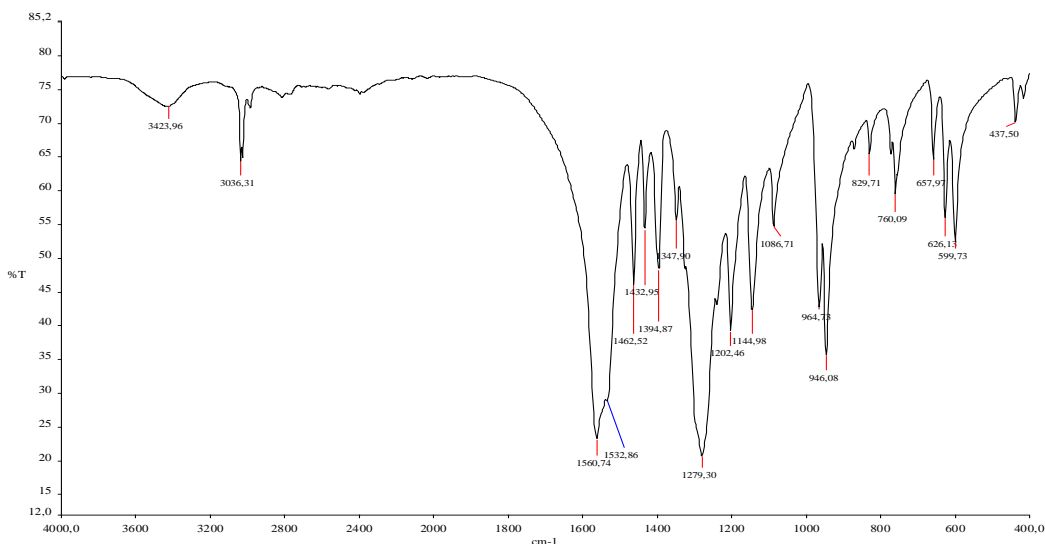


Рис. 6. ИК-спектр циклического нитрамина товарного качества

Таким образом, ИК-спектр циклического нитрамина, извлечённого из ПМ с помощью ДМСО и нитрамина товарного качества имеют аналогичные полосы поглощения 1560, 1280, 946, 760 cm^{-1} , обусловленные наличием группы N-NO_2 .

Извлечённый циклический нитрамин после его модификации возможно повторно в составе волноводов неэлектрических систем инициирования, капсулей детонаторов, в качестве высокоэнергетического вещества в составах композиционных материалов.

Рафинированная полимерная матрица может быть использована в дальнейшем как наполнитель в составах эмульсионных взрывчатых веществ.

Апробация результатов исследований. Полученные экспериментальные результаты по оптимизации процесса экстракции нитрамина позволяют уточнить режимы, откорректировать материальный баланс и послужат основой для проектирования опытно-промышленного объекта извлечения циклического нитрамина из продуктов утилизации твёрдого ракетного топлива.

Выводы. На основании проведённых экспериментов получены зависимости степени извлечения нитрамина из полимерной матрицы различной влажности от массового модуля (отношения ДМСО : ПМ). Согласно полученным результатам исследования оптимальными условиями извлечения нитрамина из полимерной матрицы являются массовый модуль 2 – 3 (отношение ДМСО : ПМ).

Максимальная степень извлечения нитрамина получена при экстракции его из полимерной матрицы с относительной влажностью 3%, частоте вращения механической мешалки 6,7 с^{-1} , времени процесса экстракции 2 ч, температуре 20 $^{\circ}\text{C}$ и составила — 71,9%.

Извлечённый продукт был идентифицирован как нитрамин методом ИК-спектроскопии и дифференциально-термического анализа.

Список литературы

1. Забелин Л.В. Основы промышленной технологии утилизации крупногабаритных твёрдотопливных зарядов [Текст] / Л.В. Забелин, Р.В. Гафиятулин, А.Н. Поник, В.Ю. Мелешко — Москва: Недра-Бизнесцентр, 2004. - 226 с.
2. Шиман Л.Н. Безопасность процессов производства и применения эмульсионных взрывчатых веществ с компонентами утилизируемых вооружений. Монография [Текст] / Л.Н. Шиман, Е.Б. Устименко, В.И. Голинько, В.В. Соболев - Днепрпетровск: ЛИРА, 2013. - 526 с.
3. Фундаментальные основы баллистического проектирования – 2014: сб. материалов 4 Всероссийской научн.-технич. конф., Санкт-Петербург 23–28 июня 2014 г. / БГТУ «Военмех». Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех», 2014.
4. Мелешко В.Ю. Утилизация твёрдотопливных ракетных двигателей. Монография [Текст] / В.Ю. Мелешко, С.И. Бурдюгов, М.А. Корепанов – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. -512 с.
5. Одинцов В.В. Совершенствование промышленных эмульсионных ВВ за счёт конверсионных компонентов [Текст] / В.В. Одинцов, В.И. Пепекин, Б.Л. Корсунский // Физическая химия, 1997. – Т. 16. - №4. С. 94 – 105.

6. Орлова Е.Ю. Октоген — термостойкое взрывчатое вещество [Текст] / Е.Ю. Орлова, Н.А. Орлова, В.Ф. Жилин – Москва: Недра, 1975. - 107 с.
7. Poulin I. Literature Review on Demilitarization of Munitions [Text] / I. Poulin Defense R&D Canada-Valcartier, Quebec, Canada. 2010.
8. Gillon J.B. Alternate use of large rocket and conventional ammunition propellants in commercial explosive applications [Text] / J.B. Gillon, G. Eck, O. Machacek // Energetic Materials Technology Proceedings, 1995. - № 680. – P. 20-25.
9. Shaw G.C. Process for the leaching of AP from propellant [Text]: Патент 4198209 США, МКИ C01D 1/30. / G.C. Shaw, R.A. Frosch (США). - №946,990; Заявл. 29.09.78; Опубл. 15.04.80; НКИ 23/302 R. – 7 с.
10. Tompa A.S. Breakdown of solid propellants and explosives, recovery of nitramines [Text]: Патент 4389265 США МКИ C06B 45/10. / A.S. Tompa, D.M. French, B.R. White (США). - № 283,709; Заявл. 16.07.81; Опубл. 21.06.83; НКИ 149/109.6. – 5 с.
11. Poehlein, S. Recovery and Reuse of HMX/RDX from Propellants and Explosives [Text] / S. Poehlein, C. Wilharm, K. Sims, D. Burch, T. Schilling. Naval Surface Warfare Center, 2002. – 160 p.
12. Melvin W.S. Method to extract and recover nitramine oxidizers from solid propellants using liquid ammonia [Text]: Патент 5284995 США МКИ C06B 21/00. / W.S. Melvin (США).- № 28,014; Заявл. 08.03.93; Опубл. 08.02.94; НКИ 588/203. – 19 с.
13. Челтонов М.М. Оптимизация процесса деструкции полимерного связующего твёрдых ракетных топлив с использованием азотной кислоты [Текст] / Челтонов М.М., Опарин С.А., Кириченко А.Л., Устименко Е.Б. // Вопросы химии и химической технологии, 2019. - №3. – С.176-180.
14. Kim K.J. Solubilities of Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine in γ -Butyrolactone + Water, Dimethylsulfoxide + Water, and N-Methyl pyrrolidone + Water [Text] / K.J. Kim, H.S. Kim, J.S. Sim // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2013, Vol. 58 (9), P. 2410-2413.
15. Ломовцева Г.А. О некоторых особенностях растворимости циклических нитрамино в органических растворителя [Текст] / Г.А. Ломовцева, Е.В. Веселова, В.Л. Збарский, Н.В. Юдин // Успехи в химии и химической технологии: сб. научных трудов, Т. XXVI , № 3 (132). – Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – С. 21-25.

Стаття надійшла до редакції 06.12.2019

УДК 678.675 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.23

О.П. Чигвинцева, О.С. Кабат, Ю.В. Бойко*Днепровский государственный аграрно-экономический университет***ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ АРОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИАМИДА ФЕНИЛОН С-1**

Проведены трибологические исследования ароматического полиамида фенилон С-1 и органоластика на его основе, армированного арамидным волокном терлон. Исследовано влияние режимов эксплуатации на процессы трения и изнашивания связующего и органоластика на его основе. Показано, что разработанный органопластик при работе в режиме трения без смазки имеет низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Ключевые слова: ароматический полиамидфенилон, органопластик, коэффициент трения, интенсивность линейного износа

O.P. Chigvintseva, O.S. Kabat, Yu.V. Boyko*Dnipro State University of Agriculture and Economics***STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ORGANOPLASTIC BASED AROMATIC POLYAMIDES PHENYLONE C-1**

Tribological studies of the aromatic polyamide phenyl C-1 and organoplastic based on it, aramid fiber reinforced terlon in the amount of 15 mas % were carried out. It has been established that reinforcing C-1 phenylone with terlon fiber makes it possible to obtain antifriction material with a low coefficient of friction. In the entire studied load range, the maximum decrease in the coefficient of friction (by 54%) was characteristic of organoplastic, tested at a sliding speed of 1.5 m/s as compared with the binder. The nature of intensity of linear wear change of the materials was identical: at a sliding speed of 1 m/s, the indicator of C-1 phenylone samples and organoplastic increased throughout the load interval, under more stringent tests ($v = 1.5$ m/s, $P = 0.8$ MPa, as well as $v = 2.0$ m/s, $P = 0.5-0.8$ MPa), the polyamide binder and organoplastic catastrophically wore out and lost their performance. In general, the studied materials can be stably operated at sliding speeds of 1 and 1.5 MPa in the load interval 0.2-0.65 MPa.

Key words: aromatic polyamide phenylone, organoplastic, friction coefficient, intensity of linear wear

О.П. Чигвинцева, О.С. Кабат, Ю.В. Бойко*Дніпровський державний аграрно-економічний університет***ВИВЧЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОРГАНОПЛАСТИКА НА ОСНОВІ АРОМАТИЧНОГО ПОЛІАМІДУ ФЕНІЛОН С-1**

Проведені трибологічні дослідження ароматичного поліаміду фенілон С-1 і органоластика на його основі, армованого арамідним волокном терлон. Досліджено вплив режимів експлуатації на процеси тертя і зносу в'язучого і органоластика на його основі. Показано, що розроблений органопластик при роботі в режимі тертя без змащування має низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість.

Ключові слова: ароматичний поліамід фенілон, органопластик, коефіцієнт тертя, інтенсивність лінійного зносу

Развитие современной промышленности неразрывно связано с применением в конструкциях машин и механизмов новых полимерных композиционных материалов. Полимерные композиционные материалы обладают ценным комплексом эксплуатационных характеристик, наиболее важными из которых являются низкая плотность, высокие удельная прочность и жесткость, возможность эксплуатации в широком интервале температур и в условиях действия знакопеременных нагрузок, коррозионная стойкость и способность выдерживать длительные статические и динамические нагрузки.

Наиболее перспективным способом улучшения трибологических свойств полимерных композиционных материалов является армирование их химическими волокнами. Химические волокна обладают высоким модулем упругости, хорошей устойчивостью к воздействию температуры, химически активных сред, высокой усталостной прочностью, низким коэффициентом трения, в связи с чем широко используются для армирования полимеров.

Благодаря ценному комплексу свойств в последнее время для армирования полимерных связующих широко используют высокопрочные арамидные волокна. Указанные волокнистые наполнители отличаются высокой стабильностью размеров (не имеют усадки как в сухом, так и во влажном состоянии вплоть до 160°C), хорошими термическими характеристиками (их можно эксплуатировать при температуре от -100°C до +180°C), в обычных условиях они негорючи и устойчивы к воздействию различных химических веществ. Сочетание высокой прочности, вязкости разрушения, термостойкости с низкой плотностью позволяет использовать эффективно

органопластики на основе арамидных волокон в конструкциях машин и механизмов гражданского и специального назначения [1, 2].

С целью создания органопластика с улучшенными трибологическими свойствами ароматический сополиамидфенилон С-1 (ТУ 6-05-221-10)[3, 4] армировали арамидным волокном марки терлон в количестве 15 мас. %. Арамидное волокно терлон отличается высокими показателями прочности и модуля упругости, способно эксплуатироваться в широком температурном интервале (от 23 до 548 К), имеет высокую удельную прочность на разрыв при малом весе, повышенную устойчивость к многократной деформации, низкую термическую усадку и электропроводность, а также отличную химическую стойкость [5].

Оценка работоспособности полимерных композиционных материалов в условиях трения достаточно сложна в связи с большим разнообразием условий работы подвижных сочленений машин. Данные предварительных трибологических исследований, позволяющие определить степень изменения коэффициента трения и износа материала при различных нагрузках и скоростях скольжения, дает возможность определить оптимальные режимы эксплуатации полимерных композитов.

Изучение процессов трения и износа фенилона С-1 и органопластика на его основе осуществлялось на дисковой машине трения в режиме трения, путь трения составлял 1000 м. В качестве контртела использовали диск, изготовленный из стали 45 (ГОСТ 1050-74), термообработанный до твердости 45-48 HRC с шероховатостью поверхности $R_a = 0,16-0,32$ мкм.

Коэффициент трения f определялся по формуле:

$$f = \frac{(F_1 + F_2)}{N} \quad (1)$$

где N – нормальная нагрузка на образец; F_1 – сила трения исследуемого образца; F_2 – потери, возникающие при повороте рычага в горизонтальной плоскости.

Износ образцов определялся весовым методом на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,0001 г. За основную инженерную характеристику процесса износа согласно [6], принимали интенсивность линейного износа I_h , которая рассчитывалась согласно соотношению:

$$I_h = \frac{\lambda}{\rho_T} \cdot \frac{dG}{(A_a \cdot dL_T)} \quad (2)$$

Где G – величина весового износа; L_T – путь трения, м; A_a – номинальная площадь контакта; ρ_T – плотность исследованного образца, $\lambda = A_a / A_m$, A_m – номинальная площадь трения. В ходе исследований принимали $\lambda = 1$, т.е. рассматривали износ тела, все точки которого постоянно находятся в контакте.

Результаты трибологических исследований свидетельствуют о том, что с возрастанием нагрузочного режима от 0,2 до 0,8 МПа коэффициент трения фенилона С-1 и органопластика на его основе снижался при всех исследуемых скоростях скольжения (рис. 1а, б, в). По видимому, это можно объяснить, с одной стороны, сокращением времени фрикционной связи полимерный образец – стальное контртело, а с другой – увеличением тангенциально составляющей скорости скольжения, что обеспечивало эффективное удаление частиц износа из зоны трения [7].

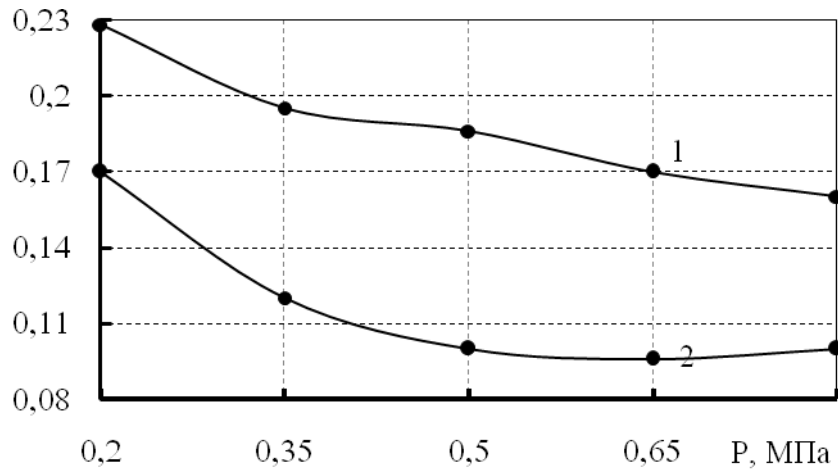
Наиболее работоспособным оказался полимерный образец фенилона С-1, испытанный при минимальном скорости скольжения ($v = 1$ м/с): в этих условиях коэффициент трения материала снизился от 0,23 до 0,16; при скорости скольжения 2 м/с полимер стабильно эксплуатировался только при нагрузках 0,2 и 0,35 МПа, а затем начал катастрофически изнашиваться, вследствие чего коэффициент трения определить не удалось. Аналогичная картина наблюдалась и для органопластика: при испытаниях в условиях скорости скольжения $v = 1$ м/с коэффициент трения снижался от 0,17 до 0,1, а при $v = 2$ м/с, несмотря на низкий коэффициент трения, образец органопластика терял свою работоспособность и разрушался. Таким образом, исследованные материалы могут стабильно эксплуатироваться при скоростях скольжения 1 и 1,5 м/с в интервале нагрузок 0,2-0,65 МПа [8, 9].

Сравнительный анализ результатов трибологических исследований показал, что при испытаниях образцов в условиях скорости скольжения $v = 1$ м/с коэффициент трения органопластика с ростом нагрузки уменьшался более существенно (на 41%) по сравнению с исходным полимером, для которого падение коэффициента трения составило 30% (рис. 1а). Увеличение скорости скольжения до $v = 1,5$ м/с при $P = 0,2-0,8$ МПа (рис. 1б) способствовало существенному снижению коэффициента трения органопластика (на 54%), что было более, чем в 2 раза выше, чем для связующего. При скорости скольжения 2 м/с (рис. 1в) с ужесточением

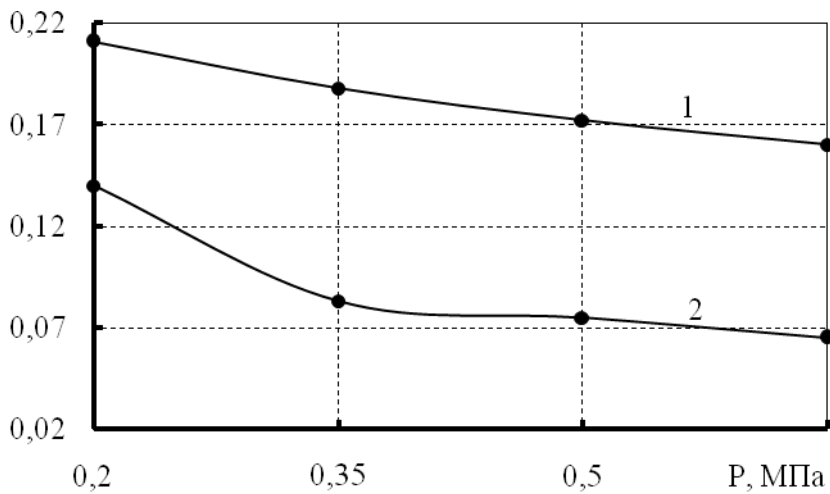
нагрузочного режима коэффициент трения фенилона С-1 изменялся незначительно и находился в пределах 0,18-0,16, в то время как для органопластика он имел значения в 2 раза ниже(0,09-0,08).

В целом, судя по результатам трибологических исследований, следует заключить, что армирование ароматического полиамида фенилон С-1 арамидным волокном терлон позволяет получить материал антифрикционного назначения с низким коэффициентом трения (0,08-0,17) независимо от режимов эксплуатации.

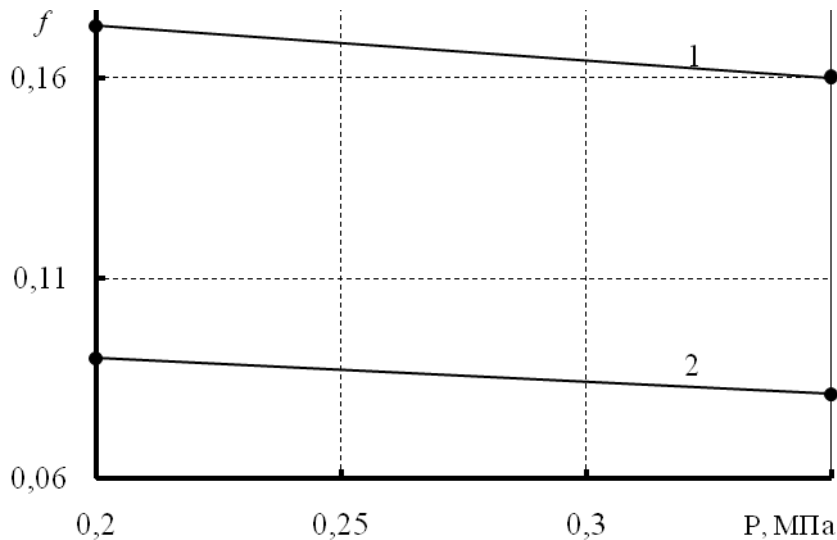
Что касается изменения интенсивности линейного изнашивания(табл. 1), то здесь проявлялась общая тенденция: при скорости скольжения 1 м/с указанный показатель образцов фенилона С-1 и органопластика возрастал во всем интервале нагрузок, в условиях более жестких испытаний



а



б



В

Рис. 1. Влияние удельного давления на коэффициент трения фенилона С-1 (1) и органопластика на его основе (2), испытанных в условиях сухого трения при скоростях скольжения 1,0 (а), 1,5 (б) и 2 м/с (в)

Таблица 1

Влияние режимов эксплуатации на интенсивность линейного износа ароматического полиамида фенилон С-1 и органопластика на его основе, $I_h \times 10^{-8}$

Скорость скольжения, м/с	Удельное давление, МПа				
	0,2	0,35	0,5	0,65	0,8
Фенилон С-1					
1,0	1,3	1,9	4,2	5,9	13
1,5	1,5	2,7	5,6	23	–
2,0	1,8	3,0	–	–	–
Органопластик					
1,0	0,52	0,96	1,7	1,9	18
1,5	0,78	1,41	4,9	12	–
2,0	1,32	2,42	–	–	–

($v = 1,5$ м/с, $P = 0,8$ МПа, а также $v = 2,0$ м/с, $P = 0,5-0,8$ МПа) полиамидное связующее и органопластик катастрофически изнашивались и теряли свою работоспособность. Последнее, очевидно, можно объяснить тем, что в этих условиях в зоне трения развивается температура, близкая к температуре размягчения полимеров, что приводит к схватыванию полимерных материалов с контртелом и, как следствие, к увеличению коэффициента трения и интенсификации процессов износа пластиков [7]. Обращает на себя внимание тот факт, что если при испытаниях при $P = 0,2-0,65$ МПа в условиях скорости скольжения $v = 1,0$ интенсивность линейного износа связующего и органопластика увеличилась в среднем в 3,5-4 раза, то при $v = 1,5$ м/с она возросла более, чем в 5 раз.

Анализ поверхности контртела после испытаний образцов фенилона С-1 и органопластика на его основе свидетельствовал о наличии на ней плотной пленки, состоящей из мелкодисперсных продуктов трибодеструкции. Образование поверхностной пленки, вероятно, было вызвано тем, что в результате повышения температуры в зоне контакта полимерный образец – контртело возросли адгезионные силы между полимерным материалом и стальным диском. В целом, образцы полиамидного связующего и органопластика изнашивались по псевдоупругому механизму (рис. 2): в процессе износа создавались мелкодисперсные продукты износа, которые накапливались на поверхности стального диска, в результате чего трение полимерных материалов

в процессе исследований осуществлялось не по поверхности стального контртела, а по продуктам износа[8].

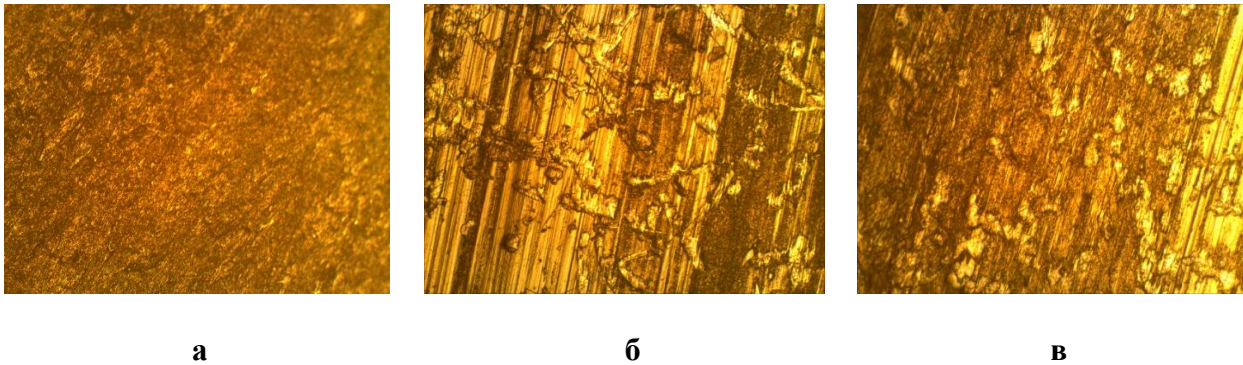


Рис. 2. Микроструктура поверхні трення образців фенілона С-1 (а) і органічного пластику на його основі, армірованого 15 мас. % волокна терлон (б), испытанных при скорости скольжения 1 м/с и удельной нагрузке 0,65 МПа. Увеличение × 180

Учитывая вышеизложенное, следует заключить, что армирование ароматического полиамида фенилон С-1 арамидным волокном терлон позволяет получить износостойкий материал антифрикционного назначения.

Максимальное снижение коэффициента трения (на 50%) и интенсивности линейного износа (более, чем в 5 раз) наблюдалось при исследованиях в условиях скорости скольжения 1,5 м/с и нагрузках 0,2-0,65 МПа.

В целом, исследованные материалы могут стабильно эксплуатироваться при скоростях скольжения, не превышающих 2 м/с, и нагрузках – не более 0,65 МПа.

Список использованных источников:

1. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные КМ. СПб: Научные основы и технологии, 2008. – 332 с.
2. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты // СПб: Научные основы и технологии. – 2009. – 380 с.
3. Соколов Л.Б. Термостойкие и высокопрочные полимерные материалы. – М.: Знание, 1984. – 64 с.
4. Соколов Л.Б., Герасимов В.Д., Савинов В.Д., Беляков В.К. Термостойкие ароматические полиамиды. – М.: Химия, 1975. – 256 с.
5. Таблица-вклейка. Термостойкие и жаростойкие волокна // Химические волокна. – 1975. – № 3.
6. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение. – 1968. – 480 с.
7. Бартнев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия. – 1972. – 240 с.
8. Чигвинцева О.П., Рула И.В., Бойко Ю.В. Изучение термических и трибологических свойств ароматических полиамидов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк. – Випуск 65 – 2019 – С. 274-280.
9. Tribological properties of aromatic polyamide phenylon C-1 / O.P.Chigvintseva, O.S. Kabat, I.V. Rula, Yu.V.Boyko // Materials of XIV International Research and Practice Conference “Conduct of Modern Science-2018”, November 30-December 7, 2018, Science and Education Ltd, Sheffield, UK, P. 8-10.

Рецензенты:

А.Д. Деркач, зав. кафедрой “Эксплуатация Днепропетровского государственного аграрно-экономического университета, к.т.н., доцент машино-тракторного парка”

В.И. Сытар, профессор кафедры инновационной инженерии ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»

Стаття надійшла до редакції 13.12.2019

УДК 620.197.3 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.24

Г.В. Чумало¹, Є.В. Харченко², А.О. Кичма², В.М. Палюх²¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України²Національний університет «Львівська політехніка»**ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ СІРКОВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩ НА ШВИДКІСТЬ КОРОЗІЇ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ**

Досліджено вплив складу середовища, його температури і тиску на швидкість корозії трубних сталей P-105, сталі 20 і, для порівняння, листової сталі 20. Показано, що в інтенсивно перемішуваному хлоридному середовищі з домішками H₂S і CO₂ швидкість корозії низьколегованих сталей у рідинній фазі вища, ніж у парогазовій: за температури 25 °С – у 2 рази, за температури 60 °С – у 3 рази, а за температури 95 °С – у 4 рази. Встановлено, що найбільш корозійнотривкими є листові і трубна сталь 20, а найменш тривкою – сталь P-105. Показано, що сталь 20 схильна до поверхневого пухиріння, на відміну від сталі P-105, яка є стійкою до цього виду руйнування.

Ключові слова: трубна сталь, середовище, швидкість корозії

Рис. 4. Табл.1. Літ.5

Г.В. Чумало¹, Є.В. Харченко², А.О. Кичма², В.М. Палюх²¹Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины²Национальный университет «Львовская политехника»**ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ СЕРОВОДОРОДНОЙ СРЕДЫ НА СКОРОСТЬ КОРРОЗИИ ТРУБНОЙ СТАЛИ**

Исследовано влияние состава среды, его температуры и давления на скорость коррозии трубных сталей P-105, стали 20 и, для сравнения, листовой стали 20. Показано, что в интенсивно перемешиваемой хлоридной среде с примесями H₂S и CO₂ скорость коррозии сталей в жидкой фазе выше, чем в парогазовой: при температуре 25 °С - в 2 раза, при температуре 60 °С - в 3 раза, а при температуре 95 °С - в 4 раза. Установлено, что наиболее коррозионностойкими являются листовая и трубная стали 20, а наименее коррозионностойкой - сталь P-105. Показано, что сталь 20 склонна к поверхностному вздутию (пузырение), в отличие от стали P-105, которая является устойчивой к этому виду разрушения.

Ключевые слова: трубная сталь, среда, скорость коррозии

Рис. 4. Табл.1. Лит.5

H.V. Chumalo¹, Ye.V. Kharchenko², A.O. Kychma², V.V. Palyukh²¹Karpenko Phisico –Mechanical Institute of NAS of Ukraine²National University "Lviv Polytechnic"**LABORATORY STUDIES OF THE INFLUENCE OF WORKING PARAMETERS OF HYDROGEN SULFIDE ENVIRONMENT ON PIPE STEEL CORROSION RATE**

The influence of the composition of the medium, its temperature and pressure on the corrosion rate of the P-105 and 20 tubes steels and, for comparison, 20 sheet steel, was investigated. It is shown that in intensely stirred chloride medium with H₂S and CO₂ admixtures, the corrosion rate of steels in the liquid phase is higher than in gas-vapor: at 25 °C – twice, at 60 °C - 3 times, and at 95 °C - 4 times. It is established that the most corrosion-resistant are 20 sheet and pipe steels and the least corrosion-resistant - P-105 steel. It is shown that 20 steel is susceptible to surface blistering, unlike P-105 steel, which is resistant to this type of destruction

Keywords: pipe steel, medium, corrosion rate

Fig. 4. Tabl.1. Ref.5

Постановка проблеми. Проблему надійності діючого обладнання підприємств нафтогазового комплексу неможливо вирішити без використання для їх облаштування матеріалів з високою опірністю корозійному руйнуванню та належного протикорозійного захисту обладнання. Особливої актуальності ці питання набувають тоді, коли технологічні продукти газових родовищ містять такі корозивні компоненти як сірководень, меркаптанові сполуки, вуглекислий газ. Сірководень та вуглекислий газ є надзвичайно агресивними агентами, що спричиняють корозійні та корозійно-механічні руйнування обладнання [1-5]. В першу чергу це стосується найбільш його матеріаломісткої частини – трубопроводів різного призначення, які виготовляють переважно з вуглецевих та низьколегованих сталей. Вибір матеріалів визначається їх механічними властивостями та даними про корозійну тривкість і опірність корозійному розтріскуванню в технологічних середовищах, які частково отримують з досвіду експлуатації, а на стадії проектування – переважно на підставі лабораторних досліджень, чого, однак, недостатньо для прогнозування працездатності обладнання в натурних умовах. Тому дослідження, проведені в умовах максимально наближених до експлуатаційних: у потоці мінералізованих водних розчинів,

водно-вуглеводневих емульсій, газового конденсату з контрольованим вмістом сірководню, у рідинній та парогазових фазах цих середовищ за певних температур, тиску та швидкості потоку є дуже актуальні.

Мета роботи – Дослідити залежність швидкості корозії трубних сталей від складу середовища, його температури та тиску в умовах, наближених до експлуатаційних.

Матеріали та методика експерименту. Досліджували вплив складу середовища, його температури і тиску на швидкість корозії трубних сталей Р-105, сталі 20 і, для порівняння, листової сталі 20 (табл. 1). За хімічним складом трубна і листовая сталь 20 не відрізняються, лише у трубній сталі вміст сірки становить $\leq 0,025\%$, а у листовій – $\leq 0,04\%$. Дослідження проводили у лабораторному автоклаві АКЕК – ТТ за температур 25, 60, 95 С і тискові 0,5 МПа при інтенсивному перемішуванні рідинної фази (3м/с).

Таблиця 1

Хімічний склад та механічні властивості сталей

Марка сталі	Вміст елементів, % мас								Механічні властивості	
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	σ_b	$\sigma_{0,2}$
									МПа	
Сталь 20 (труб.)	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	$\leq 0,025$	$\leq 0,04$	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	0,25	350	175
Сталь Р-105	0,3	0,2	0,66	0,04	0,03	0,25	0,2	–	≥ 827	724...930

Випробувальними середовищами служили:

- 5%-й р-н NaCl+0,5% CH₃COOH;
- 5%-й р-н NaCl + 0,5% CH₃COOH+H₂S (р-н NACE);
- 5%-й р-н NaCl+0,5% CH₃COOH+H₂S+CO₂+гас (об'ємне співвідношення 3 : 1).

Під час експериментів внутрішній об'єм автоклава заповнювали на 50 % рідиною. Зразки досліджуваних матеріалів закріплювали у струбці на різній висоті від дна корпусу автоклава. Це дало змогу досліджувати зразки матеріалів у рідинній та парогазовій фазах робочого середовища. Після заповнення робочим розчином автоклав герметизували. Попередню дегазацію рідини та продування незаповненого нею об'єму автоклава проводили газом (аргон або сірководень) через дренажну трубку. Тривалість випробувань – 20 год. Кількість зразків на одне випробування – 3.

Використовували зразки розміром 30×20×3 мм. Безпосередньо перед дослідженнями шліфовані до чистоти поверхні $\leq 0,8$ мкм зразки знежирювали ацетоном, висушували, зважували і зберігали в ексікаторі. Після закінчення досліду зразки промивали, знежирювали, механічно гумовим кругом знімали продукти корозії, знову знежирювали та зважували. Швидкість корозії ($V_{кор}$) підраховували за формулою:

$$V_{кор} = 8,76 \cdot \frac{\Delta m}{\tau \cdot S \cdot \rho}, \text{ мм/рік};$$

де Δm - втрата маси зразка, г; τ - час випробування, год; S - площа зразка, м²; ρ - густина металу, г/см³.

Результати дослідження. У парогазовій фазі 5%-ного розчину NaCl+0,5 % CH₃COOH за температур 25, 60, 95 °С швидкості корозії сталей суттєво не відрізняються (рис. 1, кр. 1-3). Натомість у рідинній фазі корозійна тривкість досліджуваних сталей різна. Найтривкішою виявилась листовая сталь 20 (рис. 1, кр. 3'), а найменш тривкою – трубна сталь 20 (рис. 1 кр. 2'). Сталь Р-105 за швидкістю корозії займає проміжне місце. Поверхні досліджуваних зразків сталей як в парогазовій, так і у рідинній фазі уражалися суцільною корозією.

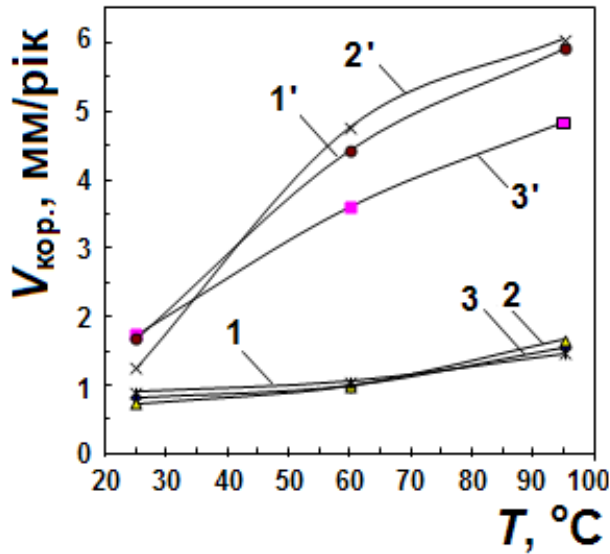


Рис. 1. – Вплив температури на швидкість корозії низьколегованих сталей у парогазовій (1 - 3) та рідинній (1' - 3') фазах 5%-го р-ну NaCl + 0,5% CH₃COOH:
 1, 1' – сталь Р-105;
 2, 2' – трубна сталь 20;
 3, 3' – листовая сталь 20.
 Тиск – 0,5 МПа.

У сірководневому розчині NACE (5%-ий розчин NaCl+0,5 % CH₃COOH + H₂S, pH 3...4) за тиску 0,5 МПа температурні залежності швидкостей корозії мають експоненційний характер (рис. 2). У парогазовій фазі швидкість корозії сталей змінювалася від 1,02 мм/рік за температури 25 °С до 4,58 мм/рік за температури 95 °С, що у 2 рази перевищує швидкість корозії у середовищах без сірководню (рис.1). У рідинній фазі швидкість корозії усіх сталей із підвищенням температури від 25 до 60 °С змінюється мало і лише за температури понад 60 °С вона різко зростає: наприклад, для сталі Р-105 у 3 рази (рис.2, кр. 1'), а для листової сталі 20 у 2 рази (рис. 2, кр. 3').

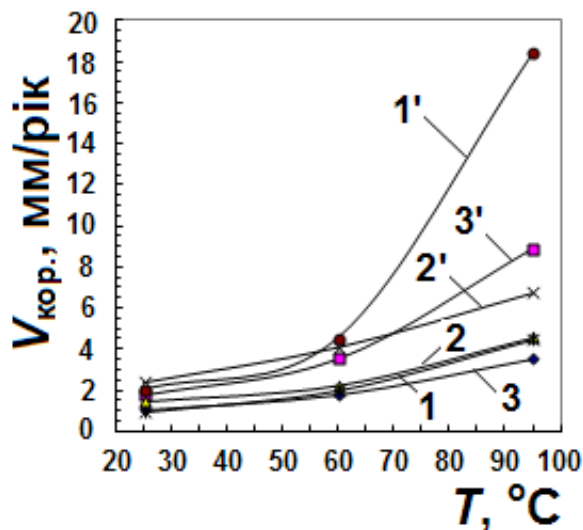


Рис 2. – Вплив температури на швидкість корозії низьколегованих сталей у парогазовій (1 - 3) та рідинній (1' - 3') фазах розчину NACE:
 1, 1' – сталь Р-105;
 2, 2' – трубна сталь 20;
 3, 3' – листовая сталь 20.
 Тиск – 0,5 МПа.

Корозійна тривкість в середовищі NACE найвища у листової сталі 20, найнижча – у сталі Р-105. На зразках трубної і листової сталі 20, випробуваних у рідинній фазі, виявлено поверхневі пухирі діаметром до 3 мм (рис. 3); у сталі Р-105 пухирі не утворилися. У парогазовій фазі поверхневого пухиріння не виявлено для жодної сталі. На зразках сталі 20, випробуваних за температури 95°С у рідинній фазі, виявлено поверхневі відшарування.

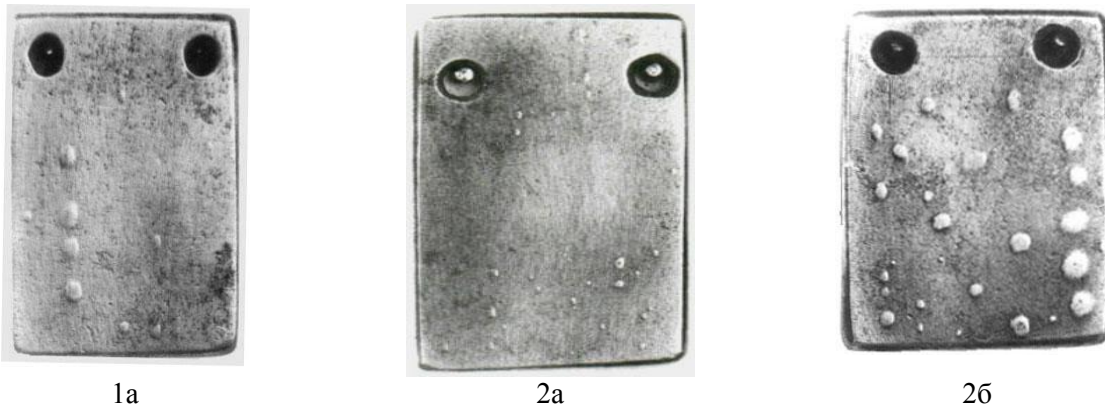


Рис.3. – Зразки трубної (1) і листової (2) сталі після 20 год. випробувань у розчині NACE за температур 60 °С (а) і 95 °С (б).

Для повнішої імітації умов роботи матеріалів нафтогазовидобувного обладнання, яке працює в середовищах з домішками H_2S і CO_2 проведено корозійні дослідження у водно-вуглеводневому середовищі. Водна складова середовища – 5%-й р-н $NaCl$ + 0,5% CH_3COOH , вуглеводнева – газ, об'ємне співвідношення компонентів 3 : 1.

При введенні у випробувальне середовище вуглеводневого компонента – газу у співвідношенні 3 : 1 корозійна тривкість трубної і листової сталі 20 не змінилась за температур 25 °С і 60 °С, а для сталі Р-105 – зменшилась у 1,5 раза (рис. 4, кр.1).

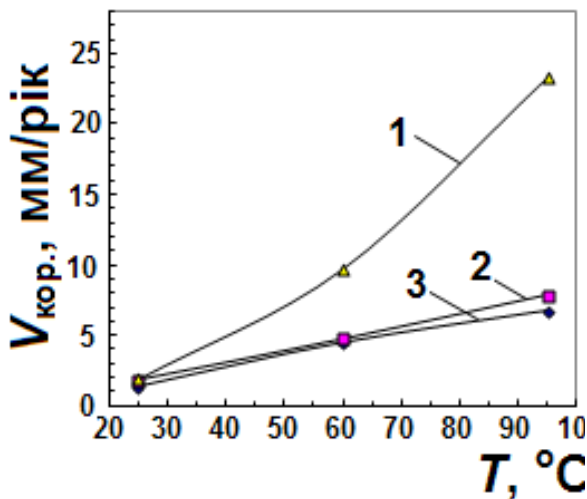


Рис.4. – Вплив температури на швидкість корозії низьколегованих сталей у рідинній фазі розчину NACE+ H_2S + CO_2 +газ:
1 – сталь Р-105;
2 – трубна сталь 20;
3 – листовая сталь 20.

У цьому середовищі найнижчу корозійну тривкість має сталь Р-105, особливо за підвищених температур. Корозійна тривкість сталі 20 у 2-3 рази вища, ніж сталі Р-105 (рис. 4).

Висновки.

Отже, підсумовуючи, відзначимо, що в інтенсивно перемішуваному хлоридному середовищі з домішками H_2S і CO_2 швидкість корозії низьколегованих сталей у рідинній фазі вища, ніж у парогазовій: за температури 25 °С – у 2 рази, за температури 60 °С – у 3 рази, а за температури 95 °С – у 4 рази. У більшості випадків залежність швидкості корозії від температури експоненційна. Серед досліджених сталей найбільш корозійнотривкими виявились листовая і трубна сталь 20, а найменш тривкою – сталь Р-105. Проте сталь 20 виявляє схильність до поверхневого пухиріння, на відміну від сталі Р-105, яка є стійкою до цього виду руйнування. Тому сталь Р-105 можна використовувати у нафтогазовій промисловості, застосувавши засоби захисту від загальної корозії, наприклад, інгібітори.

Література:

1. Myroslav Khoma and Halyna Chumalo. Effect of Hydrogen Sulfide Environment on the Serviceability of Structural Materials for Oil and Gas Equipment // Innovations in Corrosion and Material Science. – 2014 –№ 4.– P 1 – 4.
2. NACE Standard MR-0175-96. Standard Material Requirements Sulfide Stress Cracking Resistance Metallic Materials for Oilfield Equipment.- Houston, Tx.: National Association of corrosion Engineers (NACE). – 1996. – 30 p.
3. Дослідження працездатності насосно-компресорних труб зі сталі групи міцності К /О.І, Радкевич, Г. В. Чумало, Р.М. Юркевич, А.В. Василик, І.М. Антошак // Фіз.- хім. механіка матеріалів.–2005.– № 1 С.109–110.
4. Мирослав Хома, Галина Чумало. Вплив сірководневого середовища на роботоздатність конструкційних матеріалів нафтогазовидобувного обладнання // Зб. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій під заг. ред. В.В. Панасюка – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2014 – С. 716 – 719.
5. Радкевич О., Чумало Г., Юркевич Р., Антошак І. Роботоздатність конструкційних матеріалів деталей фонтанної та запірної арматури нафтогазовидобувного обладнання у сірководневостійкому виконанні / Машинознавство.– 2013 – №№ 3–4 – С. 32 –39.

Рецензенти:

Білий Левко Михайлович - старший науковий співробітник відділу фізико – хімічних методів протикорозійного захисту металів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, канд. техн. наук.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2019

УДК 681.3.093:044.3 DOI 10.36910/6775.24153966.2019.68.25

В.С. Яременко, А.С. Худяков*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***МОДЕЛЬ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СЕМАНТИЧНОГО АНАЛІЗУ ТЕКСТІВ**

У даній роботі запропоновано підхід до аналізу тексту та отримання інформації з нього використовуючи знання про моделі лексичної мови. Була запропонована модель мультиагентної системи, що дає можливість паралельно обробляти текстові документи та виконує семантичну обробку тексту. Запропоновано модель опису процесу видобутку інформації за допомогою системи покриття тексту.

Ключові слова: Мультиагентні системи, глибинне навчання, інтелектуальний аналіз тексту, обробка великих масивів текстових даних.

В.С. Яременко, А.С. Худяков**МОДЕЛЬ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ**

В этой работе предложен подход для глубокого обучения текста и получения из него информации на основании знаний о моделях лексического языка. Была создана мультиагентная система, которая дает возможность параллельной обработки текстовых документов и выполняет семантический анализ текста. Также предложена модель описания процесса добычи информации с помощью использования системы покрытия текста

Ключевые слова: Мультиагентные системы, глубокое обучение, интеллектуальный анализ текста, обработка больших массивов текстовых данных.

V.S. Yaremenko, A.S. Khudiakov**MODEL OF MULTIAGENT SYSTEM FOR SEMANTIC TEXT ANALYSIS**

The approach to the deep text analysis and mining information on the basis of knowledge about the model of lexical language is proposed. A model for describing the process of extracting information using a system of text processing is proposed. This model enables parallel processing of text documents. With this system, we can improve the process that analysis a text document as a whole, and it does execute semantic analysis as well. The most significant advantage of using a multiagent system is the ability to simultaneously process a text document, and this system can also help to remove repetitions from the text. The downside is that during the process, the algorithm generates multiple agent conversations, as well as breaking existing connections and establishing new ones. This behavior of the model requires a considerable amount of computing resources. The model receives a text document. The result of the model is the object coverage of the text. The set of information objects received is subsequently refined and a resulting set of objects is formed that describes the content of the document in terms of the ontology of the subject area. All the knowledge used in this approach is, to one degree or another, based on a domain model that captures the concepts and relationships of interest to the user of the system in the form of an ontology. Thus, the ontology determines what kind of information should be extracted from the available data sources. The results of each stage of processing are projected onto text, which allows to interpret the obtained results clearly and to distinguish fragments that are contextually related to each element of the received information.

Keywords: Multiagent systems, deep learning, intellectual text mining, processing large text data arrays.

Постановка проблеми. Розробка методів розпаралелювання процесу обробки текстів стає все більш актуальною в зв'язку з наростанням обсягів текстових даних, в тому числі на інтернет-сайтах. Найдовшим етапом обробки тексту є його концептуальний або семантичний аналіз і саме для даного етапу має сенс у першу чергу застосовувати засоби інтелектуальної багатопотокової оптимізації.

Одним із засобів організації процесу паралельної обробки даних є мультиагентні системи. Вони використовуються в тому числі, і для обробки текстів природною мовою [2,3] і вилучення інформації з мережі Інтернет [4].

Мультиагентна система передбачає наявність співтовариства автономно діючих агентів. Однак у переважній більшості робіт з даної тематики агенти є сутностями, які швидше направляють потоки даних, використовуючи для їх обробки стандартні алгоритмічні модулі, ніж безпосередньо реалізують їх обробку. Тим самим, мультиагентний підхід застосовується до організації процесу обробки текстів у цілому, але не зачіпає безпосередньо семантичний аналіз, який все одно реалізується послідовно, і, отже, істотного виграшу в продуктивності досягатися не може.

Виклад основного матеріалу дослідження. Найважливіша причина використання мультиагентних систем при проектуванні інформаційної системи полягає в тому, що деякі доменні області цього вимагають. Зокрема, якщо є різні люди чи організації з різними (можливо,

суперечливими) цілями та власною інформацією, то для їх взаємодії потрібна мультиагентна система. Навіть якщо кожна організація хоче моделювати свої внутрішні справи за допомогою єдиної системи, організації не дадуть повноважень жодній окремій особі будувати систему, яка представляє їх усіх: різним організаціям знадобляться власні системи, що відображають їх можливості та пріоритети [7].

Модель знань в даній статті розглядається в двох аспектах. По-перше, модель даних/інформації, яка використовується в процесі породження знань з текстових джерел. Результати кожного етапу обробки проєктуються на текст, що дозволяє наочно інтерпретувати отримані результати і виділяти фрагменти, контекстно пов'язані з кожним елементом отриманої інформації

По-друге, модель знань про контекст, в рамках якого здійснюється обробка тексту. До таких знань відносяться словники предметної лексики, моделі фактів, що описують способи вираження інформації, прийняті в даній області знань, а також знання про типи та жанри, розглянутих текстових джерел і предметні знання, які вже є в базі даних, наприклад, отримані раніше під час обробки інших джерел.

Всі знання, які використовуються в даному підході, в тій чи іншій мірі спираються на модель предметної області, яка фіксує поняття і відносини, що цікавлять користувача системи, у вигляді онтології. Таким чином, онтологія визначає, яку саме інформацію слід витягати з доступних джерел даних.

Особливістю розвиваючого підходу до вилучення інформації з тексту є застосування знань стосовно предметної області (ПО) та переважне використання лексико-семантичної інформації, що не виключає застосування часткового синтаксичного аналізу і синтаксичних обмежень, що накладаються на семантичний каркас концептуальних схем фактів.

Семантико-синтаксичні моделі. Одним із способів опису синтаксису мови є підхід, в основі якого лежать так звані моделі управління. Суть цього підходу полягає у встановленні відповідності лексемі або групі однотипних лексем деякого правила, яке описує необхідні селективні ознаки пов'язаних слів (валентності).

Семантико-синтаксична модель обмежує синтаксичну сполучуваність і узгодженість граматичних і семантичних ознак термінів (вершин синтаксичних груп) відповідно до правил узгодження і управління. Такі моделі описуються у вигляді актантної структури, пов'язаної з однією або декількома узагальненими лексемами [5]. Під узагальненою лексемою розуміється або термін словника (або його форма), або група лексем, описаних в термінах граматичних і семантичних категорій без вказівки нормальної форми. Актантна структура описує набір актантів, що характеризують відповідну валентність, в термінах семантичних і граматичних характеристик, які є обмеженнями для залежних слів.

Формально, семантико-синтаксична модель, яка визначається щодо словника V , характеризується парою $SS = \langle lg, A \rangle$, де

$lg = \langle L_V, S_V, M_V \rangle$ узагальнена лексема, що характеризує групу термінів словника $L_V \subseteq V$ що володіє набором семантичних ознак S_V та морфологічних атрибутів M_V ; [6]

$A = \langle a_1, \dots, a_n \rangle$ – послідовність актантів, що описують модель, де кожен актант $a_i = \langle S_i, M_i \rangle$, представлений множиною альтернативних семантичних ознак S_i , а для кожної ознаки $s_{ij} \in S_i$ задається набір морфологічних обмежень $m_{ij} \subseteq M_i$.

Запропонована структура семантико-синтаксичні моделей надає широкі можливості моделювання мовних зв'язків у тексті. Так, модель може не містити синтаксичних обмежень і представляти собою онтологічні відносини, або описуватися без семантичних характеристик і відповідати чисто синтаксичним моделям управління. Узагальнення лексем в моделях дозволяє компактно визначити декілька мовних конструкцій, варіанти взаємозв'язку слів у виразах і словникові групи.

Моделі фактів. Модель фактів формує знання про узгодження наявних лінгвістичних знань з предметними знаннями. У спрощеному вигляді, без семантико синтаксичного компонента, дана модель була запропонована в роботі [6]. Модель фактів задається структурою, аналогічною актантній структурі SS . Вона описується або в термінах класів онтології, або в термінах семантичних ознак словника і зв'язується з фрагментом онтології. Додатково накладаються обмеження на онтологічні ознаки елементів структури і їх взаєморозташування в тексті.

Модель тексту

У процесі обробки тексту його уявлення послідовно змінюється, збагачуючись на кожному етапі новими знаннями. Для опису зміни запропонована концепція покриттів тексту, коли кожне покриття представляється набором однотипних елементів з заданими текстовими позиціями (інтервалами). Виділяються наступні типи покриттів.

(1) Графематичне покриття – являє собою розбиття тексту на елементарні складові, такі як слово, розділовий знак, абзац, число і т.п.;

(2) Термінологічне покриття складається з словникових термінів, знайдених в даному тексті, з урахуванням можливої омонімії і перетинів багатослівних термінів;

(3) Сегментне покриття відображає структурний поділ тексту на логічні (абзац, речення, заголовок тощо) і жанрові фрагменти;

(4) Тематичне покриття визначає текстові кордону тематично пов'язаних областей тексту для кожної розглянутої тематики;

(5) Об'єктне покриття описує знайдену інформацію у вигляді семантичної мережі об'єктів предметної області.

Таким чином, модель тексту визначається $\langle G, LC, SC, TC \rangle$, де

G – графематичне покриття, що визначає текстові позиції елементів моделі,

LC – термінологічне покриття, впорядкована за текстовими позиціями послідовність лексичних об'єктів виду $l = \langle v, mv, sv, pos \rangle$, де $v \in V$ термін тезаурусу; mv – множина морфологічних характеристик терміна v ; sv – множина семантичних ознак v ; pos – текстова позиція v [6],

SC – сегментне покриття, що включає ієрархічно-упорядкований набір сегментів виду $s = \langle ts, pos, Rs \rangle$, де кожен сегмент визначається типом ts , текстовими позиціями pos і зв'язками Rs з іншими сегментами, що визначають їх взаєморозташування в тексті,

TC – тематичне покриття, IC – об'єктне покриття, задає множину онтологічних об'єктів і вказує текстові фрагменти, в яких були знайдені їх опису[6].

Графематичне покриття тексту є результатом графематичного аналізу, в процесі якого вхідний лінійний текст розбивається на елементарні атоми. Основне завдання даного етапу згрупувати символи одного типу в послідовності і дати їм необхідну інтерпретацію: слово певного алфавіту, число, символ. Для рахівників, що працюють з розміткою (наприклад, html-тексти), можна додатково задати типізацію тегів або послід. Важливою властивістю даного подання, є те, що елементи покриття задають всі можливі межі елементів для всіх наступних вистав, тобто при подальшій обробці жоден атом не може бути «розділений».

Термінологічне покриття тексту – це лексична текст модель, яка будується на основі лексичної моделі підмови, і включає знайдені в тексті терміни з прив'язкою до позиції в тексті. Після того, як термін знайдений в тексті (точніше в графематичному покритті), формується лексичний об'єкт, який забезпечується набором атрибутів, заданих в тезаурусі для знайденого терміну.

Сегментне покриття є результатом сегментації тексту і одним із способів відображення формальної структури тексту. У даному підході сегментація розглядається на макрорівні, тобто на рівні всього тексту (на відміну від локального аналізу пропозиції та виділення сукупності взаємопов'язаних фрагментів (клауз), що розглядаються в рамках синтаксичного аналізу речень) і спирається як на формально-текстові, так і на жанрові особливості документа [6], які передаються поділом тексту на концептуальні частини. При аналізі тексту розбиття на жанрові фрагменти допомагає звузити область пошуку інформації певного виду і, тим самим, підвищити якість аналізу. Також вирішуються завдання визначення жанрової релевантності документів, отриманих з невідомих джерел, наприклад, при пошуку в інтернет.

Тематичне покриття задає множину областей або фрагментів тексту, що покривають набір певних тем. Формування таких областей здійснюється на основі словника, в якому задано відповідність між термінами і тематичними ознаками. Тематичне покриття будується над термінологічним покриттям. Ми визначаємо елемент тематичного покриття або тематичний шар як фрагмент тексту включає кластер термінів, що відносяться до однієї теми, в межах формального сегмента (або послідовності сегментів) сегментного покриття. Аналогічно сегментам, тематичні шари можуть звужувати область пошуку інформації певного виду. Проте зазвичай, даний вид покриттів використовується в задачах тематичної кластеризації та класифікації тексту і тому виходить за рамки розгляду даної роботи.

Модель мультиагентної системи.

Модель отримує текстовий документ. Результатом роботи моделі є об'єктне покриття тексту. Множина одержаних інформаційних об'єктів згодом уточнюється та формується результуюча множина об'єктів, що описує контент документа в термінах онтології предметної області.

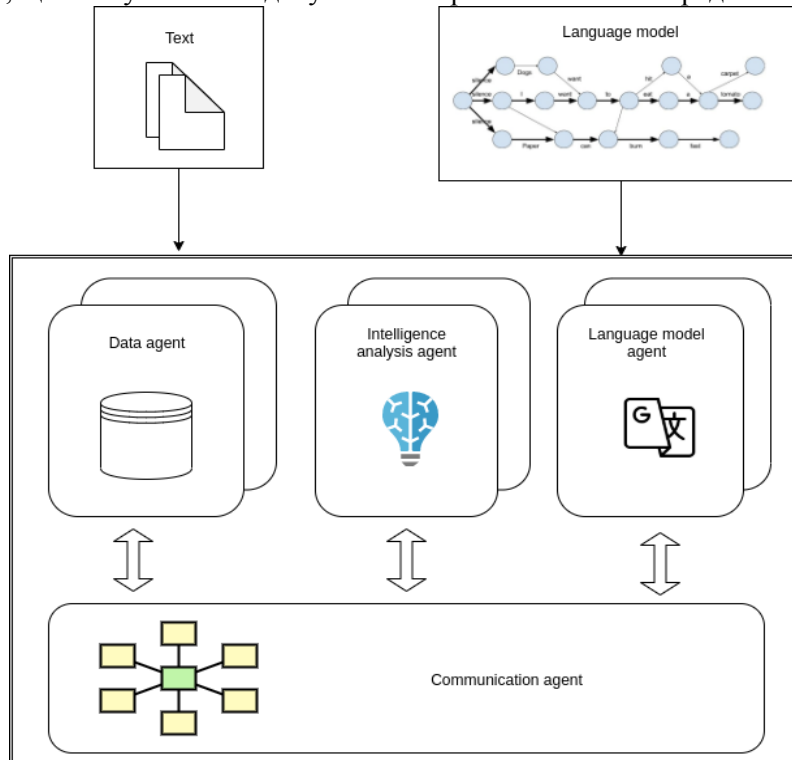


Рис 1. Модель мультиагентної системи

Дана система складається з агентів чотирьох видів:

1. Агент даних

Агент отримує документ та витягує текстову інформацію, забезпечує уніфікацію різнорідних даних, які надходять з різних джерел (наприклад з Бази даних). Виконує попередню обробку даних та знаходить відповідні зв'язки. Результатом роботи агента буде лінійний текст з базовим форматуванням та метаданими.

2. Агент інтелектуального аналізу

Агент отримує попередньо оброблений документ та виконує аналіз контекстної інформації. Кожен об'єкт контексту породжується на основі мовної моделі. Відповідно до отриманих даних вони можуть породжувати нових агентів даних, а також виявляти значення їх атрибутів.

3. Агент комунікатор

У процесі комунікації агенти домовляються про відповідність токенів мовної моделі та відповідної їй онтології. Також на основі знаходження нових токенів агент породжує нові агенти мовної моделі для поповнення онтології. Робота агента комунікатора також полягає в послідовному аналізі роботи інших агентів. Якщо всі агенти, крім нього є неактивними, він закінчує роботу даного алгоритму.

4. Агент мовної моделі

Агент виконує аналіз кожного окремого токена, тобто, встановлює відповідність між класами заданої онтології та текстовими одиницями. Має можливість поповнювати свій словниковий запас розширюючи онтологію.

Агенти взаємодіють за допомогою повідомлень двох видів:

1. Передача інформації про нові дані відбувається за допомогою агента комунікатора та виконується між агентом даних та агентом інтелектуального аналізу. Метою такого запиту є отримання інформації про певні атрибути та зв'язки між ними для кожного окремого документа.

2. Повідомлення токена. Такими повідомленнями обмінюється агент інтелектуального аналізу даних та агент мовної моделі за допомогою агента комунікатора. Даний запит виконується для поповнення мовної моделі та аналізу кожного окремого слова.

Опис протоколів роботи агентів, способів розуміння один одного, та способів комунікації представлений в роботі [1]. Всі агенти можуть працювати паралельно доки вони не перейдуть в

стан очікування. Момент зупинки визначається агентом комунікатором. Найбільш вагомою перевагою використання мультиагентної системи є можливість паралельної обробки текстового документа, також дана система може допомогти з видаленням повторів з тексту. Недоліком може бути те, що у процесі роботи алгоритм породжує численні переговори агентів, а також розрив існуючих зв'язків і встановлення нових. Така поведінка моделі може вимагати додаткових обчислювальних ресурсів.

Висновок. Алгоритм, що наведений у даній роботі надає можливість паралельно добувати інформацію з текстових файлів за допомогою використання мультиагентної системи. За допомогою цієї системи ми можемо пришвидшити процес обробки текстового документа в цілому, і також вона може виконувати семантичний аналіз, який зазвичай відбувається послідовно. Тобто, для паралелізації процесу семантичної обробки тексту можливо використовувати також даний метод, який покриває дана стаття.

Список використаних джерел :

1. Michael Wooldridge. An Introduction to Multi Agent Systems.– University of Liverpool: Wiley, 2009.
2. Aref, M.M. A Multi-Agent System for Natural Language Understanding} International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, 2003, 36.
3. C.T. dos Santos, P. Quaresma, I. Rodrigues, R. Vieira A Multi-Agent Approach to Question Answering // In Computational Processing of the Portuguese Language: 7th International Workshop, PROPOR 2006. Itatiaia, Brazil, May 2006 (PROPOR'2006) LNAI 3960, 13-17 de Maio de 2006, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, pp. 131-139.
4. Cheng X., Xie Y., Yang T. Study of Multi-Agent Information Retrieval Model in Semantic Web // In Proc. of the 2008 International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing (ETTANDGRS'08), 2008, Vol. 02, P. 636-639.
5. Яковчук Е.И., Сидорова Е.А. Обобщенные семантико-синтаксические модели в задачах обработки текста // Труды рабочего семинара «Наукоемкое программное обеспечение НПО-2011». Ершовская конференция по информатике. –Новосибирск: ИСИ СО РАН, 2011. –С.287-292.
6. Гаранина Н.О., Сидорова Е.А. Мультиагентный подход к извлечению информации из текстов и пополнению онтологии.
7. MultiAgentSystems [Електронний ресурс]. – Режим доступу доресурсу: <https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/pstone/public/papers/97MAS-survey/node2.html>. - Дата доступу: 4.10.2019.

**ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ**

1. **Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:** постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.
2. **Статтю можна подавати українською, російською, або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03. Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 5-9 сторінок.
3. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та лівє поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
4. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
5. **Анотації** українською, російською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
6. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
7. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
8. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
9. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
10. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Таблиця 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.
11. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами ДСТУ 8302:2015 через 1 см від останнього рядка.
12. Статті надіслати електронною поштою за такою адресою: notatki@ukr.net
13. До статті додається дві рецензії: зовнішня і внутрішня. Редакція залишає за собою право направляти статті на додаткову рецензію.
14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

До статті обов'язково додаються у письмовому вигляді відомості про авторів:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів у збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» можна отримати у відповідального секретаря – Савюка Ігоря Віталійовича за тел. (0332) 262519.

Адреса: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, к. 34.

Автор статті отримує 1 примірник збірника. **Вартість друку** однієї сторінки становить 50 грн. Рахунок виставляється після підтвердження редакційною колегією про прийняття статті до друку.

До уваги авторів. Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ» (за галузями знань «Технічні науки») згідно наказу МОН України № 528 від 12.05.2015 р. затверджено як наукове фахове видання України, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Збірник входить у науково метричну базу РИНЦ.

Редколегія повідомляє, що планова періодичність друку збірника чотири випусків на рік.

P.S. Без авторської довідки, матеріали редакційною колегією не розглядаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²

Луцький національний технічний університет¹

Тернопільський національний технічний університет²

**НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ
КАРКАСОМ ТВІРНИХ**

Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом спільних твірних.

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

И.И. Иванов, П.П. Петров

**ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСИ КОНОИДА, ПРЕДСТАВЛЕННОГО
ДИСКРЕТНЫМ КАРКАСОМ ОБРАЗУЮЩИХ**

Разработан алгоритм приближенного определения оси коноида, представленного дискретным каркасом обшивки образующих.

Ключевые слова: ось коноида, дискретный каркас, образующая.

I. Ivanov, P. Petrov

**AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT
LINES**

The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом твірних, можна побудувати безліч плоских і просторових.....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм.....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

$$Y_j = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^n Y_{ji}, \quad (1)$$

де K -

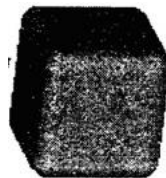


Рис. 1. Назва рисунка

Таблиця 1.

Назва таблиці

№п/п	Фактори		Функції відгуку	
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного.....

Список використаних джерел:

1.

ПІБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Колектив авторів

Наукові нотатки

**Міжвузівський збірник
(за галузями знань «Технічні науки»)
Випуск 68**

Комп'ютерний набір та верстка: І.В. Савюк
Збірник друкується в авторській редакції

Наклад **300 прим.**

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

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