

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В. В. ПАНАСЮК (головний редактор), *В. М. ФЕДІРКО* (заст. головного редактора), *Р. Р. КОКОТ* (відповідальний секретар), *О. Є. АНДРЕЙКІВ*, *С. А. БИЧКОВ*, *Л. О. ВАСИЛЕЧКО*, *Р. Є. ГЛАДИШЕВСЬКИЙ*, *І. М. ДМИТРАХ*, *І. Ю. ЗАВАЛІЙ*, *І. М. ЗІНЬ*, *Г. С. КИТ*, *Р. М. КУШНІР*, *Л. М. ЛОБАНОВ*, *З. Т. НАЗАРЧУК*, *Г. М. НИКИФОРЧИН*, *І. В. ОРІНЯК*, *О. П. ОСТАШ*, *В. І. ПОХМУРСЬКИЙ*, *О. В. РЕШЕТНЯК*, *М. П. САВРУК*, *З. А. СТОЦЬКО*, *О. В. СУБЕРЛЯК*, *Г. Т. СУЛИМ*, *В. В. ФЕДОРОВ*, *С. О. ФІРСТОВ*, *М. С. ХОМА*, *П. В. ЯСНІЙ*

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Р. АКІД (Великобританія), *С. ВОДЕНІЧАРОВ* (Болгарія), *І.-Р. ГАРРІС* (Великобританія), *І. ГЛІНКА* (Канада), *В. ДІЦЕЛЬ* (Німеччина), *О. М. ЛОКОЩЕНКО* (Росія), *Е. ЛУНАРСЬКА* (Польща), *М. А. МАХУТОВ* (Росія), *М. Ф. МОРОЗОВ* (Росія), *А. НЕЙМІЦ* (Польща), *Дж.-Ф. НОТТ* (Великобританія), *І. ПЛЮВІНАЖ* (Франція), *Я. ПОКЛЮДА* (Чехія), *Р.-О. РІЧІ* (США), *Д.-М.-Р. ТЕПЛИН* (Великобританія), *Л. ТОТ* (Угорщина), *Є. ТОРІБІО* (Іспанія)

EDITORIAL BOARD

V. V. PANASYUK (Editor-in-Chief), *V. M. FEDIRKO* (Deputy Editor-in-Chief), *R. R. KOKOT* (Secretary), *O. Ye. ANDREIKIV*, *S. A. BYCHKOV*, *I. M. DMYTRAKH*, *V. V. FEDOROV*, *S. O. FIRSTOV*, *R. Ye. GLADYSHEVSKII*, *M. S. KHOMA*, *H. S. KIT*, *R. M. KUSHNIR*, *L. M. LOBANOV*, *Z. T. NAZARCHUK*, *H. M. NYKYFORCHYN*, *I. V. ORYNIAC*, *O. P. OSTASH*, *V. I. POKHMURSKII*, *O. V. RESHETNYAK*, *M. P. SAVRUK*, *Z. A. STOTSKO*, *O. V. SUBERLYAK*, *H. T. SULYM*, *L. O. VASYLECHKO*, *P. V. YASNII*, *I. Yu. ZAVALIY*, *I. M. ZIN'*

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

R. AKID (Great Britain), *W. DIETZEL* (Germany), *I. R. HARRIS* (Great Britain), *H. HLINKA* (Canada), *J. F. KNOTT* (Great Britain), *A. M. LOKOSHCHENKO* (Russia), *E. LUNARSKA* (Poland), *N. A. MAKHUTOV* (Russia), *N. F. MOROZOV* (Russia), *A. NEIMITZ* (Poland), *G. PLUVINAGE* (France), *Ya. POKLUDA* (Czech Republic), *R. O. RITCHIE* (USA), *D. M. R. TAPLIN* (Great Britain), *J. TORIBIO* (Spain), *L. TÓTH* (Hungary), *S. VODENICHAROV* (Bulgaria)

Відповідальний за випуск чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф. В. М. Федірко
Responsible for issue corr.-member NASU, Dr. (Engn.), Prof. V. M. Fedirko

Адреса редакції: 79601, Львів МСП, Наукова, 5. Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України. Тел.: (032) 263-73-74,
(032) 229-62-30. Факс: (032) 264-94-27.
E-mail: pccmm@ipm.lviv.ua

WWW-address: <http://www.ipm.lviv.ua/journal/Journal.htm>

Editorial office address: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 5, Naukova St.,
Lviv 79601, Ukraine. Tel.: (38) 032 263-73-74,
(38) 032 229-62-30. Fax: (38) 032 264-94-27.
E-mail: pccmm@ipm.lviv.ua

Відповідальний секретар редакції **Р. Р. Кокот**

Редактори *Д. С. Бриняк*, *О. Т. Досин*, *Л. Є. Єлейко*

Технічний редактор *І. В. Калинюк*

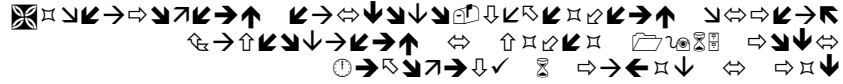
Зав. групою комп'ютерної підготовки видання *І. В. Калинюк*

Комп'ютерний набір *Л. Г. Копчак*, *Г. М. Кулик*

Підписано до друку 15.12.2016. Формат 70×108/16. Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 12.
Умовн. фарбо-відбитків 12,5. Тираж 200 прим. Замовлення 161216 від 16.12.2016. Ціна договірна.
Реєстраційне свідоцтво серія КВ №203 від 10.11.93

Друкарня ТзОВ "Простір-М", 79000, Львів, вул. Чайковського, 8

ФІЗИКО-ХІМІЧНА МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ



ТОМ 52, № 6, 2016

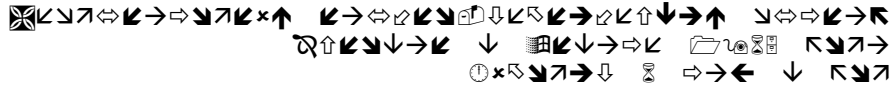
листопад – грудень

ЗМІСТ

<i>Вербовицький Ю. В., Завалій І. Ю.</i> Нові металогідридні матеріали на основі сплавів $R_{2-x}Mg_xNi_4$ для хімічних джерел струму.....	7
<i>Дацишин О. П., Марченко Г. П., Рудавська І. А.</i> Коефіцієнти інтенсивності напружень для довільно розташованої дугової тріщини в круговому диску під час його обертання.....	19
<i>Гудрамович В. С., Гарт Е. Л., Струнін К. А.</i> Моделювання поведінки плоскодеформівних пружних середовищ з витягнутими еліпсоподібними і прямокутними включеннями.....	25
<i>Сулим Г. Т., Пастернак Я. М., Томашівський М. М.</i> Термопружність анізотропних біматеріальних тіл із контактним термоопором межі поділу складників та тонкими включеннями.....	32
<i>Дівеєв Б. М., [Козут І. С.], Бутитер І. Б., Черчик Г. Т.</i> Визначення розсіяння енергії в шаруватих балках за вібраційного навантаження.....	41
<i>Дробенко Б. Д., Калиняк Б. М., Кость Я. П., Мицик Б. Г.</i> Розрахунок напружень у тонких пластинах, з'єднаних жорстко з циліндром.....	49
<i>Стащук М. Г.</i> Оцінювання розподілу водню біля тріщиноподібного дефекту.....	56
<i>Ревенко В. П., Ревенко А. В.</i> Визначення плоского напружено-деформованого стану пластин на основі тривимірної теорії пружності.....	63
<i>Маланчук Н. І., Слободян Б. С., Мартиняк Р. М.</i> Фрикційне проковзування пружних тіл за наявності підповерхневого включення.....	69
<i>Харченко Є. В., Клиш С., Палюх В. М., Кунта О. Є., Ленковський Т. М.</i> Вплив тривалої експлуатації газопроводу на циклічну тріщиностійкість сталі 17Г1С.....	75
<i>Пашечко М., Юзвік Й., Дзедзіц К., Кароліус М., Усидус І.</i> Поверхнєве зміцнення швидкорізальної сталі HS6-5-2 під час хіміко-термічної обробки.....	81
<i>Погрелюк І. М., Федірко В. М., Лаврись С. М., Кравчишин Т. М.</i> Закономірності термодифузійного насичення азотом, суміщеного зі штатною термічною обробкою, титанового сплаву VT22.....	87
<i>Кирилів В. І., Чайковський Б. П., Максимів О. В., Шалько А. В., Сидор П. Я.</i> Роботоздатність валкової сталі 60X2M з поверхневою наноструктурою.....	93
<i>Бойчишин Л. М., Кулик Ю. О., Герцик О. М., Котур Б. Я., Руденко О. Ю., Нізамєєв М. С.</i> Корозійна тривкість стрічкових та об'ємних аморфних сплавів на основі заліза.....	98

<i>Звірко О. І., Мицик А. Б., Цирульник О. Т., Габетта Д., Никифорчин Г. М.</i> Корозійна деградація сталі гину тривало експлуатованого газопроводу з макророзшаруванням	104
<i>Мацько І. Й., Яворський І. М., Юзефович Р. М., Шевчик В. Б.</i> Інваріантний кореляційний аналіз вібрацій підшипника кочення з дефектами на зовнішньому та внутрішньому кільцях.....	109
<i>Іваницький Я. Л., Мокрий О. М., Штаюра С. Т.</i> Акустичні дослідження деформованого стану наводненої сталі 09Г2С	118
Перелік статей, опублікованих у журналі “ФХММ” за 2016 р.	125
Авторський показчик	130

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ



ТОМ 52, № 6, 2016

ноябрь – декабрь

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Вербовицкий Ю. В., Завалий И. Ю.</i> Новые металлгидридные материалы на основе сплавов $R_{2-x}Mg_xNi_4$ для химических источников тока.....	7
<i>Дацьшин А. П., Марченко Г. П., Рудавская И. А.</i> Коэффициенты интенсивности напряжений для произвольно расположенной дуговой трещины в круговом диске при его вращении	19
<i>Гудрамович В. С., Гарт Э. Л., Струнин К. А.</i> Моделирование поведения плоскодеформируемых упругих сред с протяженными эллипсообразными и прямоугольными включениями	25
<i>Сулым Г. Т., Пастернак Я. М., Томашиевский М. М.</i> Термоупругость анизотропных биматериальных тел из контактным термосопротивлением границы раздела составляющих и тонкими включениями	32
<i>Дивеев Б. М., [Козут И. С.], Бутитер И. Б., Черчик Г. Т.</i> Определение рассеяния энергии в слоистых балках при вибрационном нагружении.....	41
<i>Дробенко Б. Д., Калыняк Б. Н., Кость Я. П., Мыцык Б. Г.</i> Расчет напряжений в тонких пластинах, соединенных жестко с цилиндром	49
<i>Стацук Н. Г.</i> Оценка распределения водорода возле трещиноподобного дефекта.....	56
<i>Ревенко В. П., Ревенко А. В.</i> Определение плоского напряженно-деформированного состояния пластин на основе трехмерной теории упругости	63
<i>Маланчук Н. И., Слободян Б. С., Мартыняк Р. М.</i> Фрикционное проскальзывание упругих тел при наличии подповерхностного включения	69
<i>Харченко Е. В., Клыш С., Палюх В. М., Кунта О. Е., Ленковский Т. М.</i> Влияние длительной эксплуатации газопровода на циклическую трещиностойкость стали 17Г1С	75
<i>Пашечко М., Юзвик И., Дзедзиц К., Каролюс М., Усидус И.</i> Поверхностное упрочнение быстрорежущей стали HS6-5-2 при химико-термической обработке	81
<i>Погрелюк И. Н., Федирко В. Н., Лаврысь С. М., Кравчишин Т. М.</i> Закономерности термодиффузионного насыщения азотом, совмещенного со штатной термической обработкой, титанового сплава BT22	87
<i>Кырылив В. И., Чайковский Б. П., Максимов О. В., Шалько А. В., Сыдор П. Я.</i> Работоспособность валковой стали 60X2M с поверхностной наноструктурой	93

<i>Бойчишин Л. М., Кулык Ю. О., Герцык О. М., Котур Б. Я., Руденко А. Ю., Низамеев М. С.</i> Коррозионная стойкость ленточных и объемных аморфных сплавов на основе железа	98
<i>Звирко О. И., Мыцык А. Б., Цирульник А. Т., Габетта Д., Никифорчин Г. Н.</i> Коррозионная деградация стали изгиба длительно эксплуатируемого газопровода с макрорасслоением	104
<i>Мацько И. И., Яворский И. Н., Юзефович Р. М., Шевчик В. Б.</i> Инвариантный корреляционный анализ вибраций подшипника качения с дефектами на внешнем и внутреннем кольцах	109
<i>Иваницкий Я. Л., Мокрый О. М., Штаюра С. Т.</i> Акустические исследования деформированного состояния наводороженной стали 09Г2С	118
Перечень статей, опубликованных в журнале “ФХММ” за 2016 г.	125
Авторский указатель	130

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

H. V. KARPENKO PHYSICO-MECHANICAL INSTITUTE

PHYSICOCHEMICAL MECHANICS OF MATERIALS



VOLUME 52, № 6, 2016

November – December

CONTENTS

Verbovytskyi Yu. V. and Zavalii I. Yu. New metal hydride materials based on $R_{2-x}Mg_xNi_4$ alloys for chemical sources of current 7

РЕЗЮМЕ. Подано короткий огляд праць про структуру та воденьсорбційні властивості вибраних сплавів типу $R_{2-x}Mg_xNi_4$, де R – рідкісноземельні метали. Проаналізовано переваги їх як електродних матеріалів для хімічних джерел струму. Оцінено взаємозв'язок між їх складом, характером ізотерм та електрохімічними зарядно-розрядними властивостями.

РЕЗЮМЕ. Приведен краткий обзор работ о структуре и водородсорбционных свойствах выбранных сплавов типа $R_{2-x}Mg_xNi_4$, где R – редкоземельные металлы. Проанализированы их преимущества как электродных материалов для химических источников тока. Оценена взаимосвязь между их составом, характером изотерм и электрохимическими зарядно-разрядными характеристиками.

SUMMARY. A brief overview of researches on the structure and hydrogen sorption properties of selected $R_{2-x}Mg_xNi_4$ (R – rare earth metals) alloys is given. Their application as electrode materials for nickel–metal hydride battery is discussed. The relationship between structure of $R_{2-x}Mg_xNi_4$, character of PCT diagrams and electrochemical charge-discharge characteristics is analyzed.

Datsyshyn O. P., Marchenko H. P., and Rudavska I. A. Stress intensity factors for an arbitrarily located arc crack in a circular disc under its rotation 19

РЕЗЮМЕ. Розглянуто плоску задачу теорії пружності для кругового диска з довільно розташованою дуговою тріщиною під дією обертового навантаження. Задачу зведено до сингулярного інтегрального рівняння, яке розв'язують числово методом механічних квадратур. Отримано числові значення коефіцієнтів інтенсивності напружень та кутів початкового поширення тріщини залежно від її розташування та геометричних параметрів (кривини і довжини).

РЕЗЮМЕ. Рассмотрена плоская задача теории упругости для кругового диска с произвольно расположенной дугообразной трещиной под действием вращательной нагрузки. Задача сводится к сингулярному интегральному уравнению, которое решается численно методом механических квадратур. Получены численные значения коэффициентов интенсивности напряжений и углов начального распространения трещины в зависимости от ее расположения и геометрических параметров (кривизны и длины).

SUMMARY. A plane problem of elasticity theory for a circular disk with arbitrarily located arc-shaped crack under the action of rotational load has been considered. The problem has been reduced to the singular integral equation which is solved numerically by the method of mechanical quadratures. The numerical values of the stress intensity factors and angles of initial crack propagation depending on crack location and geometric parameters (curvature and length) have been obtained.

Hudramovich V. S., Hart E. L., and Strunin K. A. Modeling of the behavior of plane stain elastic media with extensive elliptical and rectangular inclusions 25

РЕЗЮМЕ. Числово змодельовано напружено-деформований стан плоского елемента пружного неоднорідного середовища з витягнутими еліпсоподібними та прямокутними включеннями з використанням стандартного пакета скінченноелементного аналізу ANSYS. Досліджено взаємовплив включень залежно від їх орієнтації, форми, розмірів і жорсткості. Встановлено найбезпечніші варіанти їх взаєморозташування.

РЕЗЮМЕ. Численно смоделировано напряженно-деформированное состояние плоского элемента упругой неоднородной среды с протяженными эллипсообразными и прямоугольными включениями при использовании стандартного пакета конечно-элементного анализа ANSYS. Исследовано взаимовлияние включений в зависимости от их ориентации, формы, размеров и жесткости. Установлены наиболее безопасные варианты их взаиморасположения.

SUMMARY. The stress-strain state of a plane element of elastic inhomogeneous medium with long ellipsoidal or rectangular inclusions, when using standard finite element analysis software ANSYS, is numerically modeled. The interaction of inclusions depending on their orientation, shape, size and rigidity is investigated. The most secure options for their relative positions are established.

Sulym H. T., Pasternak Ia. M., and Tomashivskyy M. M. Thermoelasticity of anisotropic bimaterial solids with the contact thermal resistance of the interface of components and thin inclusions..... 32

РЕЗЮМЕ. З використанням розширеного формалізму Стро та теорії функції комплексної змінної побудовано інтегральні співвідношення типу Сомільяни і відповідні рівняння для термопружних анізотропних біматеріальних тіл із неідеальним тепловим контактом прямолінійної межі поділу складників. З допомогою математичної моделі тонкого деформівного теплоізолюваного включення на основі одержаних інтегральних співвідношень розв'язано задачу термопружності для скінченного анізотропного біматеріального тіла із тонкою неоднорідністю з урахуванням контактного термоопору на межі основних складників матеріалів.

РЕЗЮМЕ. С использованием расширенного формализма Стро и теории функций комплексной переменной получены интегральные уравнения типа Сомильяны и соответствующие уравнения для термоупругих анизотропных биматериальных тел с неидеальным тепловым контактом прямолинейной границы раздела его составляющих. С помощью математической модели тонкого деформируемого теплоизолированного включения на основе полученных интегральных соотношений решена задача для конечного термоупругого анизотропного биматериального тела с учетом термосопротивления на контакте составляющих и тонким включением внутри одной из них.

SUMMARY. Using the extended Stroh formalism and the theory of complex variable the Somigliana type integral equations and the corresponding equations for an anisotropic thermoelastic bimaterial with thermally imperfect rectilinear interface are obtained. Applying the mathematical model of a thin deformable thermally insulated inclusion and the obtained integral relations the problem for a finite anisotropic thermoelastic bimaterial solid containing a thin elastic inclusion is solved with the account of the thermal resistance at the interface.

Diveiev B. M., Kohut I. S., Butyter I. B., and Cherchyk H. T. Determination of the energy of dissipation in layered beams under vibration loading 41

РЕЗЮМЕ. Розглянуто теорію згину шаруватого пакета. Теоретична модель враховує зсувні, нормальні деформації і напруження. Детально розглянуто розподіл напружень у тришаровій балці за різних частот коливань. Оцінено демпфувальні властивості в частотній області. Подані експериментальні результати для сталеві балки з м'якими лицьовими шарами.

РЕЗЮМЕ. Представлена теория изгиба слоистого пакета. Теоретическая модель учитывает сдвиговые, нормальные деформации и напряжения. Детально рассмотрено распределение напряжений в трехслойной балке при разных частотах колебаний. Проведена оценка демпфирующих свойств в частотной области. Представлены экспериментальные результаты для стальной балки с мягкими лицевыми слоями.

SUMMARY. The theory of the layered package bending is presented. A theoretical model takes into account the shear and normal strains and stresses. Distribution in a three-layer beam at different vibration frequencies is discussed in details. Damping properties in the frequency region are evaluated. The experimental results for a steel beam with the soft face sheets are presented.

Drobenko B. D., Kalynyak B. M., Kost Ya. P., and Mytsyk B. H. Calculation of stresses in thin plates joined rigidly with a cylinder..... 49

РЕЗЮМЕ. Методом комп'ютерного моделювання з використанням ізопараметричних скінченних елементів досліджено розподіл напружень у тонкій жорсткій пластині, з'єднаній з товстостінним циліндром. Визначено максимальні напруження в концентраторі (в околі з'єднання пластина-циліндр). Побудовано для різних матеріалів залежності цих напружень від діючого на пластину пневматичного (гідростатичного) тиску, які мають важливе прикладне значення.

РЕЗЮМЕ. Методом компьютерного моделирования с использованием изопараметрических конечных элементов исследовано распределение механических напряжений в тонкой жесткой пластине, соединенной с толстостенным цилиндром. Определены максимальные напряжения в концентраторе (в окрестности соединения пластина-цилиндр). Построены для разных материалов зависимости этих напряжений от действующего на пластину пневматического (гидростатического) давления, которые имеют важное практическое значение.

SUMMARY. A method of computer simulation with application of isoparametric finite elements was used for studying distribution of mechanical stresses in the thin rigid plate connected to a thick-walled cylinder. Maximum stresses were determined in the concentrator (near the plate-cylinder joint). Dependences of these stresses versus pneumatic (hydrostatic) pressure (acting on the plate), which are of great practical importance, were built for different materials.

Stashchuk M. H. Evaluation of redistribution of hydrogen near a crack-like defect..... 56

РЕЗЮМЕ. Подано рівняння дифузії під час деформації тіла з урахуванням відповідного потоку водню, спричиненого як зовнішнім навантаженням, так і напруженнями від наводнювання металу, послабленого гладким або тріщиноподібним дефектом. У квазістаціонарному випадку для малозмінних напружень знайдено замкнуті аналітичні розв'язки. Встановлено перерозподіл водню, ініційований еліптичним отвором та тріщиноподібним дефектом зі зонами передруйнування.

РЕЗЮМЕ. Приведено уравнение диффузии и соответствующего потока водорода, вызванного внешними механическими нагрузками, для упругого металлического тела, ослабленного гладким или трещиноподобным дефектом. В квазистационарном случае для малоизменяющихся напряжений найдены замкнутые аналитические реше-

ния. Установлено перераспределение водорода, инициируемое эллиптическим и трещиноподобным дефектами с зонами предразрушения.

SUMMARY. Equation of diffusion and corresponding hydrogen flow, caused by the external mechanical loading for an elastic metal body, weakened by smooth or crack-like defects is proposed. In the quasi-stationary case the analytical solutions for low-variable stresses are found. The redistribution of hydrogen, initiated by the elliptic and crack-like defects with the proves zones, is established.

Revenko V. P. and Revenko A. V. Evaluation of the stress-strain state of plates on the basis of the 3D theory of elasticity..... 63

РЕЗЮМЕ. Побудовано теорію пластин, навантажених тільки на сторонах паралельно і симетрично серединній поверхні. Використано загальне подання тривимірного напружено-деформованого стану і точно задоволено нульові крайові умови на плоских поверхнях пластини. Розрахунок її тривимірного напруженого стану зведено до визначення двовимірного з припущенням, що перпендикулярні серединній поверхні нормальні напруження незначні. Переміщення і напруження виражено через дві двовимірні гармонічні функції. Записані однорідні розв'язки і розроблено аналітично-числовий алгоритм розв'язання крайової задачі для прямокутної пластини.

РЕЗЮМЕ. Построена теория пластин, нагруженных только на сторонах параллельно и симметрично срединной поверхности. Использовано общее представление трехмерного напряженно-деформированного состояния и точно удовлетворены нулевые краевые условия на плоских поверхностях пластины. Определение ее трехмерного напряженного состояния сведено к нахождению двумерного с допущением, что перпендикулярные срединной поверхности нормальные напряжения незначительны. Перемещения и напряжения выражены через две двумерные гармонические функции. Построены однородные решения и разработан аналитико-числовой алгоритм решения краевой задачи для прямоугольной пластины.

SUMMARY. A theory of plates loaded only on the sides parallel and symmetrical to the median surface was constructed. A general representation of the three-dimensional state was used. A three-dimensional stress state of the plate was reduced to a two-dimensional state, using only the assumption that the normal stresses perpendicular to the median surface were negligible. Movements and stresses were expressed in terms of two harmonic functions. Homogeneous solutions were constructed and the analytical and numerical algorithm for solving the boundary value problem for a rectangular plate was developed.

Malanchuk N. I., Slobodian B. S., and Martyniak R. M. Friction slipping of elastic bodies in the presence of sub-surface inclusion 69

РЕЗЮМЕ. Досліджено контакт двох пружних півбесмежних тіл з однакових матеріалів за наявності підповерхневого включення, що відрізняється від матриці лише коефіцієнтом лінійного теплового розширення. Тіла перебувають під дією стискальних зусиль та нагріву. Їх напружено-деформований стан подано через висоту зазору та відносний зсув поверхонь на ділянках проковзування. Отримано систему двох сингулярних інтегральних рівнянь, одне з яких розв'язано аналітично, а інше – числово. Проаналізовано залежності ширини зазору і ділянки проковзування, а також контактних напружень від прикладеного навантаження.

РЕЗЮМЕ. Исследован контакт двух упругих полупространств из одинаковых материалов при наличии подповерхностного включения, которое отличается от матрицы только коэффициентом линейного теплового расширения. Тела подвергнуты воздействию сжимающих усилий и нагрева. Напряженно-деформированное их состояние выражено через высоту зазора и относительный сдвиг границ тел на участках проскальзывания. Для их определения получена система сингулярных интегральных уравнений, одно из которых решено аналитически, а другое – численно. Проанализи-

рованы зависимости ширины зазора и участка проскальзывания, а также контактных напряжений от приложенной нагрузки.

SUMMARY. The contact of two elastic half-spaces made of identical materials, one of which has a subsurface inclusion, under simultaneous heating and loading by normal forces is investigated. The coefficients of linear thermal expansion of the inclusion and the matrix are different. The stress-strain state of the bodies is represented through a gap height and a relative shift of the boundaries in the slip zones. A system of singular integral equations is obtained to determine these functions. One of these equations is solved analytically, and the other is solved numerically. The dependences of the widths of the gap and the slip zone and the contact stresses on the applied load are analyzed.

Kharchenko Ye. V., Klysh S., Paliukh V. M., Kunta O. Ye., and Lenkovskiy T. M.

The influence of gas pipeline long-term operation on fatigue crack growth resistance of 17Г1С steel 75

РЕЗЮМЕ. Встановлено закономірності поширення тріщини за низько-, середньо- та високоамплітудних циклічних навантажень розтягом сталі 17Г1С труби магістрального газопроводу “Дашава–Мінськ” після 40 років експлуатації та матеріалу неексплуатованої (вихідної) труби. Побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування за різних асиметрій циклу навантаження в діапазоні швидкостей росту втомної тріщини до 6 порядків. Досліджено припорогові ділянки кінетичних діаграм для матеріалу різних ділянок стінки вихідної та експлуатованої труб. На основі побудованих графічних залежностей визначено характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С та встановлено суттєве зменшення порогових значень коефіцієнта інтенсивності напружень експлуатованого матеріалу порівняно з вихідним внаслідок деградації його структури і зниження опірності втомному руйнуванню.

РЕЗЮМЕ. Установлены кинетические закономерности распространения трещины при низко-, средне- и высокоамплитудных циклических нагрузках растяжением стали 17Г1С трубы магистрального газопровода “Дашава–Минск” после 40 лет эксплуатации и неэксплуатированной (исходной) трубы. Построены кинетические диаграммы усталостного разрушения при разных асимметриях цикла нагружения в диапазоне скоростей роста усталостной трещины до 6 порядков. Исследованы припороговые участки кинетических диаграмм усталостного разрушения материала разных зон стенки исходной и эксплуатированной трубы. На основе построенных графических зависимостей определены характеристики циклической трещиностойкости и выявлено существенное снижение пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений эксплуатированного материала в сравнении с исходным, что объясняется деградацией его структуры и снижением сопротивляемости хрупкому разрушению.

SUMMARY. Kinetic regularities of crack propagation at low, medium and high-amplitude cyclic tension loading of 17Г1С steel taken from the pipeline “Dashava–Minsk” after 40 years of operation and non-operated (original) pipes were established. Kinetic curves of fatigue fracture at various stress ratios of a loading cycle in the range of fatigue crack growth rates, in the range of up to 6 orders of magnitude were constructed. The near-threshold regions of fatigue fracture curves of the material of different zones of the original and operated pipe wall were investigated. On the base of the obtained dependences the fatigue crack growth resistance characteristics were evaluated and a significant reduction in the threshold stress intensity factor of operated material in comparison with the original was found due to the degradation of its structure and decrease of brittle fracture resistance.

Pashechko M., Juzvik J., Dzedzic K., Karolus M., and Usidus I. Surface hardening of fast-cutting HS6-5-2 steel under chemical heat treatment..... 81

РЕЗЮМЕ. Досліджено фізико-механічні властивості сталі HS6-5-2 після азотування, карбонітрування і карбонітрування з оксидуванням. Для поверхневого зміцнення використано сучасний екологічний метод Zero Flow. Застосовано однокомпонентну атмосферу для азотування NH_3 . Температура реалізованих процесів знаходилася в діапазоні до 570°C . Здійснено фазовий аналіз сталі після різних хіміко-термічних обробок, досліджено поверхневу твердість, розподіл твердості у поперечному перерізі поверхневих зміцнених шарів. Товщина зміцнених шарів після карбонітрування з оксидуванням становила $0,142\text{ mm}$, після азотування – $0,325\text{ mm}$. Отримані результати досліджень вказують на суттєве підвищення твердості поверхневого шару.

РЕЗЮМЕ. Исследованы физико-механические свойства стали HS6-5-2 после азотирования, карбонитрирования и карбонитрирования с оксидированием. Для поверхностного упрочнения использован современный экологический метод Zero Flow. Применено однокомпонентную атмосферу для азотирования NH_3 . Температура реалізованих процесів знаходилась в диапазоне до 570°C . Проведен фазовый анализ стали после различных химико-термических обработок, исследовано поверхностную твердость, распределение твердости по сечению поверхностных упрочненных слоев. Толщина упрочненных слоев после карбонитрирования с оксидированием составила $0,142\text{ mm}$, после азотирования – $0,325\text{ mm}$. Полученные результаты исследований указывают на значительное повышение твердости поверхностного слоя.

SUMMARY. The paper presents the results of physical and mechanical properties of steel HS6-5-2 after nitriding, carbonitriding and carbonitriding with oxidation process. Modern and ecological method Zero Flow was used. Applied mono-nitriding atmosphere of ammonia NH_3 . The temperature of the processes up to 570°C . After nitriding surface of the phase, surface hardness, hardness distribution in depth and the microstructure were tested. As a result of nitriding, carbonitriding and carbonitriding with oxidation process achieved diffusion layers on steel HS6-5-2. A thickness ranged from 0.147 mm for carbonitriding with oxidation layer to 0.325 mm for nitriding layer. The results of surface hardness show hardening of the surface layer. The main phases detected in the studied materials are Fe_3N , Fe_4N and Fe_3O_4 . Nitriding and carbonitriding processes lead almost to the same results in contrast to the carbonitriding with oxidation process which causes presence of greater amount of the Fe_3O_4 phase.

Pohrelyuk I. M., Fedirko V. M., Lavrys S. M., and Kravchysyn T. M. Regularities of thermal diffusion saturation with nitrogen, combined with standard heat treatment of BT22 alloys..... 87

РЕЗЮМЕ. Встановлено закономірності термодифузійного насичення азотом двофазного титанового сплаву BT22, суміщеного з його штатною термічною обробкою. Виявлено кінетичні особливості азотування $(\alpha+\beta)$ -сплаву BT22, котрі зумовлені температурно-часовими параметрами обробки. Оцінено вплив цих параметрів на фазово-структурний стан матеріалу та його взаємозв'язок з рівнем приповерхневого зміцнення та глибиною азотованого шару.

РЕЗЮМЕ. Установлена закономерность термодиффузионного насыщения азотом двухфазного титанового сплава BT22, совмещенного с его штатной термической обработкой. Обнаружено кинетические особенности азотирования $(\alpha+\beta)$ -сплава BT22, обусловленные температурно-временными параметрами обработки. Оценено влияние этих параметров на фазово-структурное состояние материала и его взаимосвязь с уровнем приповерхностного упрочнения и глубиной азотированного слоя.

SUMMARY. The regularity of thermal diffusion saturation with nitrogen of two-phase titanium BT22 alloy, combined with its standard heat treatment was established. The kinetic features of BT22 $(\alpha+\beta)$ -alloy nitriding, caused by the temperature and time

treatment parameters were found. The effect of these parameters on the phase-structural condition of the material and its relationship with the level of the near-surface hardening and depth of the nitrided layer were estimated.

Kyryliv V. I., Chaikovsky B. P., Maksymiv O. V., Shalko A. V., and Sydor P. Ya.

Serviceability of roller 60X2M steel with surface nanostructure 93

РЕЗЮМЕ. Вивчено контактну втому та зносотривкість валкової сталі 60X2M з поверхневою нанокристалічною структурою (НКС), сформованою механоімпульсною обробкою. Показано підвищення контактної довговічності та зносотривкості сталі з поверхневою НКС та встановлено залежність цієї довговічності від вихідного структурного стану, а також ефективність протекторного захисту.

РЕЗЮМЕ. Изучено контактную усталость и износостойкость валковой стали 60X2M с поверхностной нанокристаллической структурой (НКС), сформированной механоимпульсной обработкой. Показано повышение контактной долговечности и износостойкости стали с поверхностной НКС и установлена зависимость этой долговечности от исходного структурного состояния, а также эффективность протекторной защиты.

SUMMARY. Contact fatigue and wear resistance of the roller steel 60X2M with surface nanocrystalline structure (NKS) formed by mechanical-pulse treatment (MPT) were studied. The increase of fatigue durability and wear resistance of steel with the surface NKS was show. The dependence of fatigue durability of steel with surface NKS on its initial structural state was established. The efficiency of protector proofing on improvement of the fatigue durability of steel in the working medium was given.

Boichyshyn L. M., Kulyk Yu. O., Hertsyk O. M., Kotur B. Ya., Rudenko O. Yu., and Nizameiev M. S. Corrosion resistance of ribbon and bulk amorphous

alloys based on iron..... 98

РЕЗЮМЕ. Досліджено структурні та корозійні особливості об'ємних і стрічкових складнолегованих сплавів на основі заліза марок НВРС-2 та NHRP-1. За результатами енергодисперсійного рентгенівського аналізу уточнено їх склад та встановлено, що сплав НВРС-2 легований фосфором. Дифрактометричним методом виявлено, що зразки стрічкових сплавів мають аморфну структуру, а об'ємні – аморфно-кристалічну з розмірами нанокристалів у аморфній матриці 50 nm і володіють вищою корозійною тривкістю у 3% розчині NaCl.

РЕЗЮМЕ. Исследованы структурные и коррозионные особенности объемных и ленточных сложнелегированных сплавов на основании железа марок НВРС-2 и NHRP-1. По результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа уточнен их состав и установлено, что сплав НВРС-2 легирован фосфором. Дифрактометрическим методом выявлено, что образцы ленточных сплавов имеют аморфную структуру, а объемные – аморфно-кристаллическую с размером нанокристаллов в аморфной матрице 50 nm и владеют высшей коррозийной прочностью в 3% растворе NaCl.

SUMMARY. The structural and corrosion characteristics of bulk and ribbon НВРС-2 and NHRP-1 complex doped with iron-based alloys were studied. The composition of alloys was refined on the basis of the results of X-ray energy dispersive analysis. It was determined that НВРС-2 alloy was doped with phosphorus. Results of diffraction analysis showed that the ribbon samples of alloys had an amorphous structure, while bulk samples – amorphous-crystalline matrix with the size of nanocrystals of 50 nm. Bulk samples have higher corrosion resistance in 3% NaCl solution.

Zvirko O. I., Mytsyk A. B., Tsyurulnyk O. T., Gabetta G., and Nykyforchyn H. M.

Corrosion degradation of long-term operated gas pipeline elbow
with macrodefect 104

РЕЗЮМЕ. Досліджено корозійно-електрохімічну поведінку у водних розчинах 0,3% NaCl та 8,55 mM NaHCO₃ маловуглецевої сталі тривало експлуатованого гину газопроводу з обширним воднем ініційованим розшаруванням. Виявлено деградацію корозійної тривкості сталі гину труби в обох досліджених корозивних середовищах. Сталь гину труби (як стиснутої, так і розтягнутої ділянок) характеризувалась нижчим опором корозії, ніж метал прямої ділянки труби. Показано, що деградація корозійної тривкості сталі гину труби корелює з деградацією її механічних властивостей. Встановлено, що характеристики корозійної тривкості деградованого матеріалу (густина струму корозії та поляризаційний опір) можуть бути інформативними параметрами змін його стану, спричинених тривалою експлуатацією, і їх можна використовувати для діагностування деградації механічних властивостей сталей, пошкоджених воднем.

РЕЗЮМЕ. Исследовано коррозионно-электрохимическое поведение в водных растворах 0,3% NaCl и 8,55 mM NaHCO₃ малоуглеродистой стали длительно эксплуатируемого колена газопровода с обширным водородом инициированным расслоением. Вывявлено деградацію коррозійної стійкості сталі колена труби в обох досліджених корозійних середовищах. Сталь колена труби (як стиснутої, так і розтягнутої ділянок) характеризувалась більш низьким опором корозії, ніж метал прямої ділянки труби. Показано, що деградація коррозійної стійкості сталі колена труби корелює з деградацією її механічних властивостей. Встановлено, що характеристики коррозійної стійкості деградованого матеріалу (щільність струму корозії та поляризаційний опір) можуть бути інформативними параметрами змін його стану, спричинених тривалою експлуатацією, і їх можна використовувати для діагностики деградації механічних властивостей сталей, пошкоджених воднем.

SUMMARY. The electrochemical corrosion behaviour of the low-carbon steel of the long-term operated gas pipeline elbow with extensive hydrogen-induced delamination was investigated in 0.3% (wt.) NaCl and 8.55 mM NaHCO₃ aqueous solutions. The degradation of the corrosion resistance of the pipe elbow steel in both investigated corrosive environments was revealed. The pipe elbow steel (both the compressed and the tensioned sections) was characterized by lower corrosion resistance than the metal of the straight pipe section. It was shown that the corrosion resistance degradation of the pipe elbow steel correlated with the degradation of its mechanical properties. It was established that the corrosion resistance characteristics of the degraded material (corrosion current density and polarization resistance) could be informative of its state changes caused by long-term operation and could be used for diagnostics of mechanical properties degradation of the hydrogen-affected steels.

Matsko I. Yo., Javorsky I. M., Yuzefovych R. M., and Shevchyk V. B.

Invariant correlation analysis of vibrations of rolling bearing with defects
on outer and inner races 109

РЕЗЮМЕ. Методами векторних періодично корельованих випадкових процесів проаналізовано вібрації підшипника качення, симульовані за його стохастичною динамічною моделлю у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку з періодично змінними коефіцієнтами. Виявлено, що лінійні і квадратичні інваріанти кореляційної тензор-функції цього класу випадкових процесів підвищують ефективність виявлення дефектів, дають змогу розділити дефекти на зовнішньому та внутрішньому кільцях, дослідити їх просторові властивості, визначити місцезнаходження. Встановлено характерні зміни у просторово-часовій структурі інваріантів з розвитком дефекту.

РЕЗЮМЕ. Методами векторных периодически коррелированных случайных процессов проанализированы вибрации подшипника качения, симулированные на

основе его стохастической динамической модели в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с периодически изменяющимися коэффициентами. Выявлено, что линейные и квадратичные инварианты корреляционной тензор-функции этого класса случайных процессов повышают эффективность обнаружения дефектов, позволяют разделить их на внешнем и внутреннем кольцах, исследовать пространственные особенности, определить место нахождения. Установлены характерные изменения пространственно-временной структуры вследствие развития дефекта.

SUMMARY. The analysis of rolling bearing vibrations obtained using computer simulation of its stochastic dynamic model in the form of the system of nonlinear differential equations of the second order with periodically varying coefficients by the methods for vectorial periodically correlated random processes is provided. It is shown that linear and quadratic invariants of correlation tensor-function of this class of random signals enhance the effectiveness of faults detection, allows dividing them on the internal and external races, investigate their spatial properties and determine their location. The features of the spatial-time structure changes due to the defect growth are investigated.

Ivanytskyi Ya. L., Mokryi O. M., and Shtayura S. T. Acoustic investigations of the stain state of hydrogenated 09Г2С steel 118

РЕЗЮМЕ. Досліджено акустичні властивості в неоднорідних пластично деформованих зразках сталі 09Г2С. Зразки із залишковою деформацією послідовно термічно обробляли і наводнювали з газової фази. Після кожного етапу вимірювали просторовий розподіл швидкості акустичної хвилі. Проаналізовано механізми зміни швидкості під час наводнення на ділянці зразка із залишковою деформацією.

РЕЗЮМЕ. Исследованы акустические свойства в неоднородных, пластически деформированных образцах стали 09Г2С. После пластической деформации образцы последовательно термически обрабатывали и наводороживали из газовой фазы. После каждого этапа измеряли пространственное распределение скорости акустической волны. Проанализированы механизмы изменения скорости в области образца с остаточной деформацией при наводороживании.

SUMMARY. The acoustical properties of inhomogeneous, plastically deformed 09Г2С steel specimens were studied. After plastic deformation, specimens were successively heat treated and hydrogenated from the gas phase. Spatial distribution of the longitudinal acoustic wave velocity was measured after each procedure. The process of velocity change in the sample region with residual deformation under hydrogenation was analyzed.

List of papers published in "Physicochemical Mechanics of Materials" in 2016 125
Authors' index 130