

Міністерство освіти та науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

Міжвузівський збірник наукових праць
(за галузями знань «Фізико-математичні
науки» та «Технічні науки»)

Випуск 75

Луцьк 2023

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Включено до категорії Б Переліку наукових фахових видань України (відповідно до Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15 січня 2018 року № 32, зареєстрованого в Мін'юсті України 06 лютого 2018 року за № 148/21600) за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» за науковими спеціальностями: 105 Прикладна фізика та наноматеріали; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування – від 24.09.2020 р., Наказ МОН України № 1188 та за науковими спеціальностями 113 Прикладна математика, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – від 26.11.2020 р., Наказ МОН України № 1471.

DOI 10.36910/6775.24153966.2023.75

В збірнику можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії

Веб-сайт збірника:

http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky

Довідки за e-mail: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 12 від 30 червня 2023 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

ISSN: 24-15-39-66

© Луцький національний технічний університет, 2023 р.

РЕДАКЦІЙНИЙ ШТАТ

Головний редактор:

Рудь Віктор Дмитрович д.т.н., проф., професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету

Заступник головного редактора:

Шимчук Сергій Петрович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

Відповідальний секретар:

Клименко Олександр Дмитрович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

Редакційна колегія:

Жигуц Юрій Юрійович д.т.н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування Ужгородського національного університету;

Каплун Павло Віталійович д.т.н., доц., професор кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницького національного університету;

Клименко Сергій Анатолійович д.т.н., проф., заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

Майстренко Анатолій Львович д.т.н., проф., завідувач відділу Комп'ютерного матеріалознавства надтвердих композиційних матеріалів для породоруйнівних інструментів Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

Стельмах Олександр Устимович д.т.н., с.н.с., професор Пекінського технологічного університету (Китай);

Заболотний Олег Васильович к.т.н., доц., проректор з науково-педагогічної роботи та досліджень Луцького національного технічного університету;

Сомов Дмитро Олександрович к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки Луцького національного технічного університету;

Ткачук Анатолій Анатолійович к.т.н., доц., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій Луцького національного технічного університету;

Рібейро Луїс Фролен д.т.н., проф., професор Політехнічного інституту Браганси (Португалія);

Елісон МакМілан (Alison J Mcmillan), Professor (Full) in Aerospace Technology, Wrexham Glyndwr University, United Kingdom;

Баглюк Генадій Анатолієвич д.т.н., проф., заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І. францевича НАН України;

Дядюра Костянтин Олександрович д.т.н., проф., професор кафедри ПМ і ТКМ Сумського державного технічного університету;

Єфременко Василь Георгійович д.т.н., проф., завідувач кафедри фізики, професор кафедри матеріалознавства та перспективних технологій ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»;

Лобода Петро Іванович д.т.н., проф., декан інженерно-фізичного факультету НТУ "КПІ" ім. І. Сікорського;

Савчук Петро Петрович д.т.н., проф., п.н.с. НДЧ Луцького національного технічного університету;

Уманський Олександр Павлович д.т.н., проф., завідувач відділу матеріалознавства та інженерії високостійких поверхневих шарів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН;

Штерн Михайло Борисович завідувач відділу реологічних та фізико-хімічних основ технології порошкових матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України;

Зайчук Наталія Петрівна к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Імбірович Наталія Юріївна к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Кашицький Віталій Павлович к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

Повстяной Олександр Юрійович к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки Луцького національного технічного університету;

Налобіна Олена Олександрівна д.т.н., проф., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання Національного університету водного господарства та природокористування;

Мартинюк Віктор Леонідович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

Пуць Віталій Степанович к.т.н., доц., завідувач кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету;

Цизь Ігор Євгенович к.т.н., доц., доцент кафедри аграрної інженерії Луцького національного технічного університету;

Мікуліч Олена Аркадіївна д.т.н., доц., доцент кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Пастернак Ярослав Михайлович д.ф.-м.н., доц., завідувач кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

Пальчевський Богдан Олексійович д.т.н., проф., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;

Лапченко Юрій Сергійович к.т.н., доц., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;

Крадінова Тетяна Адамівна к. ф.-м. н., доц., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету;

Луцьов Сергій Валентинович к. ф.-м. н., доц., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету;

Федосов Сергій Анатолійович д. ф.-м. н., проф., професор кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Яцек Щот (Jacek Szczot) PhD, голова правління машинобудівного підприємства з виготовлення високоточного обладнання WSK Poznan, Польща.

ЗМІСТ

<i>Зміст</i>	5
<i>Р.Г. Редько, Р.А. Склярів, В.В. Шанайда</i> Порівняльно-правовий аналіз законодавства в області інтелектуальної власності в країнах ЄС та Україні.....	9
<i>Й.Й. Лучко, Б.З. Парнета, А.Я. Пенцак</i> Дослідження і посилення коротких консолей та вузлів спряження ригелів і колон серії ПС-04-2.....	15
<i>Б.О. Пальчевський, Л.М. Маркіна</i> Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту.....	22
<i>В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквіна, О.Б. Логінова, І.М. Зайцева, В.В. Тимошенко</i> Вплив об'ємних та поверхневих дефектів вихідних шліфпорошків алмазу марки АС6 на зміну їх фізико-механічних властивостей.....	27
<i>О. С. Безсмертний</i> Застосування стенду для дослідження робочих коліс відцентрового насоса створених методом 3D друку.....	32
<i>Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, Г.А. Базалій</i> Особливості фізико-механічних характеристик порошку алмазу марки АС20 зернистості 100/80 та продуктів його флотаційного розділення.....	36
<i>І.В. Кругляк, Б.П. Середа</i> Підвищення надійності зубчастих коліс натискного механізму блюмінгу.....	40
<i>А.О. Мартинович, П.О. Гуменюк</i> Моделювання транспортних потоків при дослідженні руху на керованих перехрестях.....	44
<i>В.І. Захарчук, О.В. Захарчук, В.В. Шваб'юк, В.В. Ярошук</i> Заходи щодо розширення використання газових палив в технологічних транспортних засобах.....	52
<i>О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко</i> Дослідження термічних і трибологічних властивостей вуглепластика на основі фенілону С-2.....	57
<i>О.М. Пилипенко, Л.Г. Полонський, Я.А. Степчин, В.М. Ночвай, Д.О. Сомов, Дахнюк О.П.</i> Кінематика вібромеханічного шліфування покриттів.....	62
<i>В.С. Волкотруб, Л.О. Гуменюк</i> Автоматизація процесу виявлення тріщин на основі обробки зображень.....	67
<i>С.В. Луньов, П.Ф. Назарчук, О.В. Бурбан</i> Особливості тензоопору монокристалів N-GE при сильних одновісних тисках.....	74
<i>О. М. Рощенко</i> Інноваційні технології 3d друку у промисловості: загальний аспект.....	78
<i>А.В. Кузьмов</i> Дилатансійно чутлива модель пластичності пористих матеріалів отримана аналітичними методами мікромеханіки.....	85
<i>С.П. Шимчук, Н.П. Зайчук, М.С. Півницький, І.В. Орловський, Яцек Щот</i> Проблема імпортозаміщення матеріалів конструкційного призначення машинобудівними підприємствами України.....	92
<i>В.І. Шваб'юк, Т.В. Фурс, Н.В. Коменда, С.Б. Мікуліч</i> Інтегральні рівняння задачі дифракції хвиль у пружних середовищах з включеннями за дії нестационарних навантажень.....	95
<i>В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквіна, І.М. Зайцева, Г.А. Петасюк, Л.Й. Котинська, Д.Г. Міндіч</i> Домішки та включення в алмазних зернах, як фактор, який необхідно враховувати при застосуванні алмазних шліфпорошків в алмазному інструменті.....	99
<i>О.В. Іванюк</i> Утилізація червоного шламу в технології неорганічних пігментів: термодинамічні аспекти.....	105
<i>Р.В. Пузік, В.Ю. Кондусь, І.В. Павленко, А.С. Твердохліб</i> Аналіз перспектив зменшення енергоспоживання вільновихрових насосів для перекачування рідин з включеннями.....	113
<i>Н.Ю. Імбірович, О.І. Звірко, О.Ю. Повстяной, А. І. Дубіцкі</i> Особливості формування та морфології поверхні біо-покриттів, насичених природними кремністими сполуками.....	120
<i>А.М. Степанчук, С.Ю.Тесля, Сунь Ціхао, Д. Є. Чижська</i> Закономірності отримання порошків сплаву Al-15Fe з дисперсно зміцненою структурою методом механічного диспергування розплаву.....	126
<i>А.В. Мініцький, К.В. Поліщук, О.І. Юркова, Н.В. Мініцька, С.О. Наконечний</i> Вплив способу введення нікелевої звязки на структуру і властивості сплавів на основі вольфраму.....	134
<i>В.О. Лукашук, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік</i> Автоматизована система керування темпер-камерою під час технологічного процесу виробництва темного плиткового шоколаду.....	140

І.В. Красіков, І.Є. Красікова, В.В. Картузов Вплив розмиття зображення структури матеріалу на визначення її мультифрактальних характеристик.....	146
Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, О.М. Сизоненко, Г.А. Базалій, С.Д. Заболотний вплив імпульсного оброблення високовольтними електричними розрядами та флотаційного розділення на фізико-механічні та морфометричні характеристики порошків синтетичного алмазу марки АС20 зернистості 100/80.....	154
Д. М. Квашук, І. Г. Бабічев Похибка дискретного методу вимірювання кутових прискорень валів електродвигунів.....	158
Ю.В. Трофімова, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік Особливості проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж об'єктів систем автоматизації.....	168
В. М. Максимич Ієрархічна гетероструктура, синтезована на основі напівпровідникової матриці селеніду індію і супрамолекулярного комплексу тіосечовина<дихлорид кобальту>: виготовлення та фізичні властивості.....	172
С.А. Федосов, Д.А. Захарчук, О.В., Замуруєва, Ю.В. Коваль Рівень Фермі в кристалах n-CdSb з глибокими енергетичними рівнями дефектів.....	180
Н.В. Данилюк Фотокаталітична деградація типових антибіотиків.....	186
В.В. Наход, М.І. Скіпалький, П.В. Сахнюк, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов Моделювання процесів формування гетероструктур.....	193
О. В. Верешко, Св.Св. Гомон Напружено-деформований стан згинальних дерев'яних елементів в умовах впливу агресивного кислотного середовища з врахуванням повних діаграм деформування матеріалу.....	200
Р.Я. Швець, Ф.О. Іващишин Електропровідні властивості мультипошарового інтеркалату InSe<прополіс>.....	206
З.С. Сірко, О.Ю. Цапко, І.О. Швачич, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко Вогнезахист целюлозовмісних матеріалів.....	213
О.В. Андрійчук, М.О. Щьоголев Застосування методів підтримки прийняття рішень та обчислювальної лінгвістики для визначення рівня соціальної напруженості.....	217
З.С. Сірко, Д.П. Торчишевський, В.М. Грицун, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко Інструмент для шліфування профільних погонажних виробів із деревини та деревинних матеріалів.....	225
З.С. Сірко, Д.П. Торчишевський, В.М. Грицун, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко Механічні властивості сталі марки 7ХНМФБ для виготовлення дереворізальних пил.....	228
О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, С.В. Настасяк Моделювання росту систем тріщин у металевих пластинах за дії довготривалого розтягу і воденьвмісних середовищ.....	231
А.В. Подворний, В.М. Трач Вплив шаруватості на напружено-деформований стан анізотропних циліндричних оболонок під осьовим тиском в просторовій постановці.....	240
О. А. Нестеров Метод підвищення циклічної тріщиностійкості сталей морських портових конструкцій.....	246
В.Г. Вербицький, А.Є. Бондаренко, Є.М. Місько, О.О. Разбойніков До побудови математичної моделі просторових вертикальних коливань зчленованого автопотяга.....	251
О.О. Чайка Визначення параметрів стрічки льону в процесі її підбирання.....	257

CONTENTS

Contents	7
R. Redko, R. Sklyarov, V. Shanaida Comparative legal analysis of legislation in the branch of intellectual property in EU countries and Ukraine.....	9
J. Luchko, B. Parneta, A. Pentsak Research and strengthening of short consoles and connection nodes of beams and columns series IIS-04-02.....	15
B. Palchevskiy, L. Markina Intelligent system for controlling the process of batch preparation and its water-heat treatment in the production of alcohol.....	22
V.I. Lavrinenko, H.D. Ilnytska, V.V. Smokvyna, O.B. Loginova, I.M. Zaitseva, V.V. Tymoshenko Influence of volumetric and surface defects of the initial grinding powders of diamond grade AC6 on the change in their physical and mechanical properties	28
O. S. Bezsmertnyi Application of the stand for investigation of centrifugal pump impellers created by 3D printing method.....	32
N.O. Oliinyk, G.D. Ilnytska, G.A. Petasyuk, G.A. Bazaliy Features of the physical and mechanical characteristics of diamond powder, AC20 brand, grain 100/80, and the products of its flotation separation.....	36
I.V. Kruglyak, B.P. Sereda The reliability of the gears of the pressure blooming mechanism.....	40
A. Martynovych, P. Humeniuk Modeling of traffic flows in the study of traffic at controlled intersections.....	44
V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, V. Shvabyuk, V. Yaroshchuk Measures to expand the use of gas fuels in technological vehicles.....	52
O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko Research of thermal and tribological properties carbon plastic based on phenylone C-2.....	57
O. Pilipenko, L. Polonsky, Ya. Stepchin, V. Nochvay, D. Somov, O. Dakhnyuk Kinematics of vibro-mechanical grinding of coatings.....	62
V. Volkotrub, L. Gumeniuk Automation of the crack detection process based on image processing...	67
S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban Peculiarities of the tensoresistance of N-GE single crystals at the strong uniaxial pressures.....	74
O. Roschenko Innovative 3D printing technologies in industry: general aspect.....	78
A. Kuzmov Micromechanics based dilatancy-sensitive plasticity model of porous materials in closed-form analytical solutions.....	85
Shymchuk S.P., Zaichuk N.P., Pivnytskyi M.S., Orlovskiy I.V., Jacek Shchot The problem of import substitution of materials for construction purposes by machine-building enterprises of Ukraine.....	92
V.I. Shvabyuk, T.V. Furs, N.V. Komenda, S.B. Mikulich Integral equations of wave diffraction problem in elastic media with inclusions under the action of non-stationary load.....	95
V.I. Lavrinenko, H.D. Ilnytska, V.V. Smokvyna, I.M. Zaitseva, H.A. Petasiuk, L.Yo. Kotynska, D.H. Mindich Impurities and inclusions in diamond grains as a factor to be considered when using diamond grinding powders in diamond tool.....	99
E.V. Ivanyuk Utilization of red sludge in technology of inorganic pigments: thermodynamic aspects.....	105
R. Puzik, V. Kondus, I. Pavlenko, A. Tverdokhlib Analysis of the prospects for reducing energy consumption of torque flow pumps for pumping liquids with inclusions.....	113
N.Yu. Imbirovych, O.I. Zvirko, O.Yu. Povstianoi, A.Dubicki Features of the formation and surface morphology of biocoatings saturated with natural silicon compounds.....	120
A.N. Stepanchuk, S.Y. Teslia, Qihao Sun, D. Ye. Chyzhska The process of obtaining Al-15fe powder with dispersion strengthened microstructure by centrifugal atomization.....	126
A.V. Minitskiy, K.V. Polyshchuk, O. I. Yurkova, N.V. Minitska, S.O. Nakonechnyi Influence of the method of nickel bonding on the structure and properties of tungsten-based alloys.....	134
V.O. Lukashuk, I.S. Condius, L.Y. Fedik Automated control system of the temperature chamber during the technological process of the production of dark bar chocolate.....	140
I.V. Krasikov, I.E. Krasikova, V.V. Kartuzov The effect of image blurring on the determination of its multifractal characteristics in material structures.....	146
N.O. Oliinyk, H.D. Ilnytska, G.A. Petasyuk, O.N. Sizonenko, G.A. Bazaliy, S.D. Zabolotnyi Influence of impulse processing with high-voltage electrical discharges and flotation separation on the physical-mechanical and morphometric characteristics of AS20 brand synthetic diamond powder with granularity 100/80.....	154

D. Kvashuk, I. Babichev Methodological error of discrete methods of measuring constant angular accelerations of electric motors shaftsю.....	158
Yu.V. Trofimova, I.S. Kondius, L.Y. Fedik Features of computer network communication line design automation system objects.....	168
V. M. Maksymych Hierarchical heterostructure synthesized on the basis of an indium selenide semiconductor matrix and supramolecular complex thiourea<cobalt(II) chloride>: fabrication and physical properties.....	172
S. Fedosov, D. Zakharchuk, O. Zamurujeva, Yu. Koval Fermi level in <i>n</i> -CdSb crystals with defect deep energy levels.....	180
N.V. Danyliuk Photocatalytic degradation of some typical antibiotics.....	186
V. Nakhod, M. Skipalskiy, P. Sakhniuk, O. Zamurujeva, S. Fedosov Modeling of processes forming heterostructures.....	193
O. V. Vereshko, S.S. Homon The stressed and deformed state of bending wooden elements under influence of an aggressive acid environment taking into account complete diagrams of the deformation material.....	200
R. Ya. Shvets, F.O. Ivashchyshyn Electrical properties of multilayer intercalate InSe<propolis>.....	206
Z.S. Sirko, O.Y. Tsapko, I.O. Shvachych, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko Fire protection of cellulose-containing materials.....	213
O.V. Andriichuk, M.O. Shchoholiev Application of decision-making and computational linguistic methods for overall estimation of the level of social tension.....	217
Z.S. Sirko, D.P. Torchylevskiy, V.M. Hrytsun, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko A tool for grinding profiled wood products and wood materials.....	225
Z.S. Sirko, D.P. Torchylevskiy, V.M. Hrytsun, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko Mechanical properties of steel grade 7XHMФБ for manufacturing wood cutting saws.....	228
O.Ye. Andreykiv, I.Ya. Dolinska, S.V. Nastasyak Simulation of the growth of crack systems in metal plates under the action of long-term stretching and hydrogen-containing environments.....	231
A.V. Podvornyi, V.M. Trach Influence of layering on the stress-strain state of anisotropic cylindrical shells under axial pressure in a spatial formation.....	240
O. A. Nesterov A method of increasing cyclic crack resistance of steel of marine port structures.....	246
V.G. Verbytskyi, A.E. Bondarenko, E.M. Misko, O.O. Razboinikov To the construction of a mathematical model of spatial vertical oscillations of an articulated train.....	251
O.O. Chaika Determination of linen ribbon parameters in the process of its selection.....	257

О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ С-2

Досліджені основні термічні і трибологічні властивості вуглепластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, армованого метал-вмісним вуглецевим волокном. Показано, що армування поліамідного в'язучого хром-вмісним вуглецевим волокном у кількості 17 мас. % підвищує його термостійкість, знижує коефіцієнт тертя та збільшує зносостійкість і критерій працездатності матеріалу.

Ключові слова: ароматичний поліамід фенілон С-2, хром-вмісне вуглецеве волокно, вуглепластик, термостійкість, коефіцієнт тертя, інтенсивність лінійного зношування, критерій працездатності

O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko

RESEARCH OF THERMAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES CARBON PLASTIC BASED ON PHENYLONE C-2

The main thermal and tribological properties of carbon fiber reinforced plastic based on aromatic polyamide phenylone C-2 reinforced with metal-containing carbon fiber have been researched. It is shown that the reinforcement of the polyamide binder with chromium-containing carbon fiber in the amount of 17 wt. % increases the thermal stability of the polymer by an average of 25-35°C. The study of the possible mechanism and the calculation of the kinetic parameters of the process of thermal destruction of the developed carbon fiber indicates that it is best described by the equation of one-dimensional diffusion. At all studied sliding speeds, the coefficient of friction of carbon fiber decreased with an increase in specific loads by 1.7-2.3 times, and the wear resistance of the material increased being in the range of $5.0-3.5 \cdot 10^9$. The performance criterion PV of carbon fiber was 1.2 MPa · m/s, which was 1.5 times higher than the criterion PV of phenylone C-2. The developed carbon fiber is recommended as an antifriction material for friction units of machines and mechanisms.

Key words: aromatic polyamide phenylone C-2, chromium-containing carbon fiber, carbon plastic, thermal stability, coefficient of friction, intensity of linear wear, performance criterion

Інтенсивний розвиток сучасної техніки сприяє розширенню застосування тепло- і термостійких полімерів, що мають високі деформаційно-міцнісні характеристики, тривалу працездатність у широкому інтервалі температур і стійкість до впливу агресивних середовищ. Завдяки високій теплостійкості, втомлювальній міцності, покращеним механічним і електроізоляційним показникам ароматичний поліамід фенілон С-2 останнім часом широко застосовується для заміни інших видів полімерів, металу та гуми [1]. Поєднання цих властивостей з високою зносостійкістю при терті дозволило використовувати фенілон як матеріал для вузлів тертя [2]. Однак в умовах жорстких експлуатаційних режимів і поганого тепловідведення внаслідок недостатньо високих теплофізичних показників може відбуватися саморозігрів вузла тертя і, як наслідок, фенілон починає втрачати свою працездатність.

З метою створення нового полімерного композиту конструкційного призначення з покращеними експлуатаційними характеристиками ароматичний поліамід фенілон С-2 (ФС-2) армували хром-вмісним вуглецевим волокном (Cr-BB) у кількості 17 мас. %.

Хром-вмісне вуглецеве волокно, що містить у своєму складі оксид хрому Cr_2O_3 , при температурі термічної обробки 800-900°C каталізує утворення фази нанорозмірного структурно-впорядкованого вуглецю, структурним елементом якого є графенові шари. Наявність в структурі Cr-BB мікронного розміру (діаметр волокна – близько 6-8 мкм) нанорозмірних фаз металу і структурно-впорядкованого вуглецю надає волокнистому наповнювачу комплекс нових властивостей, характерних для нанорозмірних об'єктів і відкриває широкі можливості їх практичного використання, зокрема, для виготовлення деталей конструкційного призначення [3].

Попередні наукові дослідження свідчать про те, що введення металу в структуру BB покращує його змочуваність полімерним в'язучим і впливає на взаємодію між полімером і наповнювачем на межі розподілу фаз, що сприяє покращенню міцнісних властивостей вуглепластику [4].

Одним із ефективних методів прогнозування поведінки полімерних композитів в умовах високих температур, є термогравіметричний метод аналізу (ТГА). Відомо, що термостійкість визначається тією температурною межею, при якій починається термічна або термоокиснювальна деструкція матеріалу, яка супроводжується виділенням летких продуктів. Внаслідок цього має місце втрата у масі досліджуваного зразка, що і лежить в основі термогравіметричного аналізу.

Диференційний термічний аналіз є чутливим методом, що дозволяє відзначати зміни, що відбуваються при нагріванні матеріалу і супроводжуються виділенням чи поглинанням тепла [5].

На початковому етапі досліджень вивчали дані термогравіметричного аналізу волокнистого наповнювача. Контур кривої ТГА “втрата-маси – температура” Cr-BB, представлений на рис. 1, свідчить про те, що поступове зменшення маси (0,4-4,2%) в інтервалі температур 300-423 К спостерігалось за рахунок видалення вологи і лише за температури 1073 К волокно почало втрачати 8,8 % маси (табл. 1).

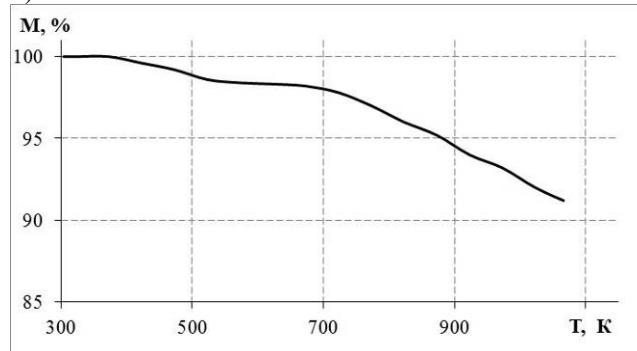


Рис. 1. Термогравіметрична крива Cr-BB

Табл. 1.

Термостійкість хром-вмісного вуглецевого волокна

Матеріал	T ₁	T ₃	T ₅	T ₁₀
Cr-BB	493	773	881	–

Примітка: T₁, T₃, T₅, T₁₀ – температури 1, 3, 5 та 10 % втрати маси, К

Результати проведених термічних досліджень (рис. 2) свідчили про те, що армування ароматичного поліаміду фенілон С-2 Cr-BB, дозволило суттєво підвищити його термостійкість (табл. 2). Зокрема, температура, при якій відбувалась 10, 20 і 30%-ва втрата маси зразків ВП відбувалась відповідно на 13, 22 і 35°C вище, ніж для вихідного полімеру.

Табл. 2.

Термостійкість фенілону С-2 і вуглепластика на його основі

Матеріал	Температура, °С				
	T ₀	T ₅	T ₁₀	T ₂₀	T ₃₀
ФС-2	82	170	407	452	482
ФС-2 + 17% Cr-BB	100	304	426	474	517

T₀, T₅, T₁₀, T₂₀, T₃₀ – температури початку, 5, 10, 20 та 30 % втрати маси, К

На кривій ТГА до температури 500 °С спостерігався плавний хід кривих фенілону С-2 і ВП на його основі без яскраво виражених змін (рис. 2б), а інтенсивна деструкція матеріалів, яка супроводжувалась суттєвою втратою маси, почала проявлятися при температурі 600 °С. На кривій ДТА на цій ділянці спостерігався екзотермічний пік, який характеризує процес розкладу полімерного в'язучого [6], при цьому його величина для ВП була більшою у порівнянні з вихідним полімером, що свідчить про більш інтенсивний процес розкладу ВП.

Визначення можливого механізму і розрахунок кінетичних параметрів процесу термодеструкції досліджуваних матеріалів здійснювали з використанням інтегральних кінетичних рівнянь різних механізмів гетерогенних процесів (табл. 3).

Критеріями вибору математичного рівняння були коефіцієнт кореляції прямої r у координатах рівняння Арреніуса і мінімум функції S :

$$S = f \{ \alpha(\tau), T(\tau), \Delta T(\tau), E_{акт.}, Z \},$$

$$S = \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(\alpha_e - \alpha_p)^2}{m}} \right)^{1/2}$$

де: α_e , α_p – експериментальні та розрахункові значення ступеня перетворення; m – кількість експериментальних даних; T – температура, К; $E_{акт.}$ – енергія активації; Z – передекспоненціальний множник.

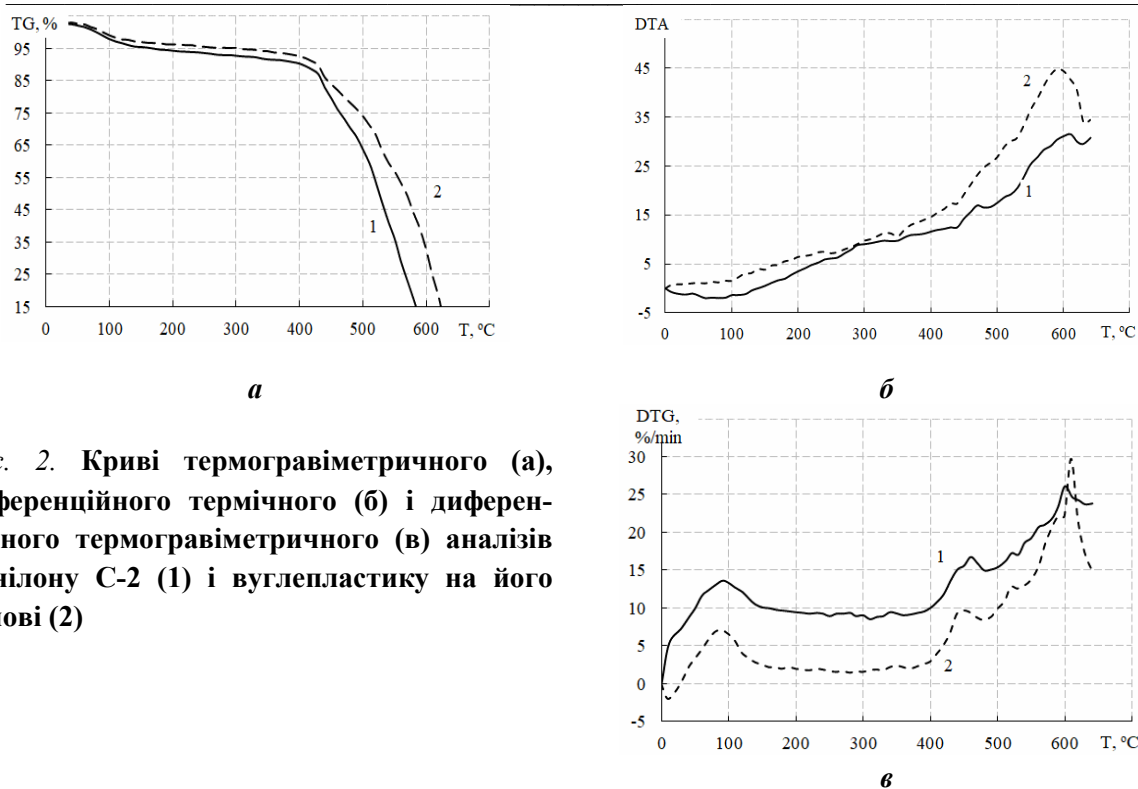


Рис. 2. Криві термогравіметричного (а), диференційного термічного (б) і диференційного термогравіметричного (в) аналізів феноліону С-2 (1) і вуглепластику на його основі (2)

Табл. 3.

Кінетичні рівняння різних механізмів гетерогенних процесів [7]

Кінетичне рівняння	Процес, що визначає швидкість реакції	Математичні рівняння
$k\tau = \alpha$	Зародкоутворення за степеневим законом $n = 1$	(1)
$k\tau = 2\alpha^{1/2}$	Зародкоутворення за степеневим законом $n = 2$	(2)
$k\tau = 2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$	Реакція на границі розділу фаз: – циліндрична симетрія	(3)
$k\tau = 3[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	– сферична симетрія	(4)
$k\tau = -\ln(1 - \alpha)$	Випадкове зародкоутворення, одне ядро на кожен частку	(5)
$k\tau = 2[-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, $n = 2$	(6)
$k\tau = 3[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, $n = 3$	(7)
$k\tau = 4[-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, $n = 4$	(8)
$k\tau = 1/2 \alpha^2$	Одномірна дифузія	(9)
$k\tau = (1 - \alpha)\ln(1 - \alpha) + \alpha$	Двовимірна дифузія, циліндрична симетрія	(10)
$k\tau = 3/2[1 - (1 - \alpha^{1/3})]^2$	Тривимірна дифузія, сферична симетрія	(11)
$k\tau = 3/2[(1 - 2/3\alpha) - (1 - \alpha)^{2/3}]$	Двовимірна дифузія, рівняння Гістлінга-Броунштейна	(12)

Результати розрахунку вихідних параметрів термодеструкції досліджуваних речовин: коефіцієнта кореляції (r), мінімуму функції (S), енергії активації ($E_{акт.}$), передекспоненціального множника (Z), розраховані за програмою [7], розробленою для ПК, наведені в таблиці 4.

Високі значення коефіцієнта кореляції та мінімальне значення функції S були отримані за кінетичним рівнянням одновимірної дифузії (9):

$$k\tau = 1/2 \alpha^2,$$

тому слід вважати, що саме це рівняння найбільш адекватно описує процес термодеструкції феноліону С-2 та ВП на його основі.

Дослідження трибологічних властивостей ароматичного поліаміду і ВП на його основі в режимі сухого тертя здійснювали на дисковій машині тертя.

Табл. 4.

Кінетичні параметри термодеструкції матеріалів

Математичні рівняння процесу	r	S	$E_{акт.}$, кДж/моль	$\lg Z$
ФС-2				
(1)	0,771	0,141	18,89	-2,73
(3)	0,776	0,133	24,449	-2,32
(4)	0,775	0,133	26,692	-2,15
(5)	0,770	0,144	31,865	-1,75
(9)	0,901	0,124	61,939	-1,05
(10)	0,893	0,203	68,457	-0,55
(11)	0,880	0,258	77,544	-0,31
(12)	0,889	0,258	71,391	-0,79
ФС-2 + 17 % Cr-BV				
(1)	0,494	0,144	8,467	-3,27
(3)	0,560	0,136	12,213	-2,96
(4)	0,576	0,135	13,655	-2,84
(5)	0,599	0,137	16,859	-2,57
(9)	0,887	0,118	47,649	-1,75
(10)	0,878	0,193	52,180	-1,36
(11)	0,864	0,246	58,024	-1,33
(12)	0,874	0,216	54,089	-1,67

Зношування зразка оцінювали за схемою диск (сталь 45, HRCэ 50, Ra = 0,08) – зразок ВП (\varnothing 10 мм, висота 10 мм) при питомих навантаженнях $P = 0,2$ – $0,8$ МПа, швидкості ковзання $v = 1, 1,5, 2,0$ м/с, шлях тертя складав 1000 м. Зношування зразків визначали на аналітичних терезах ВЛР-200 з точністю 0,0002 г.

Результати досліджень по вивченню впливу режимів експлуатації на трибологічні властивості зразків свідчили про те, що розроблений ВП має низький коефіцієнт тертя і гарну зносостійкість (рис. 3).

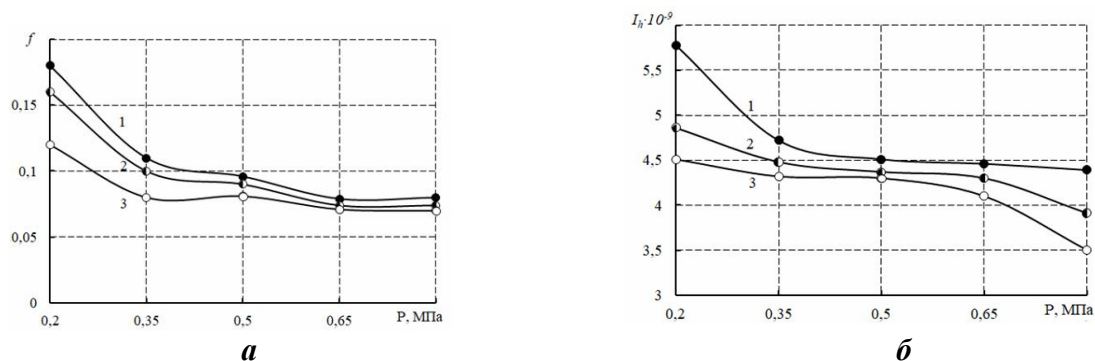


Рис. 3. Вплив питомого навантаження на коефіцієнт тертя (а) і інтенсивність лінійного зношування (б) зразків вуглепластика на основі фенілоу С-2, досліджених при швидкостях ковзання 1 (крива 1), 1,5 (крива 2) і 2 м/с (крива 3)

Найбільш високі значення коефіцієнта тертя і інтенсивності лінійного зношування зберегались для зразків ВП, що експлуатувались при швидкості ковзання $v = 1$ м/с. В даних умовах при збільшенні питомого навантаження від 0,2 до 0,8 МПа відбувалось рівномірне падіння коефіцієнта тертя від 0,18 до 0,08, а інтенсивність лінійного зношування зменшилась майже на 25 %. Коефіцієнт тертя зразків ВП при експлуатації в умовах швидкостей ковзання 1,5 і 2 м/с при збільшенні питомого навантаження зменшувався від 0,16 до 0,074 та від 0,12 до 0,07 відповідно (рис. 3а).

Попередньо проведений рентгеноструктурний аналіз ВП (рис. 4) показав, що у порівнянні з вихідним полімером аморфне гало, яке спостерігалось на рентгенограмах в області кутів Вульфа-Брега $2\theta = 20-30$ рад суттєво зменшилось. Вказаний факт дозволяє зробити висновок про те, що ВП має більш виражену кристалічну структуру у порівнянні з полімерним в'язучим. Це, в свою чергу, призводить до формування більш досконалої структури ВП, що дозволяє гальмувати розвиток деструкційних процесів у полімерній матриці при стиранні.

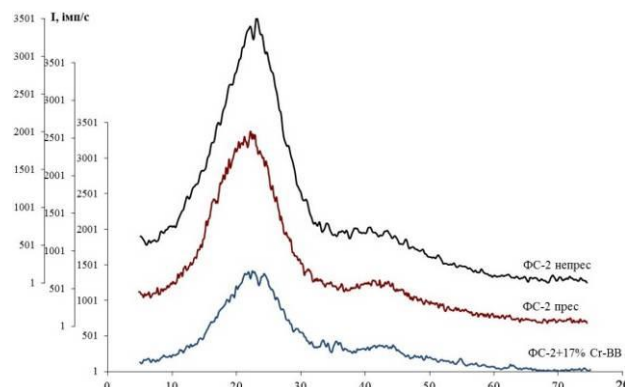


Рис. 4. Рентгенограми фенілону С-2 і вуглепластику на його основі, армованого 17 мас.% Cr-BB

Тому цілком закономірним є той факт, що зносостійкість ВП була значно вища, ніж у неармованого фенілону С-2. При $v = 1,0$ м/с зносостійкість ВП була більш, ніж у 10 разів вища, ніж у чистого полімеру; при $v = 1,5-2,0$ м/с зразки фенілону С-2 катастрофічно зношувались і втрачали свою працездатність, в то час, як ВП стабільно працював і мав інтенсивність лінійного зношування, яка знаходилась в межах $5,0-3,5 \cdot 10^{-9}$ [8]. Критерій працездатності PV (добуток питомого навантаження на швидкість ковзання) для ВП дорівнює $1,2$ МПа \cdot м/с і у $1,5$ разів перевищував PV чистого полімеру, для якого він становив $0,8$ МПа \cdot м/с.

Таким чином, проведений комплекс досліджень ВП на основі фенілону С-2, армованого 17 мас. % Cr-BB, свідчить про його покращені термічні і трибологічні властивості. Вказаний матеріал має підвищену термостійкість, низький коефіцієнт тертя, високу зносостійкість в широкому інтервалі режимів експлуатації, що дозволяє рекомендувати його до використання як матеріал вузлів рухомих з'єднань машин та механізмів.

Список використаних джерел:

- [1] Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. Л.: Химия, 1978. – 384 с.
- [2] Справочник по пластическим массам / Под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. М.: Химия, 1975. – 568 с.
- [3] Сафонова А.М., Шпилевская Л.Е. Металлоуглеродные волокнистые наполнители и полимерные композиции на их основе // Перспективные материалы. – № 6. –2003. – С. 16-20.
- [4] Чигвинцева О.П., Рула І.В. Вуглепластик конструкційного призначення на основі ароматичного поліаміду і метал-вмісного вуглецевого волокна // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2021, №71, С. 157-162.
- [5] Коршак В.В. Термостойкие полимеры. М.: Наука. 1969. С. 25.
- [6] Соколов Л.Б. Термостойкие и высокопрочные полимерные материалы. М.: Знание, 1984, 64 с.
- [7] Zuru A.A., Whitehead R., Criffiths D.L. A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non-isothermal thermogravimetric data // Thermochim. Acta, 164, 1990. – P. 285-305.
- [8] Чигвинцева О.П., Рула І.В., Токар А.В., Кравченко С.В., Петрушина Г.О. Вивчення властивостей вуглепластика на основі фенілона С-2 // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, Випуск 64, 2018, С. 236-242.

Рецензенти: О.Д. Деркач, Завідувач кафедрою експлуатації машино-тракторного парку Дніпровського державного аграрно-економічного університету к.т.н., доцент.

О.С. Кабат, завідувач кафедри інноваційної інженерії, ДВНЗ “Український державний хіміко-технологічний університет”, д.т.н, професор.

Ціна договірна

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

Веб-сайт збірника:

http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky

Довідки за e-mail: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 12 від 30 червня 2023 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

ISSN: 24-15-39-66

Редакційно-видавничий відділ Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2023 р.