



**Тернопільський осередок
Наукового товариства ім. Шевченка**

ЗБІРНИК ПРАЦЬ

Том 9

Сучасні проблеми техніки і технологій

Тернопіль
Астон
2014

Присвячується 200-річчю

від дня народження

Т.Г.Шевченка і

170-річчю від дня народження

І.П.Пулюя

Тернопільський осередок
Наукового товариства ім. Шевченка

ЗБІРНИК ПРАЦЬ
Том 9

Сучасні проблеми техніки і технологій

Тернопіль
Астон
2014

Ternopil Branch of
Shevchenko Scientific Society

SCIENTIFIC COLLECTION
Volume 9

**Modern problems of engineering and
technologies**

Ternopil
Aston
2014

Збірник праць. Т.9: Сучасні проблеми техніки і технології / Тернопільський осередок Наукового товариства ім. Шевченка / відп. ред.: М. Андрейчин, ред. тому: П. Ясній. – Тернопіль : Астон, 2014. – 215 с. – (ТО НТШ).

Відповідальний редактор серії — заслужений діяч науки і техніки України, член-кореспондент НАМН України, дійсний член НТШ, доктор медичних наук, професор **Михайло Андрейчин**

Редактор тому — заслужений діяч науки і техніки України, дійсний член НТШ, доктор технічних наук, професор **Петро Ясній**

Редакційна колегія:

доктор технічних наук, професор **Володимир Андрійчук**; заслужений діяч науки і техніки України, дійсний член НТШ, доктор економічних наук, професор **Богдан Андрушків**; кандидат технічних наук, доцент **Володимир Дзюра**; доктор технічних наук, професор **Богдан Гевко**; доктор технічних наук, професор **Петро Євтух**; доктор технічних наук, професор **Михайло Пилипець**; заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор **Тимофій Рибак**; доктор технічних наук, професор **Роман Рогатинський**; кандидат фізико-математичних наук, доцент **Юрій Скоренький** (відповідальний секретар)

Рецензенти:

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор **Олександр АНДРЕЙКІВ**;
доктор технічних наук, професор **Ігор Луців**

Затверджено до друку вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (протокол № 9 від 21.10.2014 р.)

На палітурці – автопортрет Тараса Шевченка, створений поетом у 1857 році.

ISBN 978-966-308-572-2

© Тернопільський осередок Наукового товариства ім. Шевченка, 2014

ЗМІСТ

Передмова.....	11
----------------	----

Історія науки

Олександр Рокіцький

ІВАН ПУЛЮЙ (1845–1918).....	12
-----------------------------	----

Ольга Збожна

ІВАН ПУЛЮЙ І ТОВАРИСТВА УКРАЇНСЬКОЇ МОЛОДІ: ТАЄМНА «ГРОМАДА» ТА ЛЕГАЛЬНА «СІЧ» (до 170-річчя від дня народження Івана Пулюя).....	23
---	----

Микола Підгурський, Майкл Внук

ВНЕСОК С.П. ТИМОШЕНКА У РОЗВИТОК СВІТОВОЇ ІНЖЕНЕРНОЇ НАУКИ ТА ОСВІТИ.....	37
--	----

Машинобудування та механіка

Петро Ясній, Юрій Пиндус, Олег Галущак

СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ З УРАХУВАННЯМ НАПРУЖЕННЯ ВІДКРИТТЯ ТРІЩИНИ ТА ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ.....	48
--	----

Петро Ясній, Сергій Гладьо, Віктор Скочиляс, Олександр Семенець

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДОРНУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОТВОРІВ НА ВТОМНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ СИЛОВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРИЛА ЛІТАКА.....	63
---	----

Михайло Михайлишин

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В РОЛИКАХ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОЇ РОЗЛИВКИ СТАЛІ	71
--	----

Олег Ясній, Віталій Бревус, Володимир Ясній

ОЦІНКА ГРАНИЧНОГО СТАНУ КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВНИКА ТЕС.....	85
--	----

Володимир Дзюра, Роман Романовський

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ПНЕВМОМЕХАНІЧНИХ ТРАНСПОРТЕРІВ.....	93
---	----

Анатолій Матвійчук

СИЛОВІ РОЗРАХУНКИ ВЕРСТАТА ДЛЯ ПОРІЗКИ АВТОТРАКТОРНИХ ШИН.....	102
---	-----

Матеріалознавство

Петро Стухляк, Віталій Карташов

ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТНИХ СИЛОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ЕПОКСИДНІЙ ОСНОВІ.....	106
---	-----

Валерій Лазарюк

ОСОБЛИВОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ ТВЕРДОГО СПЛАВУ (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al.....	118
---	-----

Юрій Нікіфоров, Михайло Нищенко, Богдан Ковалюк

ВПЛИВ УМОВ ОПРОМІНЕННЯ ЛАЗЕРОМ В РЕЖИМІ МОДУЛЬОВАНОЇ ДОБРОТНОСТІ НА МОРФОЛОГІЮ ПОВЕРХНІ: АНАЛІЗ ТА ДЕЯКІ ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	133
--	-----

Фізико-математичне моделювання в техніці та технології

Михайло Петрик, Жак Фрессар, Дмитро Михалик

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЕТИТИВНОЇ ДИФУЗІЇ ГАЗІВ У ТВЕРДИХ ПОРИСТИХ ТІЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗУЛЬТАТІВ NMR-АНАЛІЗУ.....	146
---	-----

Ігор Баран

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ У ДВОШАРОВОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ТІЛІ З ТОНКИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ.....	157
---	-----

Олександр Крамар, Юрій Скоренький, Юрій Довгон'ятий

ПЕРЕХІД МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК У МОДЕЛІ ДВОКРАТНО ОРБІТАЛЬНО
ВИРОДЖЕНОЇ ЗОНИ ПРИ ВРАХУВАННІ ОСОБЛИВОСТЕЙ

НЕЗБУРЕНОЇ ГУСТИНИ ЕЛЕКТРОННИХ СТАНІВ..... 167

Роман Ткачук, Божена Робулова, Василь Кузь

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ
УЛЬТРАФІОЛЕТОМ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ

ЛІКУВАННІ ПСОРИАЗУ..... 176

Богдан Оробчук, Віктор Лісняк

АВТОМАТИЗОВАНА ЕНЕРГООЩАДНА СИСТЕМА ДЛЯ
ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ.....

185

Михайло Паламар, Ігор Осов'як

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ АБОНЕНТІВ
У СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ

ПЕРЕНАЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ 191

Юрій Скоренький

ВІДКРИТІ ДИСТАНЦІЙНІ КУРСИ ПРИРОДНИЧО-

МАТЕМАТИЧНОГО І ТЕХНІЧНОГО СПРЯМУВАННЯ..... 202

Анонси

МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ», ПРИСВЯЧЕНА 55-РІЧЧЮ ЗАСНУВАННЯ ТНТУ

ТА 170- РІЧЧЮ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ ВИДАТНОГО

УКРАЇНСЬКОГО ВЧЕНОГО ІВАНА ПУЛЮЯ..... 213

IV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«ПОШКОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ, МЕТОДИ
ЙОГО ДІАГНОСТУВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ» (IC-DMDP)

214

CONTENTS

Preface.....	11
<i>History of Science</i>	
<i>Oleksandr Rokitskyy</i>	
IVAN PULUJ (1845-1918).....	12
<i>Olga Zbozhna</i>	
IVAN PULUJ AND UNDERGROUND SOCIETIES OF UKRAINIAN YOUTH: «HROMADA» AND «SICH» (to 170th anniversary of Ivan Puluj)....	23
<i>Mykola Pidgurskyi, Michael Wnuk</i>	
S.P.TYMOSHENKO’S CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF GLOBAL ENGINEERING SCIENCE AND EDUCATION.....	37
<i>Mechanical engineering</i>	
<i>Petro Yasniy, Yuriy Pyndus, Oleh Galushchak</i>	
SIMULATION OF FATIGUE CRACK GROWTH IN D16T ALLOY USING FINITE ELEMENT METHOD.....	48
<i>Petro Yasniy, Sergii Glado, Viktor Skochylyas, Oleksandr Semenets</i>	
INFLUENCE OF FUNCTIONAL HOLES BURNISHING PARAMETERS ON THE FATIGUE LIFE OF A CONSTRUCTIVE ELEMENT OF AIRCRAFT WING.....	63
<i>Mykhaylo Mykhaylyshyn</i>	
INVESTIGATION OF TEMPERATURE FIELDS IN ROLLERS OF CONTINUOUS STEEL TEEMING MACHINE.....	71
<i>Oleh Yasniy, Vitaliy Brevus, Volodymyr Yasniy</i>	
ASSESSMENT OF THERMAL POWER PLANT SUPERHEATER COLLECTOR LIMITING STATE.....	85
<i>Volodymyr Dzyura, Roman Romanovskyy</i>	
PNEUMATIC SCREW MATERIAL CONVEYOR TESTING.....	93
<i>Anatoliy Matviychuk</i>	
FORCE CALCULATION OF A LATHE FOR AUTOMOBILE AND TRACTOR TIRES CUTTING.....	102

Material Science

Petro Stuhlyak, Vitaliy Kartashov

APPLICATION OF MAGNETIC FORCE FIELDS FOR REGULATION
OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF EPOXY –BASED POLYMER COMPOSITE..... 106

Valeriy Lazaryuk

PECULIARITIES OF HIGH TEMPERATURE OXIDATION
OF (TI, NB)C-NI-CR-AL CERMET..... 118

Yuriy Nikiforov, Mykhaylo Nishchenko, Bohdan Kovalyuk

INFLUENCE OF LASER IRRADIATION IN THE MODULATED
QUALITY FACTOR REGIME ON THE SURFACE MORFOLOGY:
ANALYSIS AND SOME PRACTICAL RECOMMENDATIONS..... 133

Physical and mathematical modeling in engineering and technology

Mykhaylo Petryk, Jacques Fraissard, Dmytro Mykhalyk

IDENTIFICATION OF COMPETITIVE DIFFUSION KINETIC
PARAMETERS OF GAZES IN POROUS SOLIDS WITH USE OF
NMR IMAGING RESULTS..... 146

Ihor Baran

MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE FIELD
IN TWO-LAYER CYLINDRICAL BODY WITH A THIN INCLUSION..... 157

Oleksandr Kramar, Yuriy Skorenkyy, Yuriy Dovhopyaty

METAL-INSULATOR TRANSITION IN THE DOUBLY ORBITALLY
DEGENERATED BAND WITH THE DENSITY OF STATES
PECULIARITIES..... 167

Roman Tkachuk, Bozhena Robulova, Vasyl Kuz

MODELING OF DYNAMIC IRRADIATION WITH ULTRAVIOLET
LIGHT TREATMENT FOR PSORIASIS..... 176

Bohdan Orobchuk, Viktor Lisnyak

AUTOMATED ENERGY SAVING SYSTEM FOR INDIVIDUAL RESIDENTIAL BUILDINGS.....	185
---	-----

Mykhaylo Palamar, Ihor Osov'yak

IMPROVEMENT OF THE ABONENTS SYNCHRONIZATION RELIABILITY IN COMMUNICATION SYSTEM WITH PSEUDO-RANDOM CHANGE OF THE OPERATING FREQUENCY.....	191
---	-----

Yuriy Skorenkyy

OPEN ONLINE COURSES IN SCIENCE AND ENGINEERING.....	202
---	-----

Announcements

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS OF MODERN TECHNOLOGIES” DEDICATED TO THE 55 th ANNIVERSARY OF TNTU AND THE 170 th ANNIVERSARY OF PROMINENT UKRAINIAN SCIENTIST IVAN PULUJ.....	213
---	-----

IV INTERNATIONAL CONFERENCE “IN-SERVICE DAMAGE OF MATERIALS, ITS DIAGNOSTICS AND PREDICTION”.....	214
--	-----

Передмова

Друге видання збірника наукових праць інженерно-технічної комісії Тернопільського осередку НТШ під загальною назвою „Сучасні проблеми техніки і технологій” виходить незадовго до святкування 170 – річного ювілею Івана Пулюя і є важливою віхою у житті наукової громади Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та Тернопілля.

Основу збірника склали публікації останніх результатів досліджень науковців університету, які були представлені цього року під час Березневої сесії НТШ на засіданні Інженерно-технічної комісії Тернопільського осередку НТШ. Комісія створена у 2011 році на базі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя і координує наукові дослідження в галузі інженерії та історії інженерної науки. Обговорення нових ідей фахівцями є важливим стимулом для подальшого розвитку досліджень і організації співпраці в перспективних галузях, які мають важливе практичне значення.

У працях, що увійшли до збірника, розглянуто проблеми в галузі механіки й математичного моделювання, фізики, електротехніки й світлотехніки, конструювання обладнання, технології машинобудування й транспортування. Загалом, збірник складається з чотирьох розділів: історія науки; машинобудування та механіка; матеріалознавство; фізико-математичне моделювання в техніці та технології.

Висловлюю особливу подяку секретареві інженерно-технічної комісії Юрію Скоренькому, який долучився до формування цього тому збірника НТШ, і Володимирі Дзюрі, який його упорядковував. Також дякую Віктору Паляниці за допомогу у виданні цього збірника.

Петро Ясній,

голова Інженерно-технічної комісії Тернопільського осередку НТШ

Олександр Рокіцький**ІВАН ПУЛЮЙ (1845–1918)**

Висвітлено науково-педагогічну, адміністративну та громадсько-політичну діяльність видатного українського вченого, фізика та електротехніка Івана Павловича Пулюя.

Ключові слова: Іван Пулюй, історія української науки.

Велич постаті І. Пулюя полягає в багатогранності його таланту, високому рівневі досягнень у різних напрямках діяльності, глибокому патріотизмі й твердих моральних принципах, які він сповідував завжди і всюди – у науці, політиці, в особистому житті. Був людиною кристалічно чесною, зі світлим розумом і чистими помислами. «Чоловіком-самоцвітом» назвав його Пантелеймон Куліш.

Найбільшою його пристрастю була жадоба пізнання. Широта наукової ерудиції, глибоке проникнення у фізичну сутність досліджуваних явищ і процесів, рідкісне поєднання таланту експериментатора з високим інтелектом теоретика дає змогу вважати Івана Пулюя належним до плеяди тих учених, які в ХІХ столітті заклали фундамент новітньої фізики.

Його праці з фізики послужили утвердженню атомістичної теорії будови речовини, наблизили відкриття так званих Х-променів та електрона, сприяли становленню Х-променелогії як науки, а наукові гіпотези щодо механізму виникнення й природи катодних та Х-променів випередили загальний рівень тогочасних наукових уявлень. Сконструйовані ним апарати були відзначені найвищими нагородами на всесвітніх і міжнародних виставках, винаходи з електротехніки й телефонії запатентовано в багатьох країнах Європи, а теоретичні праці з електродинаміки змінних струмів лягли у фундамент окремих розділів теоретичних основ електротехніки.

Видатний український учений-фізик, електротехнік та громадський діяч Іван Павлович Пулюй народився 2 лютого 1845 р. у містечку Гримайлові, нині Гусятинського району Тернопільської області.

У 1857–1865 рр. навчався в Тернопільській класичній гімназії, де заснував таємну студентську «Громаду», члени якої посвятили себе «до ревної і невсипучої праці для народу». Під час навчання на теологічному факультеті Віденського університету в 1865–1869 рр. зорганізував Товариство українських богословів, був одним із засновників славнозвісного товариства «Січ», що відіграло важливу роль у європеїзації галицької Руси.

Продовжуючи розпочату в гімназії роботу з підготовки україномовних підручників для середніх шкіл, І. Пулюй приступив до реалізації великого задуму – україномовного видання духовної літератури. Для цього заснував товариство «Праця», а в 1869 р. уклав і видав «Молитвослов».

Подолавши шалений опір москвофільської частини духовенства, що всіляко противилася введенню народної мови в церковну літературу, І. Пулюй перевидав у 1872 р. перероблений та розширений варіант «Молитвослова».

Своєю активною громадською позицією 24-літній студент-богослов привернув увагу відомого письменника П. Куліша, що вже довгий час працював над перекладом Святого Письма й потребував помічника з добрим знанням стародавніх мов. Їхня співпраця над перекладом Нового Завіту розпочалася в лютому 1871 р., і ще в цьому ж році вийшли друком у Відні Євангелія від Матея, Марка, Луки та Івана. І лише в 1903 р. за активної участі І. Пулюя було завершено Кулішів переклад Старого Завіту й видруковано перший повний україномовний переклад Біблії.

Завершивши в 1872 р. навчання на філософському факультеті, як кращий випускник І. Пулюй був залишений для дослідницької роботи у фізичній лабораторії університету. Його перші наукові праці, присвячені експериментальному дослідженню температурної залежності внутрішнього тертя повітря, містили оригінальні результати, що

послужили утвердженню молекулярно-кінетичної теорії для реальних газів і були опубліковані в 1874 р. у журналі «Доповіді Віденської Академії наук».

У цьому ж році молодого науковця було запрошено на посаду асистента-викладача кафедри фізики, механіки і математики Військово-морської академії в м. Фіюме (пізніше – Рієка в Хорватії), де він успішно розпочав активну педагогічну діяльність.

Як перспективний викладач і науковець, І. Пулюй отримав у 1875 р. від Міністерства освіти стипендію для продовження науково-дослідної роботи в Страсбурзькому університеті, де на той час діяла сильна експериментальна школа проф. А. Кундта. Тут він зацікавився новим відгалуженням у фізиці – електротехнікою. І хоча наукові інтереси дисертанта обмежувалися чистою фізикою, саме електротехніка мала в майбутньому вирішальний вплив на його подальшу наукову кар'єру.

У 1876 р. І. Пулюй, захистивши дисертацію, здобув ступінь доктора «philosophiae naturalis» і повернувся до Віденського університету, де викладав молекулярно-кінетичну теорію газів і теорію теплоти. Продовжуючи науково-дослідну роботу в лабораторії проф. В. Лянга, зацікавився дослідженнями електричних розрядів у розріджених газах. На його думку, саме тут потрібно було шукати розгадку природи електричного струму. Дуже швидко І. Пулюй досягнув значних успіхів у з'ясуванні механізму виникнення, природи та властивостей катодних променів. Висловлені ним припущення та ідеї випереджали наукову думку на десятиліття, а поставлені досліди й сконструйовані для цього апарати прислужилися до відкриття й дослідження Х-променів.

Оволодівши мистецтвом видування скла, І. Пулюй виготовляв оригінальні вакуумні апарати, які експонувалися й були відзначені преміями та дипломами на різних міжнародних виставках. Деякі з них придбав для своєї колекції Паризький національний музей мистецтв і ремесел. Особливе захоплення у відвідувачів викликала перша люмінесцентна лампа. Як з'ясувалося через 14 років, вона була потужним

джерелом випромінювання X-променів і стала прототипом рентгенівської трубки.

Однак науковий феномен І. Пулюя полягав не лише у високій експериментальній майстерності дослідника, а й у поєднанні цієї властивості із здатністю глибоко осмислювати отримані результати, проникати у фізичну сутність досліджуваних явищ і процесів. Саме це дозволило йому в короткому часі оволодіти суттю нової проблеми, поставити низку необхідних експериментів і на підставі отриманих результатів дати фізичне тлумачення явищам у своїх працях під загальною назвою «Випромінна електродна матерія і так званий четвертий агрегатний стан».

На її актуальність вказує неодноразове перевидання як усередині країни, так і поза її межами. Так у 1889 р. Лондонське фізичне товариство опублікувало англomовний переклад згаданої монографії в престижному науковому журналі «Physical Memoirs».

Попри успішну наукову діяльність І. Пулюй переживав постійні фінансові труднощі. Викладацька праця в університеті не оплачувалася, а мізерної асистентської платні за роботу в лабораторії заледве вистарчало для прожитку. Перспектива посісти професорську посаду в найближчий час була малоімовірною, тому І. Пулюй прийняв вигідну пропозицію, що поступила від електротехнічної фірми після успішної презентації його приладів на Паризькій електротехнічній виставці. У 1882 р. він став технічним директором електротехнічного бюро у Відні, розробляв освітлювальні лампи розжарювання, що за багатьма параметрами переважали лампи Едісона й Свана.

Високо цінуючи його працю, керівництво фірми невдовзі уклало з ним новий контракт на значно вигідніших умовах. За таких обставин Пулюй залишив роботу у фізичній лабораторії та повністю поринув у практичну діяльність. Цей крок був доленосним у його житті, бо став початком утвердження й сходження на новій ниві діяльності, однак перервав ходу дослідника на шляху до епохального відкриття невидимих X-променів, яке згодом здійснив К. Рентген.

Наступна електротехнічна виставка відбулася у Відні в 1883 р. На ній своїми винаходами Пулюй привернув увагу не тільки промисловців, але й представників уряду й таких високопоставлених осіб, як принц Вільгельм Шаумерс-Ліппе, батько королеви Віртемберської, архикнязь Кароль Людвик, архикнягиня Марія Тереза та ін. При кінці виставки отримав він від Верндля, генерального директора акціонерного товариства, власника відомої в Європі електротехнічної фірми, пропозицію на дуже вигідних умовах взяти участь у підготовці виставки, що мала відбутися влітку 1884 р. у м. Штайрі. Приймавши пропозицію за умови, що при бажанні будь-коли зможе повернутися до наукової праці, І. Пулюй залишив виклади в університеті й переїхав до м. Штайр, де zorganizував виробництво освітлювальних ламп власної конструкції. Фабрика, якою керував Пулюй, повинна була забезпечити електричне освітлення виставки.

Близько тисячі ламп Пулюя й дугові лампи «чеського Едісона» Ф. Кжіжіка освітлювали територію виставки та прилеглі вулиці міста. Це було сенсацією, про яку багато писала преса. Виставку відвідав цар Австро-Угорщини Франц-Йосиф і під великим враженням від небаченої досі ілюмінації довго розмовляв з І. Пулюєм.

Незадовго Міністерство освіти запропонувало І. Пулюєві місце професора кафедри експериментальної і технічної фізики Німецької високої технічної школи в Празі, а міністр освіти разом із прем'єр-міністром, оглядаючи виставку, відвідали й фабрику ламп Пулюя, щоб особисто привітати його з новим призначенням.

Так завершувався складний Віденський період становлення, що, попри постійні фінансові труднощі, виснажливу працю, розчарування, був сповнений і світлими переживаннями, такими як безкорислива громадська праця, щира підтримка друзів, співпраця та дружба з П. Кулішем, відвідини України в 1876 та 1880 рр., успішна наукова діяльність і, нарешті, визнання та належна оцінка його здобутків. Попереду був тріумфальний празький період.

Зрештою, настав час змінити й особисте життя. Запевнивши своє майбутнє, Пулюй перед переїздом до Праги одружився на своїй колишній учениці Катерині Стозітській, що свого часу виявила до нього неабияку прихильність, пожертвувавши прекрасним довгим волоссям для виготовлення ниток розжарення освітлювальних ламп.

Празький період життя проф. І. Пулюя, особливо його перша половина, був дуже активним й успішним. Тут вповні реалізувався його науковий потенціал, по-новому розкрилися педагогічні та організаторські здібності, талант пристрасного публіциста й далекоглядного політика.

Очолити кафедру експериментальної і технічної фізики, І. Пулюй розгорнув активну діяльність щодо реорганізації навчальних планів, розширення матеріально-технічної бази. Уже в наступному році ввів у програму окремий курс електротехніки, який постійно модернізував і впродовж 18 років особисто забезпечував навчання з обох дисциплін. Його лекції відвідували студенти та професори з інших навчальних закладів. У 1888 р. проф. І. Пулюя обрали ректором Німецької політехніки, а в 1890 р. – деканом машинобудівного факультету. За його активної участі було підготовлено плани та проекти будівництва модерного електротехнічного інституту, а в 1902 р. створено окрему кафедру електротехніки, яку він очолював до виходу на пенсію в 1916 р.

І. Пулюй був організатором і довголітнім головою Електротехнічного товариства в Празі, як і членом-засновником аналогічного товариства у Відні, самовіддано працював у редколегіях наукових журналів, про що дізнаємося як із наукової періодики тих часів, так і з матеріалів Архіву Чеського технічного університету в Празі.

Проф. І. Пулюй щедро ділився своїми знаннями не лише зі студентами та колегами по роботі, а й з широким колом зацікавленої громадськості. Робив це за посередництвом публікацій науково-популярних статей та частих виступів із лекціями на зборах різних науково-технічних товариств. Як зазначала тогочасна преса, його виступи незмінно викликали велике зацікавлення й нерідко реферувались у технічних і науково-популярних часописах.

Поряд із великою організаційною та навчально-методичною діяльністю проф. І. Пулюй проводив активну наукову роботу. На початку 90-х років вийшли друком його найважливіші теоретичні праці з електродинаміки змінних струмів. Саме на 90-і припадає пік активності його винахідницької діяльності в галузі практичної електротехніки й телефонії.

На окрему увагу заслуговує діяльність І. Пулюя в галузі електроенергетики. Починаючи з 90-х років, він стає найбільш авторитетним експертом із питань проектування й будівництва електростанцій та електричних мереж на території Чехії. Серед інших, варто згадати електрифікацію Праги та спорудження гідроелектростанції поблизу міста Гогенфурт. У реалізації цих проектів проявився глибокий, широкомасштабний і сучасний підхід І. Пулюя до вирішення проблем електроенергетики.

Серед подій, що порушили розмірений ритм життя празького періоду, були відкриття К. Рентгеном X-променів, вибух Першої світової війни та розпад імперій, що зробив можливим проголошення Української Народної Республіки.

Звістка про відкриття невидимих всепроникаючих променів, здійснене проф. Вюрцбурзького університету К. Рентгеном, досягнула Праги 7 січня 1896 р. і, за свідченням очевидців, дуже схвилювала І. Пулюя, який розумів, що він ще 14 років тому, досліджуючи електричні розряди в розріджених газах, був за крок до успіху.

Відновивши дослідження з електровакуумними приладами власної конструкції, І. Пулюй дуже швидко підтвердив результати, отримані К. Рентгеном, і водночас з'ясував нові, важливі властивості X-променів, які лише згодом були описані К. Рентгеном.

Чи не найбільшої уваги заслуговує висловлене ним вдале трактування природи та мікроскопічного механізму виникнення X-променів на відміну від помилкових гіпотез, висунутих К. Рентгеном та іншими дослідниками.

Уперше продемонструвавши 6 лютого на засіданні математично-природничого відділу Віденської академії наук високоякісні світлини цілого хребта мертвої двомісячної дитини, туберкульозної руки одинадцятирічної дівчинки та інших частин людського тіла, виконаних за допомогою X-променів, І. Пулюй звернув увагу на перспективу їх практичного застосування в медицині. Ці світлини довгий час репродукували на своїх сторінках провідні європейські газети й журнали завдяки їх високій якості. Запорукою цьому було використання лампи особливої конструкції, виготовленої ним 14-ма роками скоріше. Саме нею послуговувалися перші дослідники X-променів на американському континенті. Ця та інша цікава і важлива інформація, що висвітлює внесок І. Пулюя у становлення рентгенології, не знайшла, на жаль, свого цілісного й об'єктивного відображення у відповідних довідниках, словниках та енциклопедіях.

Публікації ненаукового характеру щодо відкриття та дослідження X-променів грішать традиційною односторонністю: або приписують усі заслуги одному К. Рентгену, або звинувачують його в плагіаті. Варто зауважити, що навіть науковим дослідженням з історії розвитку фізики бракує об'єктивності й повноти у висвітленні цього питання.

Працюючи на ниві світової науки, І. Пулюй ні на хвилину не забував про освітні потреби рідного народу. Після затвердження в 1892 р. статуту Наукового товариства ім. Шевченка (НТШ) у Львові, він опублікував деякі свої наукові та науково-популярні статті спочатку в «Записках НТШ», а згодом у «Збірнику Математично-природописно-лікарської секції НТШ», розробляв українську науково-технічну термінологію. Серед перших дійсних членів НТШ було й ім'я І. Пулюя.

Боротьбу за відродження й утвердження рідної мови, яку розпочав ще юним гімназистом, І. Пулюй не припинив і будучи поважним, сивобородим професором, але тепер вона набуває більш яскраво вираженого політичного характеру. Не впадаючи в зневіру й відчай, він уперто, з року в рік звертався до різних державних установ, домагаючись відкриття українського університету у Львові, розширення мережі

народних шкіл і гімназій, публікував у цій справі низку статей у газеті «Діло».

У 1904–1906 рр. І. Пулюй написав кілька статей із гострою критикою злочинної політики Росії, зокрема щодо заборони української мови. У цих публікаціях він обстоював національні інтереси українського народу в межах обох імперій, добивався утвердження його повноправного культурного, соціального й політичного статусу.

У 1906 р. із нагоди 100-ліття Німецької політехніки за визначну науково-педагогічну діяльність проф. І. Пулюй був відзначений орденом Залізної корони, а в 1910 р. удостоєний високого титулу «Радник двору». Незважаючи на гострі, критичні виступи вченого щодо внутрішньої політики Австро-Угорщини, уряд високо оцінив його діяльність на ниві науки та освіти.

З вибухом Першої світової війни І. Пулюй разом з іншими українськими громадськими діячами заснував у Празі Комітет допомоги українським біженцям із Галичини, окупованої російськими військами, а також пораненим воякам і військовополоненим українцям, що воювали в складі протиборчих армій.

Усвідомлюючи важливість моменту для вирішення українського питання, І. Пулюй розгорнув активну політичну діяльність для його роз'яснення й просування у вищих ешелонах влади. Цій меті підпорядковані його виступи перед громадськістю, публіцистичні статті й політичні праці. Широкий резонанс викликали дві німецькомовні брошури під назвою «Польські русофіли і масові арешти вірних державі українців у Галичині» та «Україна і її міжнародне політичне значення». Першу присвячено внутрішній, другу – зовнішній політиці центрального уряду.

У першій автор висвітлив нерівноправне становище українців і поляків у Східній Галичині, критикував позицію центрального уряду, що сприяла такому становищу. У другій, окресливши суть і мету споконвічних прагнень українського народу, їх історичну закономірність і справедливість, висловив свіже бачення регіонального та глобального

геополітичного положення України, його впливу на стабілізацію політичного становища в Східній та Центрально-Східній Європі. А твердження «Самостійність України, в нашому глибокому переконанні, є ключем для досягнення миру в усій Європі» стало з тих пір сутністю української геополітичної концепції.

У 1916 р. проф. І. Пулюй отримав пропозицію зайняти посаду міністра освіти, однак через поганий стан здоров'я змушений був відмовитися від неї й у цьому ж році вийти на пенсію. Уже наступного року першим міністром-українцем в австрійському уряді став його товариш проф. І. Горбачевський, котрий очолив міністерство народного здоров'я.

Виснажлива війна призвела до розпаду обох імперій. Попереду українців чекали нові великі випробування. Останні дні І. Пулюя були осяяні зорею свободи, що, нарешті, засвітила його рідному народові. Виснажене невтомною працею серце вченого зупинилося 31 січня 1918 р., через кілька днів після проголошення незалежності Української Народної Республіки, незалежності, про яку він мріяв і задля якої жертвував своїм особистим життям.

Про це влучно висловився у своєму надгробному слові ректор Німецької політехніки в Празі проф. Бах, який, звертаючись до покійного, сказав: «Ти був не тільки людиною твердих переконань і виразно викарбованою особистістю, але також людиною, що знала як дотримуватися вірності, передусім вірності народові, з якого Ти вийшов... Доля дозволила Тобі побачити ранішню Зорю свободи, до якої піднявся з темних воєнних хмар Твій народ, якого Ти любив до останнього свого подиху, і її перші сонячні промені побажали озолотити кінець Твого сповненого праці життя».

Oleksandr Rokitskyy
IVAN PULUJ (1845-1918)

The paper describes scientific, pedagogical, administrative, public and political activities of the prominent Ukrainian scientist, physicist and electrical engineer Ivan Pavlovych Puluj.

Keywords: *Ivan Puluj, history of Ukrainian science.*

Ольга Збожна

ІВАН ПУЛЮЙ І ТОВАРИСТВА УКРАЇНСЬКОЇ МОЛОДІ: ТАЄМНА «ГРОМАДА» ТА ЛЕГАЛЬНА «СІЧ» (До 170-річчя від дня народження Івана Пулюя)

Висвітлено історію учнівського товариства „Громада” та студентського товариства „Січ”, одним із засновників яких був Іван Пулюй, діяльність цих товариств та їх вплив на становлення української національної ідеї.

Ключові слова: *учнівське товариство „Громада”, студентське товариство „Січ”, Іван Пулюй.*

У Історії землі рідної, України, кожен день є чимось пам'ятним для сьогоденних і наступних поколінь: чи то *боями* за її Волю і Незалежність, чи *мирною працею* для її Майбуття. Був час, коли українці мовчки корилися поневолювачам. Здавалося скорилися назавжди, бо ж дехто з них змінив – навіть Віру і Мову. Змінив... Та чи надовго? З часом, як не вони, то їх діти чи онуки й правнуки або й праправнуки, повернулися до Віри і Мови своїх батьків, дідів, пра- й прапрадідів. І знову починали пошук нових шляхів для здобуття Волі й Незалежності Рідній Землі – Україні.

У кінці 60-их на початку 70-их років XIX ст. українська учнівська та студентська молодь заснувала таємні товариства «Громади», які стали школою виховання української національної еліти. При вступі до «Громади» кожен новоприйнятий член складав присягу: *«що нічого і нікого не зрадить і що весь вік буде трудитися для добра свого народу»*. Засновниками «Громад» на підросійських українських землях був студент Київського університету Володимир Антонович, а на півдавстрійських –

вихованець Львівської духовної семінарії Данило Танячкевич. У Тернополі «Громаду» заснував учень 6 класу Тернопільської гімназії Іван Пулюй. Було це у січні 1863 року. Тож у 2013 р. минуло 150 років від часу її заснування ([1], С. 232).

Метою товариства було: *«жити в чистоті моральній; пильно вчитися в школі; познакомитися з історією свого народу і його літературою; ставати в обороні рідного слова проти ворожих заходів москвофілів (святоюрців) і поляків; говорити всюди рідною мовою; спомагати бідних учеників; піддержувати «Мету», що тоді виходила під редакцією Ксенофонта Климковича у Львові до 1865-го року»*. І на завершення Іван Пулюй написав: *«ціль товариства була висока, моральна, гарна і патріотична»*. Таку високу мету поставили перед собою гімназисти. Дуже високу. Не кожному було підсилу її виконання. Хто неспроможний був виконати цю програму, той виходив з товариства відразу. Однак ніколи і нікому не видавав його тайни, тобто не зраджував! Це програма підготовки тогочасної української національної еліти. Саме так! *Української національної еліти*. Як бачимо, першим пунктом було: *«жити в чистоті моральній»*. Тільки при дотриманні цього пункту можна виконати усі решта! І громадивці дотримувалися. У «Громаді» молодь вчилася: вивчала історію Землі рідної; вивчала українську літературу; поезію тощо. Нелегкі то були часи... Крім цього, товариство було таємним...

На час, про який йдеться, українські землі були поділені між Росією і Австрією. Галичина й Буковина входили до складу Австрійської імперії, яку 1867 року перейменували на Австро-Угорську, столиця якої – Відень, була осередком політичного та культурного життя імперії. Тож українська молодь, закінчивши гімназії на рідній землі, старалася продовжити навчання у Віденських високих школах. Після приїзду у Відень вони якийсь час гуртувались у звиклому для себе вдома та організованому у Відні товаристві «Громада». Довідуємося з листа Івана Пулюя, написаного до Данила Танячкевича у Львові восени 1865 р.: *«Пішов у Відень с Тернополя також Борисікевич громадянин (вихованець «Громади» – О.3.)*

Єсть там ще більше христчанських сердець (ті, що вчать у Духовній семінарії – О.З.). Целєвич, Павлусевич, Бачинський. Дасть Бог що й громада гарна буде (підкреслила – О.З.)» [2].

У березні 1866 року наближалися п'яті роковини від дня смерті Тараса Шевченка. Тож віденські громадівці широко відзначили їх. На Вечір пам'яті Тараса Шевченка запросили представників слов'янських народів, що навчалися у Відні: *«Було до 300 людей»*. Вечір відбувся у віденському готелі *«Під зеленою брамою»*. *«Дня 10-го марця обійшлисьмо роковини Шевченка. Та славно вже відбулися! Усі Славяне здивувалися! Ми хоть числом від них менчі то таки що до діла им наперед нас не виривають ця. Усі допитувалися кільки нас є у Відні та все дуже чудувалися, коли вчули відповідь до двадцятёх»*. – Читаємо у листі Івана Пулюя.

Як знаємо з Історії України, на землях підросійської України царський уряд видавав циркуляри про заборону української мови, а на землях півдавстрійської, де ці «бамаги» не мали сили, бо ж інша держава, ширив москвофільство. Прикро писати та дехто з наших людей лакомився на подачки і ставав москвофілом. На жаль... є й нині такі, що лакомляться на подачки. Особливо під час виборів чи то до Верховної Ради, чи до місцевих. Невже їх нічого не навчило життя?... Якби наша сучасна молодь була такою, як вихованці «Громад» – цього ніколи б не було!... Усі б голосували за покликком Душі і Серця! За Україну – Вільну, Незалежну, Самостійну, як було під час Всеукраїнського референдуму – першого грудня 1991 року.

Тож перед початком Вечора пам'яті Тараса Шевченка віденські москвофіли подали донос у поліцію про вечір громадівців, в якому представили їх як революціонерів. На щастя у поліції не повірили їх доносу. *«Не минуло квандранс (чверть години – О.З.) вже був поліційний комісар в салі – и казав що мусить признати що вояцький порядок у нас!»*. Отже затія москвофілів не вдалася. Прийши вони непрошеними на Вечір Пам'яті Тараса Шевченка. Прийшли з метою зірвати його, або хоч би висміяти на сторінках свого часопису «Страхопуд». Та це їм не вдалося.

Молоді українці, розуміючи стан речей, твердо вирішили створити «явне» (легальне) товариство на протигагу «Громаді», яка була – таємним. Про це довідуємося з листа Івана Пулюя, написаного до Данила Танячкевича 19 березня 1866 р.: *«Наша гр[омада] становитьця як становилась тільки из сімох. Щось заохочують на світі завязати явне товариство (підкреслила – О.З.). Старатимуся кілька сил щоб их до того намовити».* Хоч на початку свого заснування віденська «Громада» була малочисельною, та які завзяті й працьовиті були її члени: *«Треба нам самим взятися до роботи, а що найважливішого для нас (и нашим силам найвідповіднішого) єсть перевід книжок для шкіл, гімназій».* – Написав Іван Пулюй 20 квітня 1866 року. На той час у Австрійській імперії ще не було українських шкіл і гімназій та книжки для них вже готували вихованці «Громади». Яка сильна віра у майбуття! Хто саме був членом віденської «Громади»?... Поіменно назвати не можемо, оскільки Іван Пулюй не написав їх прізвищ. *«Товариство стало незабаром кошом і для світської академічної молодіжи, що збиралась що неділі в семинарському саду. ... Коли побільшало число членів і прихильників української самостійности (підкреслила – О.З.), то рішено завязати явне академічне товариство «Січ».* Як бачимо Іван Пулюй знову пише про «явне» товариство.

Отже «Січ», створили вихованці «Громад», що приїхали у Відень на навчання. Офіційною датою заснування «Академічного Товариства «Січ», така його повна назва, є 9 січня 1868 року. *«Прапором «Січі» була синьо-жовта хоругва».*

Усі члени «Січі» поділялися на «звичайних» і «надзвичайних» (почесних). Звичайними членами були *«австрійські піддані руської народности»*, що перебували у Відні. Почесними членами ставали лише ті, що мали *«особливі заслуги перед товариством і наукою».* Тож кожен звичайний член старався працювати так, аби згодом стати почесним членом цього славного, відомого на всю Європу, товариства. На чолі товариства була Президія, тоді казали «Виділ». Президія складалася з п'яти осіб. Вона збиралася щомісяця. Вищим законодавчим органом товариства були загальні збори. Мало товариство і Контрольну комісію,

яка займалася організацією і обліком майна товариства. Статут товариства час від часу змінювали (поновлювали). Тож пізніше, з метою осучаснення товариства, за новим статутом звичайним членом могли бути лише студенти високих навчальних закладів української національності.

Нам цікаво знати: скільки членів було у товаристві на початку його заснування? Одні дослідники пишуть, що було 27. Інші кажуть, що їх було більше. Першим кошовим «Січі» був Анатоль Вахнянин. На той час Анатоль Вахнянин був студентом Віденського університету. Він народився 7 вересня 1841 року у селі Сенява, що недалеко від таких українських міст як Ярослав і Перемишль (після Другої світової війни ці та інші українські міста й села відійшли до Польщі). Його батько вчився у Львівській духовній семінарії в той час, що й Маркіян Шашкевич. Згодом у Львівській духовній семінарії вчився й Анатоль. Він мав велике покликання до музики. Мав Вахнянин і великі організаторські здібності, які проявилися у нього під час праці у «Громаді», потім у «Січі» та львівських українських товариствах, які засновував і очолював.

Українська молодь, після заснування легального товариства «Січ», ще з більшим завзяттям взялася до праці «для добра свого народу». З перших днів існування товариства діяльність його членів полягала у порозумінні – найперше між собою, потім в ознайомленні представників інших народів, які проживали у Відні, з проблемами русинів-українців на рідній землі та прагненням їх до рівноправності серед народів, землі яких, як і українські, творили Австро-Угорську імперію. Січовики проводили вечори вшанування Славетних синів українського народу, робили доповіді на актуальні суспільно-політичні теми. І все це закінчувалося чудовими концертами. На той час у Віденських високих школах вчилися представники різних народів і у Відні вони вже мали свої національні товариства: чехи мали «Славію», хорвати «Велебіту», серби «Зорю», поляки «Огніско», болгари «Балкану». Тепер і русини-українці мають своє «Академічне товариство «Січ». Як бачимо, вже з перших днів заснування товариства січовики були «дипломатами» українського народу в Європі, який на той час не мав своєї Держави.

Анатоль ВАХНЯНИН (07.09.1841-
11.02.1908), співзасновник і перший
кошовий віденського
«Академічного товариства «Січ»



Після закінчення навчання у Віденському університеті (березень 1868 р.) Анатоль Вахнянин виїхав до Львова, де вчорашній кошовий віденського «Академічного Товариства «Січ», поринув з головою, як кажуть у нас, у працю «для добра свого народу». Під його керівництвом у Львові 8 грудня 1868 р. українці заснували товариство «Просвіта», а потім й інші українські товариства. Після відходу Анатолія Вахнянина, «Січ» очолив Юліян Целевич, який згодом став видатним суспільним діячем, істориком, етнографом і педагогом. Серед його наукових праць є і монографія про Скит Манявський, що на Івано-Франківщині, куди часто їздять тернополяни та й не лише вони.

Після заснування свого, з часом Славетного, товариства – січовики продовжили справу громадівців: пропагували українство серед європейських народів. Так, 13 березня 1868 р. вони організували вечір Пам'яті Маркіяна Шашкевича, на який, як колись громадівці на Шевченківській, запросили представників слов'янських народів. Чарували слухачів українським словом, піснею, музикою. Тож не даремно Іван Пулюй, написав 23 квітня 1869 р., до Данила Танячкевича: *«Кождий наш чоловік знає, що ціль наша єсть: вибороти свому народови поважне становисько між иншими народами, та не заржавілими списами чубатих дідів наших, а живим словом, русько українською мовою»*. У товаристві «Січ» почали зароджуватися гуртки. Організували гурток «Товаришів просвіти», що займався видавничою діяльністю, щоб видавати книжки для народу. Іван Пулюй, тоді вихованець Віденської греко-католицької духовної семінарії, організував «Працю» і взявся за переклад

Молитвослова на українську мову. Адже усі народи Світу звертаються до Бога рідною мовою і більшість з них мають Молитовники на рідній мові. Чому ж не мають цього Скарбу українці? Після виходу у світ Молитвослова Іван Пулюй разом з Пантелеймоном Кулішем, який приїхав на той час у Відень, взялися за переклад Чотирьох Євангелій. А коли Євангелії надрукували, то січовики допомагали їх розповсюджувати.

Січовики підтримували зв'язки з членами українських товариств, що діяли на той час на усіх українських землях, а вони (члени товариств), їдучи у західну Європу, навідувалися до віденських січовиків, що мало великий вплив на останніх.

Іван ПУЛЮЙ (2.2.1845-31.1.1918),
засновник тернопільської «Громади»,
співзасновник віденського
«Академічного товариства «Січ» та
його шостий кошовий



Шостим кошовим «Січі» був Іван Пулюй. Він керував «Січчю» від 30.11.1872р. до 29.11.1873р. У цей час, а точніше – 3 травня 1873 р. на загальних зборах змінили статут товариства, що розширило його діяльність. З кожним днем кількість членів товариства зростала, тож треба було збільшити і приміщення, у якому збиралися січовики. Крім того товариство мало велику бібліотеку, до збору якої спричинилися члени Київської «Старої громади» та кошовий «Січі», яким тоді був Остап Терлецький. За словами Михайла Драгоманова бібліотека «Січі» була «найбагатша на українські книжки в усій Австрії».

Не раз зазнавала «Січ» і нагінки з боку уряду. Так, у 1876-1877 рр. прокотилася нагінка на соціалістів. Тоді у Львові постраждали Михайло Павлик, Іван Франко, вихованці Львівської духовної семінарії тощо. Не обминула нагінка й Відень: проводили ревізії у помешканнях січовиків та у домі товариства. Здавалося б, усе: не буде більше «Січі». Та це лише здавалося. Патріотично налаштована частина української молоді тягнулася до «Січі». Кількість членів товариства збільшилася. Та всякі зібрання в той

час припинилися. Навіть ушанування пам'яті Тараса Шевченка не дозволила поліція.

З часом «Січ» ожила, набула давньої активності. Студентська молодь організовувала з'їзди молоді у Коломиї, у Львові та Чернівцях. Ожила віденська «Січ», ожило й українство на рідній землі. Та чи на довго... Події, що відбувалися на українських землях, завжди обговорювали на зібраннях віденських січовиків. Цим подіям давали оцінку. Так було і під час створення «нової ери», ініціатором і промотором якої був галицький намісник Австрії, граф Казимир Бадені, відомий кривавими «баденівськими виборами» до сойму в 1895 р., під час яких народовецькі послі Юліан Романчук, Євген Олесницький (останній війт тернопільської «Громади») та інші залишилися без мандатів. У той час січовики розділилися на прихильників і противників «новоєрівства». Противники «новоєрівства» не бачили від нього ніякої національної користі для українців. Помимо цього було ще багато інших подій, що спричинилися до закриття товариства «Січ». Сталося це 27 червня 1893 р. – «Січ» закрили... Та через пів року (31 грудня 1893 р.) стараннями Юліана Романчука та Теофіля Окуневського діяльність «Січі» відновили.

Відновлена «Січ» знову взялася за налагодження стосунків з молодіжними товариствами інших європейських народів, які втратила через події, згадані вище. Січовики брали участь у спільних слов'янських вечорах, концертах. Тяжко пережили українці в Галичині, а разом з ними і січовики у Відні, чергові «баденівські» вибори 1897 року. Під час голосування в парламенті *«за недовіру до уряду з приводу баденівських насильств на виборах»* українців не підтримали представники слов'ян. «За» проголосували лише українці, німецькі соціал-демократи і один словінець. Січовики залишилися сам-на-сам серед слов'янського світу, з яким майже тридцять років співпрацювали, і на підтримку якого так сподівалися. Сподіваємося на підтримку слов'янського світу і ми – сьогоднішні українці. Адже у Європі на порядку денному тепер стоїть дуже важливе для України питання: Бути чи не бути Нам у Європейському Союзі?...

Віримо, що Бути! Адже центр Європи знаходиться в Україні... А ми, Українці, є одним із Європейських Народів.

Наближалось 30-річчя від часу заснування «Січі». Тож у 1898 році січовики видали першу історію «Січі». Її назва – «Альманах «Січі».

Час біжить. Міняється світ. Змінилися українці-січовики. Та вони завжди пам'ятали присягу тих, хто виховувався в українських таємних товариствах «Громадах», а прийшовши у Відень створив «Академічне товариство «Січ», щоб *«трудитися для добра свого народу»*. Якщо «Громада» була просто *школою виховання української національної еліти*, то «Січ» стала – *високою школою*. Коли у 1901 році Юліан Романчук, на той час посол до Віденського парламенту, вніс на засідання Резолюцію з приводу заснування окремого університету для українців східної Галичини та збільшення українознавчих кафедр у Львівському університеті, який на той час опанували поляки, його підтримала українська студентська молодь як у Львові, так і у Відні. Українська молодь бойкотувала Львівський університет. Понад 300 студентів-українців у знак протесту покинули Львівський університет і виїхали за кордон, щоб там продовжити навчання. У Відні січовики організували низку нарад, зібрань, написали і прочитали немало рефератів і доповідей про причини бойкоту українцями Львівського університету. З приводу Львівських подій віденські січовики 26 листопада 1901 року організували віче, на яке прийшло понад 300 осіб. Були серед них і парламентські послы та представники народів, землі яких на той час також входили до складу Австро-Угорської імперії. Та Віденська влада не дозволила відкрити український університет у Львові. Тож січовики своїми вічами продовжували нагадувати владі про нагальну потребу відкриття університету для українців. У цій справі вони мали надзвичайну підтримку від німецьких і слов'янських студентів, які були разом з ними і допомагали їм в організації віча. У 1904 році шостий кошовий «Січі» – Іван Пулюй, надрукував у газеті «Діло» п'ять статей, які стосувалися Львівського університету. У цьому ж році статті вийшли окремою книжечкою: «О руський універзитет у Львові».

З цих європейських Синів, які підтримували віденських січовиків у справі відкриття українського університету у Львові, та й не лише у цьому, вирости майбутні науковці, громадські і політичні діячі, які не раз підтримували українців у своїх домаганнях на вільну й незалежну Україну. Пам'ятаймо про це! Не забудьмо цього!

З часом зросла чисельність рядів «Січі», разом з тим оживилася її діяльність. Січовики слухали лекції, які читали в інших віденських українських товариствах, ходили на прогулянки, на екскурсії до музеїв тощо. Вони завжди стояли на сторожі рідних національних інтересів.

3-го січня 1911 р. влада затвердила новий статут і нову назву товариства. З цього часу товариство стало називатися: «Товариство українських студентів «Січ». Та для січовиків воно завжди було «Академічним Товариством «Січ». У товаристві січовики організовували нові гуртки. Так, студенти Земельної школи організували гурток «Земля». Організували й інші гуртки. Адже «Січ» була науковим товариством, а його перша назва: «Академічне Товариство «Січ». Це – прообраз Наукового товариства ім. Т.Шевченка, яке стало прообразом Української Академії Наук. Отже від «Академічного Товариства «Січ» через НТШ – до УАН. Українські січовики разом з представниками інших народів, які мали у Відні свої товариства, відзначили 50-річчя смерті Тараса Шевченка та річницю від дня трагічної загибелі Адама Коцка – львівського студента, який загинув у боротьбі за український університет у Львові. З часом до товариства почали входити і дівчата. Членом товариства була й Ольга Левицька-Бесараб, яка на той час навчалася у Відні в Торгівельній академії. У 1920 р. вона стала членом Української Військової Організації (УВО). 13 лютого 1924 р. п. Ольга загинула у львівській тюрмі від рук польської поліції під час допитів. Її поховали у Львові на Янівському цвинтарі. До її могили приходила і приходять українська молодь. Як бачимо у «Січі» молодь вчилася, у «Січі» вона виховувалася. А коли треба було, то ставала на захист Прав українців на рідній землі.

Раптовий вибух Першої світової війни застав січовиків поза межами своєї віденської домівки. У той час вони були на канікулах. Їх уже було

126 осіб. Багато з них опинилися у цісарській армії, а були й такі, що пішли добровільно у ряди Українських Січових Стрільців. Ті, хто був звільнений від військової служби, повернулися до Відня і відновили роботу товариства. Крім того, січовики опікувалися українськими пораненими, хворими та самотніми людьми, які перебували у різних шпиталях Відня. «Січ» зажила новим життям. Прийшла нова студентська молодь, відновилися роботи давніх гуртків, утворили нові. Час від часу січовиків забирали на фронт. Терпіли вони і матеріальну скруту, адже війна, а додому далеко... Та українці допомагали січовикам... «Січ» жила... Жила і продовжувала *«трудитися для добра свого народу»*....

Підтримуючи постійний зв'язок з рідною землею, січовики знали про все, що там діялося. Тож 2 червня 1916 р. січовики зібралися у своїй домівці, щоб вшанувати Славетного українця Івана Франка – Велета Українського Слова і Духу, якого вже не було серед живих. Вечорами вони проводили розмови на політичні теми, грали в шахи, обговорювали прочитані книжки, співали українських пісень. У травні 1916 року січовики провели студентське віче з приводу все того ж, досі не відкритого, українського університету у Львові.

Наступного року на студентських зборах у «Січі», які проходили в червні, внесли *«резолуції з вимогами злуки всіх українських земель, які входили до Австро-Угорщини й Росії в один національно-державний організм України»*. Січовики закликали українців до єдності. Тож 3 грудня 1917 р. українська академічна молодь у Відні заявила, *«Що вона стоїть непохитно під прапором з'єднаної вільної України. І закликає весь український загаль, щоб він став разом з ними до боротьби за повне з'єднання і за державну самостійність цілого українського народу»*. Як бачимо, у роки боротьби українців за свою Державу січовики були разом з українським народом. Вони продовжували робити для рідної землі все те, що було на часі й вони могли зробити. Вони були неофіційними послами українців, які не мали своєї держави у Європі.

Засновник і вихованець тернопільської «Громада», а потім співзасновник і шостий голова віденської «Січі» Іван Пулюй до останньої

хвилини свого життя боровся за Незалежність України. У роки Першої світової війни Пулюй співпрацював з Союзом визволення України. Він писав статті на захист Землі рідної та Народу українського. У його брошурі, написаній німецькою мовою, «Україна і її міжнародне політичне значення», читаємо: *«Поневолені народи Росії мають бути звільнені і зорганізовані у самостійні держави. Але найзначнішим для здійснення цієї високої мети, та встановлення тривалого миру в Європі може бути тільки самостійна Україна. Самостійність України є, на наш погляд, ключем до мирного дому Європи»* (брошура надрукована у збірнику праць Івана Пулюя [3], с. 635-653). Чи почули тоді Пулюя!? На жаль – ні. Не почули. Горіла Європа у роки Першої світової війни, горіла і в роки Другої. Гинули люди, росли сиротами діти, руйнували міста і села... Чому не чули тодішні керівники Європи і Світу фізика, електротехніка, винахідника, радника цісарського двору, перекладача Молитовника і Святого Письма, а найперше Українця, Івана Пулюя?... Чому!?!... Маю надію, що тепер почують. Адже на нашій Землі – Україні знову ллється кров, знову гинуть люди, знову залишаються сиротами діти. Наразі лише наші – українські.

Читайте Статті Івана Пулюя... Читайте Листи Івана Пулюя... Читайте!... В одному з листів до Теофіля Окуневського, посла до Ради державної у Відні, за 20-те листопада 1917 року, Іван Пулюй написав: *«Справи відбудови Польщі і прилучення до неї Галичини, що так сильно зворушила ум і серце нашої інтелігенції і послів наших, не сходить мені з думки і мучить мене в день і в ночі, бо й сон мене не береться від зворушення і пересердя. Я бачу, що тепер надходить дуже грізний час, і що треба всім українцям більше як коли одно стайне стати і боротися з ворогами нашими»* ([2], С. 502).

Не вибороли українці своєї Держави на початку ХХ сторіччя... Не вибороли... І знову залишилися українські землі поділені між сусідніми державами. Затужили і січовики... З часом у «Січ» повернулися утікачі з польських таборів полонених. Прийшла молодь. «Січ» повернулася до своєї діяльності. У Європі утворилося нові держави, а у Відні багато

молодіжних товариств, з якими січовики підтримували дружні стосунки. Віденська «Січ» була й далі одним з найважливіших осередків українського студентського життя за межами Землі рідної.

Від початку свого заснування «Академічне товариство «Січ», було острівцем, з якого поширювалися українські ідеї на Центральну та Західну Європу. Та це не подобалося як давнім, так і пізнішим москвофілам, керованими зі сходу. То ж, коли наблизився кінець Другої світової війни і війська союзників увійшли до Відня, вони поділили його на чотири окупаційні зони – американську, англійську, французьку й радянську. Тогочасний провід «Січі» намагався допомогти своїм членам відійти на Захід. Старався зберегти архів та бібліотеку. Однак з багатьох причин цього зробити вже не могли. Радянські спецслужби, прийшовши у Відень, ловили українців, та й не лише українців, у всіх окупованих зонах і вивозили їх до радянських концтаборів, звідки живими повернулися одиниці. Де їх поховали?... Чи то на Донбасі, в концтаборі «Юнком» (юний комуніст), що біля міста Єнакієве, чи на далекій Півночі? Ніхто про це не відає... Наразі...

Після вивезення січовиків у радянські концтабори австрійська поліція ліквідувала «Січ». Було це 18 червня 1947 року. Будь-яку спробу відновити діяльність «Січі» оголошували нелегальною.

За час діяльності «Академічного Товариства «Січ» січовики 102 рази обирали кошових. Обирали з поміж себе: кращих з кращих.

Останнім кошовим – уже таємної «Січі» (від 29 червня 1945 р. до 18 червня 1947 р.) – був *Сергій Наклович*, уродженець м. Сокаль, що на Львівщині. Дипломований купець. Громадський і студентський діяч. У жовтні 1947 р. радянські спецслужби його арештували і вивезли до одного з концтаборів поблизу Воркути (тепер Росія). З Божою волею він залишився живим, а після заслання повернувся до Відня. Повернувся, щоб розповісти українцям про останні хвилини життя і діяльності українського молодіжного товариства «Січ» та про радянські концтабори.

Майже 80 років, а точніше – 79 років 6 місяців і 9 днів, діяло у Відні товариство української молоді «Академічне товариство «Січ», яке було

засноване ще за часів Австро-Угорської імперії. Діяло! А це значить – молодь вчилася, працювала для добра українського народу, наближала Вільну, Незалежну, Самостійну Україну. Робила це на чужій землі, бо ж своя було під чужинецькою займанщиною.

Вічная пам'ять Віденським Січовикам!

Слава їх наступникам! Що були, є і завжди будуть на нашій українській землі!

Література

1. Ольга Збожна. Учнівські та студентські «Громади» – школа виховання української національної еліти. – Тернопіль, 2012. – 232 с.
2. Збожна О.М. Іван Пулюй. Листи. – Тернопіль: Воля, 2007. – 544 с.
3. Іван Пулюй. Збірник праць / За ред. В.Шендеровського. – К.: Рада, 1996. – 712 с.

Olga Zbozhna

**IVAN PULUJ AND UNDERGROUNG SOCIETIES OF UKRAINIAN
YOUTH: «HROMADA» AND «SICH»
(To 170th anniversary of Ivan Puluj)**

History of student societies “Hromada” and “Sich” as well as activity record of these prominent societies are presented. The fact that Ivan Puluj was one of co-founders of these societies is stressed. Importance of the noted societies for the Ukrainian national idea formation is explained in detail.

Keywords: *student societies, “Hromada”, “Sich”, Ivan Puluj.*

Микола Підгурський, Майкл Внук

ВНЕСОК С.П. ТИМОШЕНКА У РОЗВИТОК СВІТОВОЇ ІНЖЕНЕРНОЇ НАУКИ ТА ОСВІТИ

Стаття присвячена науково-освітній діяльності видатного вченого світової слави в галузі механіки С.П. Тимошенка, одного з організаторів і перших академіків Української академії наук (УАН). Аналізується формування С. Тимошенка як вченого і викладача Київського і Петербурзького політехнічних інститутів. Розглядається американський період діяльності професора Тимошенка і його внесок у світову інженерну науку та освіту.

Ключові слова: механіка, інженерна діяльність, розвиток інженерної освіти.

У 2013 році виповнилося 135 років від дня народження видатного вченого у галузі механіки, одного з організаторів і перших академіків Української академії наук (УАН), члена низки інших академій, почесного доктора багатьох університетів і технічних вищих навчальних закладів Степана Прокоповича Тимошенка, який зробив величезний внесок у розвиток інженерної науки та освіти у цілому світі. За його методиками та підручниками, що стали класичними, навчались і навчаються інженери кількох поколінь у багатьох країнах світу.

С.П. Тимошенко народився у селі Шпотівка Конотопського повіту Чернігівської губернії (нині Сумська область) [1, 2]. У 1896 році закінчив Роменське ремісниче училище (навчався разом з А.Ф. Йоффе, майбутнім видатним фізиком, академіком, лауреатом багатьох премій) та вступив до Інституту інженерів шляхів сполучення в Петербурзі, одного з найкращих

технічних закладів на той час. Варто відзначити, що математична підготовка майбутніх інженерів з будівництва шляхів сполучення була не нижчою, а то й вищою, ніж у студентів фізико-математичного факультету Петербурзького класичного університету. Уже на першому курсі студенти вивчали вищу математику (5 лекцій на тиждень), фізику (2 лекції), хімію (3 лекції), основи механіки і статички (2), будівельну справу (1), геодезію (3), нарисну геометрію (2) та богослів'я (1) [1]. Перелік дисциплін, як на наш час, вражаючий. А ще були практичні та семінарські заняття.

Під час навчання Степан Тимошенко слухав лекції і виконував проекти мостів у відомого вченого та інженера М.А. Белелюбського. Особливо вразили його лекції Ф.С. Ясинського, який читав курс «Статика споруд». Саме в механічну лабораторію, яку очолював М.А. Белелюбський, він був запрошений на посаду лаборанта. Одночасно С.П. Тимошенко удосконалював свої знання з математики, відвідуючи різні курси математики на фізико-математичному факультеті Петербурзького університету.

Варто сказати, що методика підготовки інженерів високого рівня в тодішній Російській імперії була оцінена ще на Всесвітній виставці у Відні у 1873 році, де була удостоєна Великої золотої медалі [3].

Важливий прорив в інженерній освіті відбувся наприкінці ХІХ та у перші два десятиліття ХХ століття, що були роками розвитку математичної, природничої і технічної освіти. Застосування складних математичних методів і досягнень в області теоретичної фізики, механіки і хімії для розвитку важливих практичних задач становлення професійної області прикладної науки, створення відповідної інфраструктури у вигляді інститутів і лабораторій – ці тенденції сформувалися у цілому ряді країн, насамперед – в Німеччині, Франції, Росії та США.

З середини 90-х років ХІХ ст. активно створювались нові освітні заклади, зокрема Київський політехнічний інститут (1898р.), Петербурзький політехнічний інститут (1899р.), спрямовані не тільки на підготовку інженерних кадрів, а й на одночасне вирішення вченими й інженерами задач в області створення транспортної інфраструктури,

нових типів суден і авіації, військової і хімічної промисловості, електро- і радіотехніки, енергетики і зв'язку. Саме з цими інститутами була пов'язана подальша доля С.П. Тимошенка.

Засновники політехнічних інститутів у Києві й Санкт-Петербурзі вважали, що інститут повинен охоплювати і розвивати технічні науки «ширше і глибше», аніж було б достатньо для університетської науки, і що тільки при умові найширшого розвитку наукової роботи в інституті може бути забезпечена підготовка інженерів всесторонньо розвинутих, які мали б глибокі знання в області техніки і технічних наук і які вміли б застосовувати ці знання для виробничих потреб [4].

Саме у 1903 році Степан Тимошенко перейшов на роботу в механічну лабораторію недавно створеного (1899 р.) Петербурзького політехнічного інституту і бере безпосередню участь у монтажі випробувальних машин, які надходили з-за кордону. Саме в цій лабораторії почали впроваджуватись найновіші методи роботи зі студентами: вперше почали проводитись лабораторні заняття, які дозволили перевіряти правильність теоретичних положень курсу опору матеріалів, отриманих висновків і результатів. Вже в 1904 році Тимошенко був відкомандирований для ознайомлення з науковими школами в Берліні та Мюнхені та проведення там наукових досліджень, що було звичайною практикою на той час. Зокрема, в Геттінгенському університеті (Німеччина) (1905-1906 рр.) він слухав курс лекцій Ф. Клейна з теорії пружності, В. Фойгта з гідродинаміки. Працюючи в лабораторіях Геттінгенського університету під керівництвом проф. Прандтля, Тимошенко провів дослідження плоскої форми згину двотаврової балки, яка потім у 1907 році у КПІ була представлена як дисертація на отримання вченого ступеня ад'юнкта з прикладної механіки [5].

1901-1906 рр. для становлення молодого вченого стали чи не найголовнішими. За п'ять років випускник Шляхового інституту встиг дуже багато і заявив про себе як учений, інженер і педагог.

Наступний період творчої праці С.П. Тимошенка пов'язаний з Україною, Київським політехнічним інститутом, заснованим у 1898 році.

Саме за порадою першого ректора КПІ В.Л. Кірпічова, який був відомим вченим і фахівцем з опору матеріалів, Степан Прокопович взяв участь у конкурсі й був обраний у 1906 році завідувачем кафедри опору матеріалів, в 1908 р. – секретарем, а в 1909р. – деканом інженерно-будівельного факультету. С.П. Тимошенко за три роки перебування в Київському політехнічному інституті довів викладання теорії пружності і опору матеріалів до такого рівня, про який можна тільки мріяти [6]. Ним було повністю перебудовано викладання курсу опору матеріалів, який і було видано у 1911 році. Цікаво, що курс у викладі С.П. Тимошенка і донині читається у вищих школах багатьох країн світу. Надалі, ним були створені фундаментальні підручники по теорії коливань, теорії стійкості деформівних систем, інженерній механіці, прикладній динаміці, теорії споруд, теорії пластин і оболонок, історії науки про опір матеріалів.

Велике значення він надавав механічним лабораторіям, де проводились практичні дослідження окремих механічних явищ. Такі лабораторії були організовані ним в Петербурзькому, Київському і Загребському політехнічних інститутах, в Мічиганському і Стенфордському університетах. Так поступово Росії, Україні, а потім в Америці утворились наукові школи Тимошенка [7].

За час перебування в Києві Тимошенко завершив роботу над монографією «Про стійкість пружних систем» (1910), у якій розглядав застосування енергетичного методу до проблем стійкості, і ця робота отримала премію Д.І. Журавського [8].

Важливо відзначити, що всі викладачі технічних закладів освіти проводили інженерні дослідження та конструкторські роботи важливих технічних об'єктів. У роки першої світової війни С.П. Тимошенко здійснив роботи з міцнісних розрахунків літаків (у т.ч. І.І. Сікорського), а разом з М.П. Петровим запропонував методику розрахунків, яка дозволила підвищити допустиме навантаження на залізничні шляхи [1].

С.П. Тимошенко у 1911 році стояв біля витоків нової моделі освіти – підготовки фахівців високого рівня знань з фізики та механіки (системи фіз.-мех). Це відбулось в Криму, коли два однокласники, а потім

академіки – фізик А.Ф. Йоффе, засновник радянської школи фізики, і механік С.П.Тимошенко, засновник сучасної прикладної механіки в США, розробили навчальну програму і проект створення першого в світовій практиці інженерно-дослідного фізико-механічного факультету (фіз.-меху) в Петербурзькому політехнічному інституті, який не мав аналогів у світі. Такий факультет був створений у 1919 році. Згідно з новою моделлю освіти пропонувалось надання ширшого, а головне поглибленого вивчення математики, теоретичної механіки і фізики, з метою випуску не рядових інженерів, а «провідних діячів в прикладній науці», - згадував пізніше видатний математик, механік і кораблебудівник академік О.М. Крилов [3].

Варто відзначити, що «система фіз.-меху» мала певний вплив на європейську і американську науку і освіту, насамперед завдяки діяльності С.П. Тимошенка.

Через чверть століття розроблена і заснована в Політехнічному інституті «система фіз.-меху», що розвинула політехнічну систему підготовки кадрів, за ініціативою випускника цього інституту академіка П.Л. Капиці отримала творчий розвиток як «система фіз.-теху» спочатку на фізико-технічному факультеті МДУ (створений у 1946 р.), а потім – в Московському фізико-технічному інституті (МФТІ, створений в 1951 р.).

Ще один київський період у біографії С.П. Тимошенка пов'язаний з організацією Української Академії Наук (УАН), на чолі з академіком В.І. Вернадським. С.П. Тимошенку було доручено підготувати програму організації відділення механіки, а також у його складі лабораторії для експериментальних досліджень [5].

Пропозиції С.П. Тимошенка про принципи організації Української Академії Наук було викладено у записці від 22 червня 1918 року, де відзначено: «Той час, коли наука і техніка йшли різними шляхами, вже минув, і тепер часто користуються для розв'язання чисто технічних задач могутньою зброєю, яку нам дає математика і механіка». Користуючись методами експериментальних наук, широко застосовують їх для розв'язання технічних задач лабораторним шляхом.

З його ініціативи в організованій Академії Наук у 1918 році було створено Інститут технічної механіки (зараз Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН України). Це був перший у світовій практиці академічний інститут технічного профілю.

Г.С. Писаренко відзначив [5], що до створення відділення механіки в Академії наук України були лише окремі розгалужені роботи з механіки, головним чином у Києві (по містобудуванню) на чолі з Є.О. Патоном, яки згодом стане засновником славетного інституту електрозварювання, в Харкові (по машинобудуванню) на чолі з Г.Ф. Проскурою, в Дніпропетровську (по гірничій справі) на чолі з О.М. Динником, і лише зі створенням Інституту технічної механіки на чолі з С.П. Тимошенком, вже тоді вченим зі світовим ім'ям, були накреслені напрямки розвитку механіки та споріднених з нею дисциплін.

Так С.П. Тимошенко став одним з організаторів УАН та її дійсним членом (1918 р.). Згодом всесвітньо відомий учений в галузі механіки деформівного твердого тіла став академіком низки академій наук: Польської, Французької, Американської, Італійської, СРСР (у 1968 р.), Лондонського Королівського товариства, Американського філософського товариства), доктора багатьох університетів та інститутів [6].

Проте в Україні С.П. Тимошенку не вдалось попрацювати довший час. Тодішні складні умови змусили його виїхати в 1920 році з України – спочатку до Загреба, а потім у 1922 р. до США, де він пропрацював понад чотири десятиліття [7]. Американський період був найбільший у творчому житті С. Тимошенка. Перші п'ять років він працював інженером, а потім науковим консультантом великої компанії «Вестингауз», заводи якої розташовані в Пітсбурзі.

Вже у перші роки перебування у США С. Тимошенко відзначив, що наукові школи з математики і основних технічних дисциплін в Україні та Росії перебували на вищому рівні у порівнянні з американськими, але зв'язок науки і техніки налагоджувався в США успішніше, ніж у Європі [9].

У 1927 р. С.П. Тимошенко очолив новостворену кафедру прикладної механіки в Мічиганському університеті. Велику роль у розвитку цієї науки в США відіграла літня школа механіки при університеті, яку організував Тимошенко. Тут він читав спеціальні курси лекцій з теорії вібрацій, опору матеріалів та теорії пружності. Для читання лекцій запрошувались такі європейські світила механіки, як професори Прандтль, Р.В. Соусвелл, Х.М. Вестергаард, Карман та інші. Щорічно десятки, а потім і сотні інженерів поглиблювали свої знання в області прикладної математики. Багато з них готували докторські дисертації під керівництвом С.П. Тимошенка. Згодом слухачі літньої школи зайняли фактично всі керівні посади в основних навчальних та наукових центрах США [6]. З 1936 року С.П. Тимошенко працював у в Стенфордському університеті в м. Пало-Альто, штат Каліфорнія.

У США С.П. Тимошенко опублікував ряд фундаментальних робіт: у 1930р. – «Опір матеріалів», у 1933р. – «Теорію пружності», у 1940р. – «Теорію пластин і оболонок», у 1945р. – «Статику споруд», у 1948р. – «Вищу динаміку», у 1953р. – «Історію опору матеріалів», у 1959р. – «Інженерну освіту в Росії», яку автор написав після поїздки в СРСР, зокрема і в Україну, у 1958 році. Ще одна зустріч С.П. Тимошенка з рідною землею відбулась у 1967 році [1].

С.П. Тимошенко вніс величезний вклад у світову науку з механіки завдяки природному таланту, цілеспрямованій та феноменальній роботоздатності. Відкриваючи XII Міжнародний конгрес з теоретичної і прикладної механіки у Стенфордському університеті (1968), проф. Н. Фоферт відзначив, що до приїзду професора С.П. Тимошенка справжньої механіки в США не було [1].

Великий вплив на розвиток механіки в США мала створена при безпосередній участі С.П. Тимошенка секція механіки при Американському товаристві інженерів механіків (ASME), яка з 1928 року почала видавати журнал «Прикладна механіка» (серія E), який став одним з найавторитетніших видань у цій галузі. У 1957 році Американське товариство інженерів механіків заснувало медаль ім. С.П. Тимошенка, він

став першим лауреатом – «за неоцінений вклад і особистий приклад як керівника нової ери в прикладній механіці». Лауреатами цієї премії згодом стали Т. Карман, А. Надаї, Дж. Гуд'єр, Е. Рейснер, Дж. Ешелбі, Дж. Ірвін, Дж. Вілліс, Г. Баренблатт, З. Базант, А. Кнаус та багато інших видатних вчених-механіків [9].

Діяльність самого С.П. Тимошенка отримала визнання в всьому світі: член кількох академій, почесний доктор багатьох університетів і технічних вищих навчальних закладів багатьох країн світу. Багато його наукових робіт відзначено медалями і преміями: Медаль і премія Д.І. Журавського (1911 р.); премія імені В.В. Салова (1915 р.) – за роботу «Напруження у рельсових коліях»; імені В.Р. Вернера – за досягнення в області механіки (асоціація ASME), медаль імені Г. Ламме – від Американського товариства інженерної освіти; медаль Лівері (Інститут Франкліна) – за роботу з розрахунку підвісних мостів. Також С.П. Тимошенко був нагороджений Великою медаллю від Французького товариства докторів-інженерів за заслуги перед інженерною наукою, а у 1947 році Інститут механіки нагородив його Міжнародною медаллю імені Дж. Уатта як найвидатнішого інженера [8].

Відзначимо, що цікавість наукового світу до особистості С.П. Тимошенка викликана перш за все його великим вкладом у світову науку з механіки. Наукові дослідження вирізняються умінням знайти причину явища, пояснити це явище з допомогою простих математичних засобів – що зробили основні результати його діяльності класичними [4].

По-друге, видатні заслуги С.П. Тимошенка як педагога-методиста з підготовки наукових й інженерних кадрів. Його наукова думка і освіта сформувались під впливом досягнень Д.І. Журавського, Ф.С. Ясинського, В.Л. Кірпічова, І.Г. Бубнова, О.М. Крилова, Н.П. Петрова, М.А. Белелюбського, А.В. Гадолина, Л. Прандтля, Ф. Клейна та інших видатних вчених [10, 11].

Ідеї С.П. Тимошенка підняли розвиток інженерної науки й освіти на вищий рівень і є актуальними і на сучасному етапі, який характеризується стрімким розвитком і ускладненням наукоємних технологій. Новою

парадигмою інженерної освіти, за якою навчаються у ХХІ столітті в Мічиганському університеті (у цьому університеті з 1927 по 1936 роки працював на посаді професора і створив наукову школу С.П. Тимошенко) є розширення спектру ключових компетенцій, оснований на парадигмі взаємодії та взаємному проникненню фундаментальних і прикладних досліджень і знань (інтеграція науки і технологій (sci-tech, див. фіз.-мех., фіз.-тех.); інтелектуальна широта знань (мультидисциплінарність), що враховує вплив кіберінфраструктури; креативність та інноваційність. Інженери з такими компетенціями здатні освоювати і розробляти нові технології (наприклад, нано-біо-інфо-когно), вирішувати комплексні системні проблеми в складі мультидисциплінарних команд спеціалістів [12].

Як бачимо, ідеї С.П. Тимошенка про інтеграцію нових досягнення науки і техніки, освоєння передових промислових технологій, підготовка фахівців з широким інтелектуальним діапазоном міждисциплінарних знань, а не «замкнених» в рамках традиційних інженерних дисциплін, є актуальними і сьогодні.

Шкода, ще академіку С.П. Тимошенку було мало відведено часу творчої праці в Україні. Але українська земля подарувала людству геніального вченого, інженера й освітянина.

Доробок генія належить цілому світові. Але серце належить своїй і тільки своїй Вітчизні.

Схожою є доля одного з авторів цієї публікації – Майкла Петера Внука (1937-2014 рр.) визнаного американського вченого польського походження, одного із засновників сучасної механіки руйнування, який викладав і проводив наукові дослідження у Мічиганському і Стенфордському університетах. Майкл Внук належав до механіків, які прийняли естафету від С.П. Тимошенка і передали її наступним поколінням.

Література.

1. Тимошенко С.П. Воспоминания / С.П. Тимошенко – К.: Наук. думка, 1993. – 424 с.

2. Писаренко Г.С. Степан Прокофьевич Тимошенко / Г.С. Писаренко. – М.: Наука, 1991. – 240 с.
3. Саприкин Д.Л. Инженерное образование в России: История, концепция, перспективы // Высшее образование в России, 2012. – №1. – С.18-28.
4. Корсак І. Борозна в чужому полі / Іван Корсак. – К.: Ярославів Вал, 2014. – 224 с.
5. Писаренко Г.С. Нарис з історії розвитку механіки в Україні / Г.С. Писаренко. – К.: Наук. думка, 1995. – 55с.
6. Григолюк Э.И. Жизнь и судьба С.П. Тимошенко / Э.И. Григолюк. – 2-е изд., доп. – М.: МАИ, 2002. – 402 с.
7. Аксиоми для нащадків: Українські імена і світовій науці. Зб. нарисів / Упоряд і передм. О.К. Романчука. – Львівська істор.-просв. організ. «Меморіал», – 1992. – 544с.
8. Жук О. Академік Степан Тимошенко / О. Жук. – Світогляд, 2008. – № 5. – С. 7-9.
9. <http://imechanica.org/node/177>.
10. Бойко В.П. Бойко О.Е. Выдающийся ученый С.П. Тимошенко и его вклад в развитие инженерно- строительного образования // Вестник ТГАСУ, 2014. – № 1. – С. 211-222.
11. Кобець А.С., Дем'яненко А.Г. С.П. Тимошенко та сучасна інженерна освіта в Україні // Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін у вищій школі: збірник наукових праць. Випуск VIII. – Кривий Ріг: Видавничий відділ КМІ, 2013. – С. 16-24.
12. A road map 21st century engineering. The millennium project. The University of Michigan.

Mykola Pidgurskyi, Michael Wnuk

S.P.TYMOSHENKO'S CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF GLOBAL ENGINEERING SCIENCE AND EDUCATION

The article is devoted to the scientific and academic activity of the outstanding scientist of the world repute in the field of mechanics – S.P. Tymoshenko, one of the organizers and first academicians of the Ukrainian Academy of Sciences. S. Tymoshenko's evolution as a scholar and professor of Kiev and St. Petersburg Polytechnic Institutes is analyzed. American period of Professor Tymoshenko's activity and his contribution to the global engineering science and education are scrutinized.

Keywords: *mechanics, engineering activities, development of engineering education.*

УДК 620.1: 539.3: 539.4

Петро Ясній, Юрій Пиндус, Олег Галушак**СКІНЧЕННОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ ВТОМНОЇ
ТРІЩИНИ З УРАХУВАННЯМ НАПРУЖЕННЯ ВІДКРИТТЯ
ТРІЩИНИ ТА ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА ІНТЕНСИВНОСТІ
НАПРУЖЕНЬ**

Створено модель плоского зразка з центральною тріщиною в пружно-пластичній постановці за допомогою методу скінченних елементів у програмному комплексі ANSYS. Обґрунтовано довжину проростання тріщини для усталення пластичної зони у вістрі тріщини. Змодельовано ріст втомної тріщини за регулярного циклічного навантаження з урахуванням залишкових деформацій та напружень в околі вістря тріщини та контакту її берегів. Розраховано швидкість росту втомної тріщини з використанням ефективного коефіцієнта інтенсивності напружень, отриманого при моделюванні розкриття тріщини. Отримано задовільне узгодження результатів моделювання та експериментальних даних.

Ключові слова: закриття тріщини, ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень, ріст втомної тріщини, метод скінченних елементів.

Постановка проблеми. Багато конструкцій машин та механізмів перебувають під впливом циклічних експлуатаційних навантажень, які спричиняють зародження та поширення в матеріалах втомних пошкоджень. Тому широкого розмаху набули дослідження процесу втомного руйнування конструкційних матеріалів під дією експлуатаційних циклічних навантажень. В останні десятиліття приділяється велика увага дослідженням поширення втомних тріщин з урахуванням попереднього накопичення пошкоджень та деформування матеріалів (передісторії навантаження), які виникають в околі вістря

тріщини внаслідок дії нерегулярних випадкових послідовностей навантаження [1, 2]. В таких послідовностях присутні цикли перевантажувань розтягом та стиском, які призводять до затримки або прискорення росту втомних тріщин (РВТ). Ці ефекти є наслідком пластичного деформування матеріалу спереду та позаду вістря тріщини і їх необхідно враховувати при оцінюванні залишкового ресурсу та прогнозуванні РВТ у конструкційних елементах із втомними пошкодженнями. Одним із ефективних шляхів розв'язання таких задач є використання чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ).

Відомо, що при ступінчастому зростанні амплітуди циклічного навантаження відбувається пришвидшення РВТ [1, 2, 3]. Цей ефект триває від кількох десятків до сотень циклів навантаження сталої амплітуди і завершується усталенням швидкості РВТ до рівня, який визначається кінетичною діаграмою втомного руйнування (КДВР), за сталоамплітудного циклічного навантаження. Зазвичай при оцінюванні РВТ за сталої амплітуди чи за ступінчатого зростання амплітуди навантаження вказаним ефектом нехтують. Це призводить до зниження достовірності оцінки РВТ та залишкового ресурсу елементів конструкцій.

Дана робота присвячена розробленню та апробації методики скінченноелементного моделювання РВТ за умов сталоамплітудного навантаження, яка враховує вплив пластичних деформацій у вістрі та на берегах втомної тріщини. Ця методика базується на визначенні напруження відкриття тріщини i , відповідно, ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) кожного циклу навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для оцінювання міцності та ресурсу роботи елементів конструкцій часто використовуються підходи лінійної механіки руйнування, в основу яких покладена концепція КІН. Для пояснення численних кінетичних ефектів, які супроводжують втомне руйнування конструкційних матеріалів, використовують концепцію закриття тріщини (ЗТ) [4, 5]. Поверхні берегів тріщини позаду вістря залишаються замкненими під час частини циклу навантажування

розтягом, а контакт втрачається (розпочинається відкриття тріщини) лише за певного розтягу чого навантаження [6]. ЗТ характеризується КІН відкриття тріщини K_{op} . Частка циклу навантаження нижче K_{op} не пошкоджує матеріал і не призводить до росту втомної тріщини (РВТ). Для врахування ЗТ при аналізі напружено-деформованого стану (НДС) використовують ефективний розмах КІН [5]

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op}, \quad (1)$$

де K_{max} – найбільший КІН циклу навантаження.

Ефект ЗТ кількісно оцінюється коефіцієнтом відкриття тріщини U [3]:

$$U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min}) = \Delta K_{eff} / \Delta K. \quad (2)$$

де K_{min} – найменший КІН циклу навантаження.

Коефіцієнт відкриття тріщини для сплаву Д16Т з урахуванням коефіцієнта асиметрії циклу навантаження R визначається за формулою [8]

$$U = 0,5 + 0,4 \cdot R - 0,1 \cdot R^2. \quad (3)$$

де $R = K_{min} / K_{max}$.

У літературі описано різноманітні механізми, які пояснюють ефект ЗТ [5, 7, 9–13]. ЗТ оцінюють експериментально [14] та аналітично, з використанням чисельних методів [1, 2, 15, 16, 17].

Відомо, що експериментальні дослідження ефекту закриття тріщини є дуже трудомісткими, а отримані результати часто суперечливі [17]. На результати експериментального оцінювання напруження відкриття тріщини впливають: база вимірювання; відстань від вістря тріщини до бази вимірювання; невідповідність фронту тріщини з її виходом на поверхню та місцем встановлення тензодавачів; попередні пластичні деформації в околі вістря тріщини (передісторія навантаження) тощо. Тому різні підходи щодо оцінювання рівня відкриття тріщини мають обмеження у застосуванні [17].

В даний час все ширшим стає застосування комп'ютерного моделювання для проведення та аналізу експериментів. Для потреб та задач механіки деформованого твердого тіла широко набув МСЕ. Суть даного методу полягає в апроксимації досліджуваного тіла деякою

моделлю, котра являє собою сукупність елементів із заданими властивостями матеріалу та скінченною кількістю ступенів свободи [18]. МСЕ дає змогу відтворювати реалістичні моделі об'єктів досліджень із заданими властивостями матеріалу та умовами навантаження.

Дана робота спрямована на розв'язання актуальної задачі, а саме створення та апробацію реалістичної скінченноелементної моделі плоского прямокутного зразка з центральною тріщиною (сплав Д16Т) для дослідження кінетики НДС матеріалу в околі вістря втомної тріщини та симуляцію її росту з урахуванням умов навантаження.

Метою роботи є розроблення методики моделювання РВТ у плоских прямокутних зразках з центральною тріщиною, яка базується на оцінці напруження σ_{op} , КІН розкриття тріщини K_{op} та розмаху ефективного КІН ΔK_{eff} у вістрі втомної тріщини методом скінченних елементів. Моделювання РВТ виконується у пружно-пластичній постановці, з урахуванням умов плоского напруженого стану та за дії сталоамплітудного циклічного навантаження. Розроблення методики базується на результатах досліджень впливу дискретизації сітки скінченних елементів та вибору відстані й бази вимірювання на точність оцінки напруження σ_{op} відкриття тріщини [19]. Крім того, враховується відстань проростання тріщини, яка необхідна для усталення НДС спереду та формування пластичних утяжок позаду її вістря. Методика є придатною для оцінювання РВТ за умов нерегулярного навантаження і враховує взаємовплив навантажень змінної амплітуди (передісторії навантаження).

Результати досліджень. У роботі [19] запропоновано методику визначення розкриття втомної тріщини з допомогою оптичного методу координатних сіток. За цією методикою побудовано кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в ефективних координатах. Отримано задовільне узгодження КДВР, побудованих в ефективних координатах за різних асиметрій циклу навантаження, з поправкою Елбера та експериментальних даних, отриманих з допомогою методу координатних сіток (рис.1).

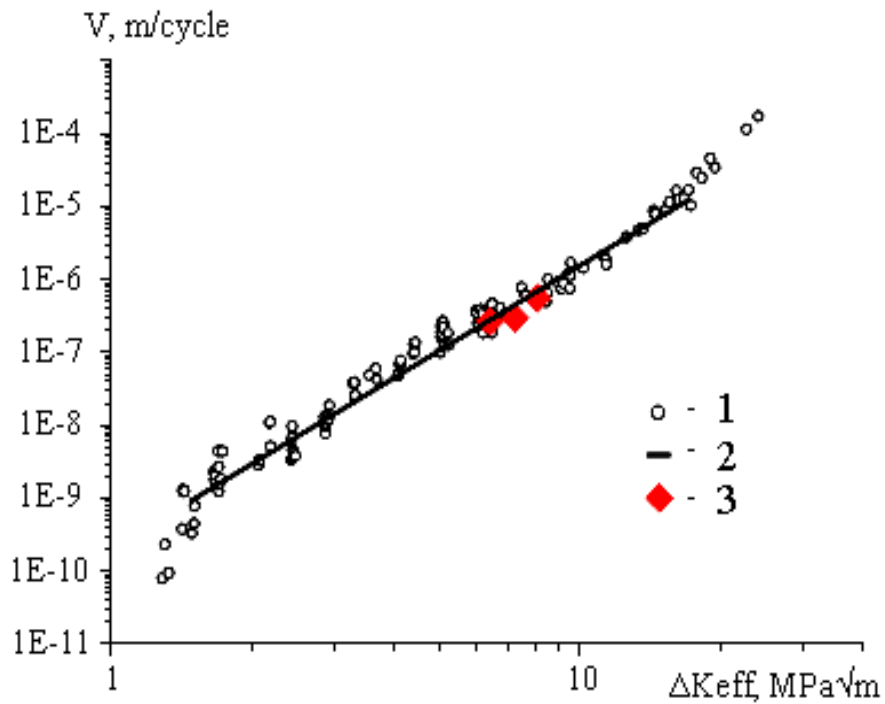


Рисунок 1. КДВР сплаву Д16Т в ефективних координатах:
 1 – експеримент з поправкою Елбера; 2 – апроксимація експериментальних даних; 3 – експеримент, метод координатних сіток

У праці [20] описано побудову моделі прямокутного зразка з центральною тріщиною (рис. 2), використовуючи програмне забезпечення ANSYS. Матеріал зразка – алюмінієвий сплав Д16Т. Обґрунтовано, що для скінченноелементної оцінки НДС за двовісного розтягу плоскої пластини з центральною тріщиною достатньо використовувати сітку скінченних елементів розміром 10 мкм. Описано методику вимірювання розкриття тріщини та методику визначення моменту відкриття тріщини і відповідного йому σ_{op} . Описана модель була також використана та доповнена у даному дослідженні.

Для моделювання поширення втомної тріщини вздовж напрямку її росту, на дві відокремлені поверхні – береги тріщини (рис. 3) накладали умови контакту. Це дало змогу змоделювати процеси, що виникають при закритті тріщини внаслідок утворення залишкових пластичних деформацій, контактних та стискувальних напружень в околі вістря тріщини.

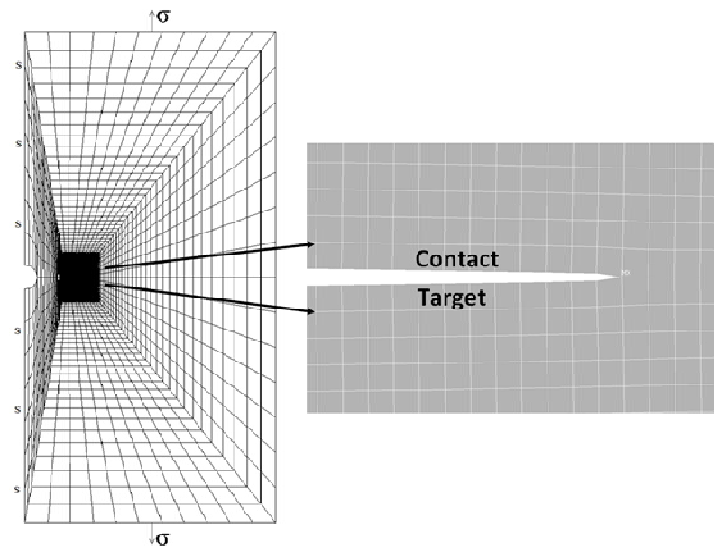


Рисунок 2. Скінченноелементна модель плоского прямокутного зразка з центральною тріщиною

Контактні поверхні створювали елементами CONTA171 і TARGE169. Ці елементи знаходяться на поверхні основних двовимірних скінченних елементів PLANE182 і мають ті ж геометричні характеристики. Контакт відбувається, коли елементи CONTA171 однієї (контактуючої) поверхні стикаються з елементами TARGE169 цільової поверхні.

У зразку створювали тріщину певної довжини. Вузлові точки вздовж лінії росту тріщини від концентратора (отвору) напружень до обраного вузла (вістря тріщини) не обмежувалися в переміщеннях (рис.3,а). Попереду вістря тріщини моделювали цілісний матеріал, через який може відбуватися РВТ (рис.3,б). Для цього вузлові точки на продовженні лінії тріщини обмежували у переміщеннях уздовж осі дії прикладених зусиль (вісь Y).

До модельного зразка прикладали циклічні навантаження розтягом сталої амплітуди, які спричиняли у ньому напруження бруто, що дорівнювали експериментальним. Швидкість РТВ спочатку визначали за формулою Періса

$$V = C(\Delta K_{\text{eff}})^n, \quad (4)$$

де $C=2,5 \cdot 10^{-10}$ (м/цикл)/(МПа $\sqrt{\text{м}}$); $n=3,8$ – експериментальні сталі матеріалу [19].

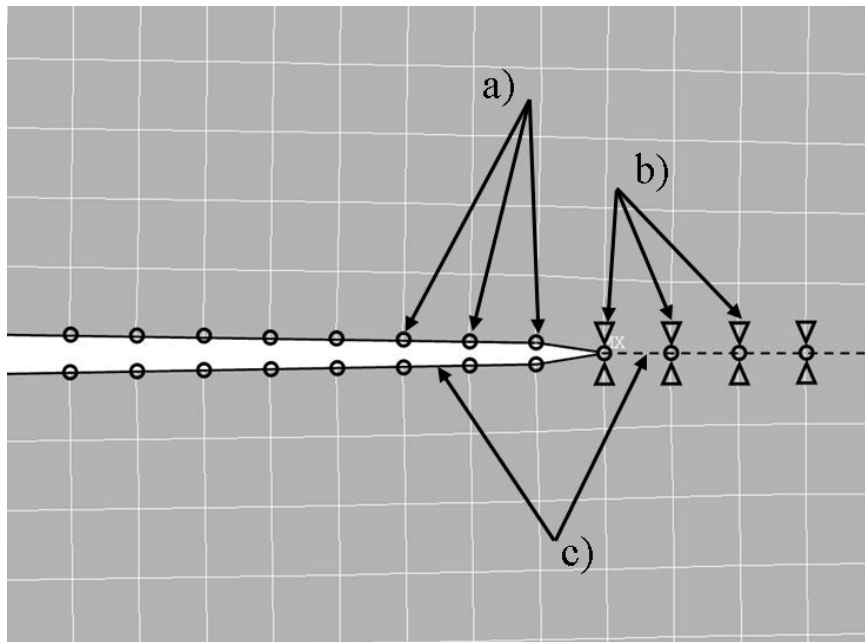


Рисунок 3. Схема берегів тріщини та суцільного матеріалу спереду вістря тріщини: а) вузли без обмежень (береги тріщини); б) обмежені по переміщеннях у напрямку дії зусиль розтягом вузли (суцільний матеріал); с) контактні поверхні

Ефективний розмах ΔK_{eff} обчислювали з урахуванням ефективного розмаху напруження (брутто) циклу навантаження $\Delta \sigma_{\text{eff}}$ за формулою

$$\Delta K_{\text{eff}} = \Delta \sigma_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\pi l} \cdot Y, \quad (5)$$

де l – половина довжини тріщини; Y – поправкова функція, що обчислюється за формулою [19]

$$Y = \left[1 - 0,025 \left(\frac{l}{W/2} \right)^2 + 0,06 \left(\frac{l}{W/2} \right)^4 \right] \sqrt{\sec \frac{\pi \cdot l}{W}}, \quad (6)$$

у якій W – ширина зразка.

Ефективний розмах $\Delta \sigma_{\text{eff}}$ обчислювали за формулою

$$\Delta \sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{op}} \quad (7)$$

де σ_{max} – найбільше напруження циклу навантаження; σ_{op} – напруження відкриття тріщини.

У кожному циклі навантаження (навантаження-розвантаження) обчислювали значення приросту тріщини за цикл (4). Підростання тріщини за кожен цикл підсумовували. Коли загальний приріст досягав кроку сітки, знімали обмеження переміщень уздовж осі Y з пари вузлових елементів, що знаходилися в одній точці й моделювали вістря тріщини у

цей момент (рис.3,b). При подальшому навантаженні описану процедуру повторювали. Таким чином, моделювали РТВ з урахуванням ефективного розмаху КІН.

Наступним етапом роботи було визначення найменшого приросту тріщини, яка забезпечує усталення НДС в околі її вістря. Зокрема, це формування циклічної пластичної зони спереду та пластичних утяжок позаду вістря тріщини і, відповідно, усталення напруження її відкриття. До моделі прикладали віднульове циклічне навантаження, яке створювало в ній максимальне нормальне напруження бруто $\sigma_{\max} = 83 \text{ МПа}$. За цих умов, із використанням описаної вище методики, пророщували тріщину на 5 мм зі швидкістю, що відповідає КДВР сплаву Д16Т. У результаті отримали залежність $\sigma_{\text{ор}}$ від довжини проростання тріщини (рис. 4). Як бачимо з рис. 4, після підростання тріщини на довжину 2 мм значення $\sigma_{\text{ор}}$ виходить на плато і зберігається сталим. Це можна пояснити усталенням НДС в околі вістря тріщини.

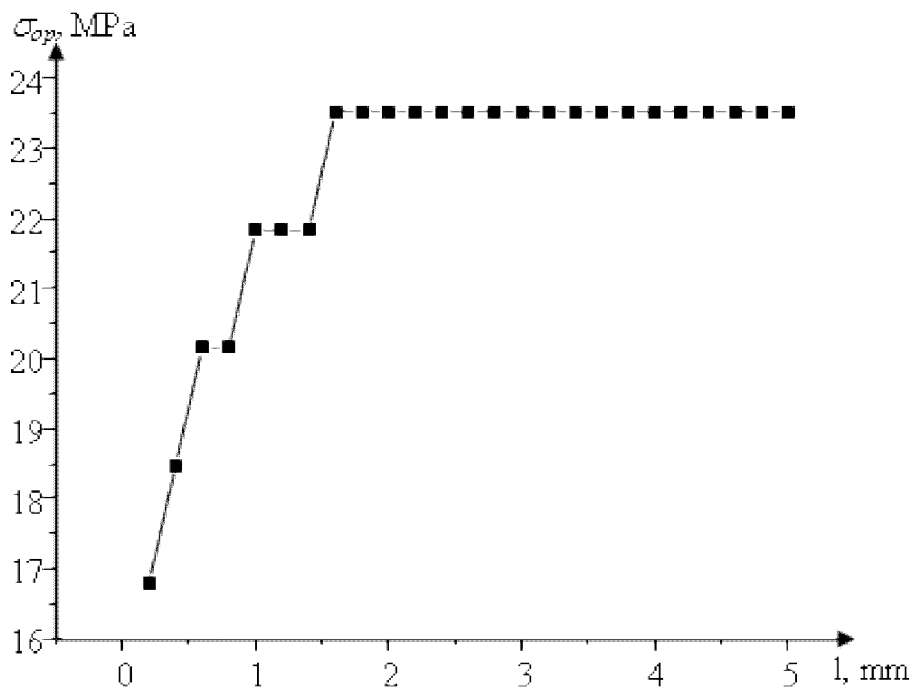


Рисунок 4. Усталення напруження розкриття тріщини $\sigma_{\text{ор}}$ при проростанні тріщини за постійного напруження бруто в зразку

Аналогічні результати отримано при моделюванні циклічного навантаження за інших значень напружень та асиметрій циклу навантаження. Отже, можна зробити висновок, що для достовірного

програмного відтворення НДС та моделювання РВТ необхідно програмно попередньо проростити тріщину мінімум на 2 мм.

Результати розрахунку НДС кожного кроку навантаження, зокрема пластичні деформації, враховували при розрахунку на наступному кроці (циклі). На рис.5 наведено результати скінченноелементного розрахунку нормальних напружень і нормальних пластичних деформацій в околі вістря тріщини та на її берегах, після пророщування тріщини на 2 мм. З рис. 5 а,b бачимо, що при пророщуванні тріщини на її берегах утворюються залишкові пластичні деформації (утяжки). Завдяки цьому при розвантажуванні береги тріщини змикаються дочасно, до повного розвантаження, що й зумовлює ефект закриття тріщини. Крім цього з рис.5,d бачимо, що після дочасного змикання на берегах тріщини виникають контактні залишкові стискувальні напруження.

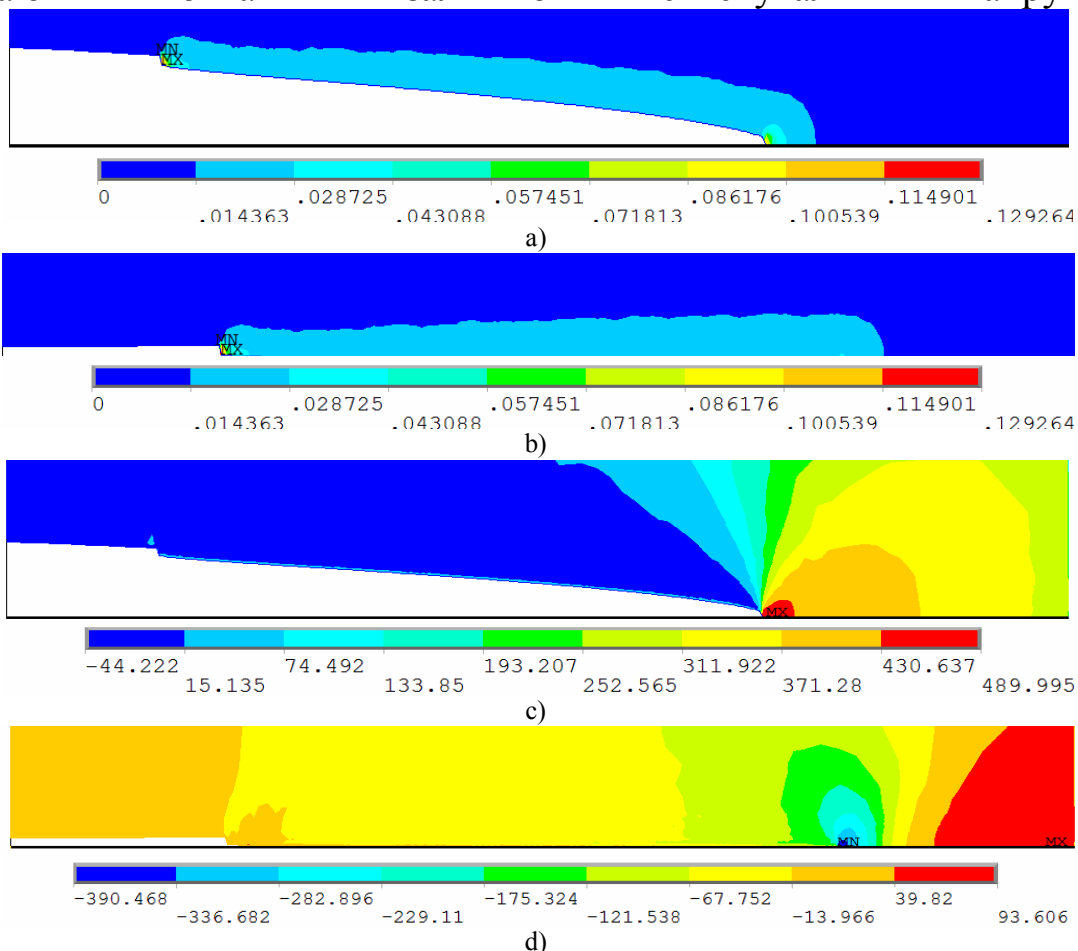


Рисунок 5. НДС у вістрі та на берегах пророщеної на 2 мм тріщини:
 а) нормальні пластичні деформації при $\sigma = 84$ МПа; б) нормальні пластичні деформації при розвантаженні, $\sigma = 0$ МПа; в) нормальні напруження при $\sigma = 84$ МПа; г) нормальні напруження після розвантаження, $\sigma = 0$ МПа

Таким чином, розроблена модель дає можливість враховувати вплив залишкових пластичних деформацій (утяжок) на берегах тріщини і, відповідно, залишкових стискувальних напружень.

Змодельовано серію програмних експериментів, які відповідають експериментальним даним за різних значень K_{\max} середньоамплітудної ділянки КДВР. У всіх програмних експериментах півдовжина тріщини становила 21,5 мм. До зразка прикладали віднульове циклічне навантаження (сталої амплітуди), яке створювало в ньому максимальні напруження брутто і відповідні значення КІН:

- $\sigma_{\max} = 62 \text{ МПа}$, $K_{\max} = 11,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$;
- $\sigma_{\max} = 74 \text{ МПа}$, $K_{\max} = 13,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$;
- $\sigma_{\max} = 84 \text{ МПа}$, $K_{\max} = 15,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Для достовірного відтворення НДС, а також для усталення відкриття тріщини, її спочатку пророщували на довжину 2 мм відповідно до описаної вище методики. Момент та напруження відкриття тріщини визначали за методикою, описаною в праці [19]. Ефективний розмах напруження (брутто) $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ та ефективний розмах КІН ΔK_{eff} обчислювали за формулами (7) та (5) відповідно.

Отримані з використанням МСЕ значення ΔK_{eff} порівнювали з результатами експериментів та розрахунковими даними, обчисленими за формулою (2) (рис. 6).

Обчислені МСЕ значення ΔK_{eff} (рис. 6b) на 15–20% перевищують ΔK_{eff} , отримані експериментально або з допомогою розрахунків за формулою (2). Відповідно, для усунення розбіжностей в алгоритм обчислення ΔK_{eff} при моделюванні запропоновано ввести коефіцієнт $\varphi = 0.85$:

$$\Delta K'_{\text{eff}} = \Delta K_{\text{eff}} \times \varphi . \quad (8)$$

Як можна побачити з рис.6,с та табл.1, з урахуванням поправкового коефіцієнта φ значення $\Delta K'_{\text{eff}}$ задовільно узгоджуються з результатами, отриманими експериментально та з допомогою розрахунків із поправкою

У (3). Завищення розрахованих МСЕ значень ΔK_{eff} можливе через неврахування у моделі шорсткості поверхонь руйнування та накопичення продуктів окиснення на берегах тріщини, які додатково збільшують напруження відкриття тріщини σ_{op} .

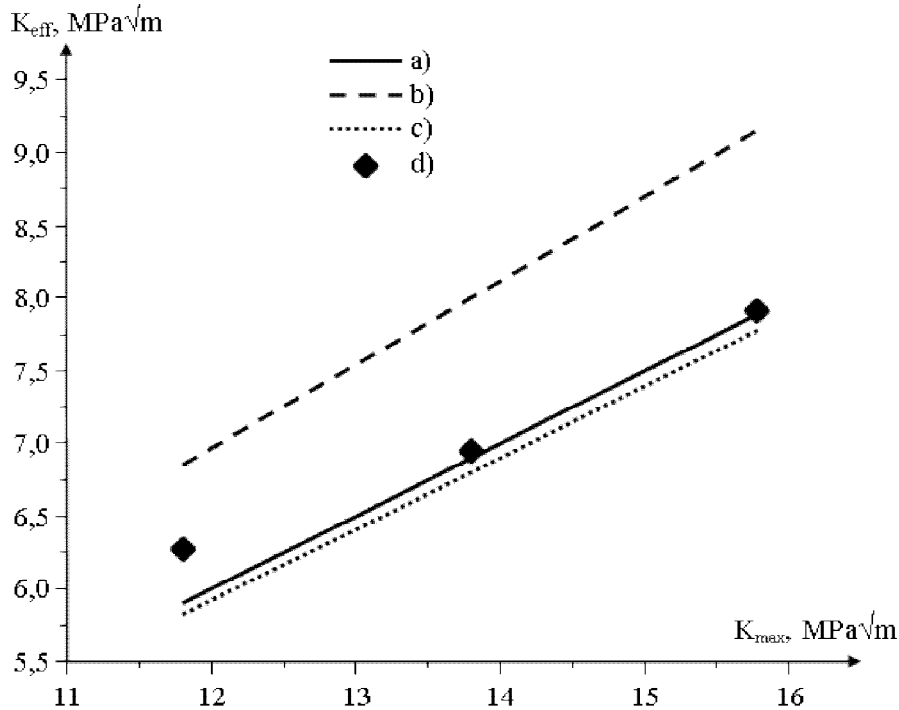


Рисунок 6. Порівняння розмаху ефективного КІН, отриманого експериментально (d), з допомогою розрахунків (a), при моделюванні в ANSYS без поправки φ (b) та з урахуванням φ (c)

Таблиця 1

Значення ефективного розмаху КІН та швидкості РВТ, отримані експериментально та моделюванням

K_{max} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	Розрахунок		Експеримент		ANSYS		ANSYS з урахуванням коефіцієнта φ	
	ΔK_{eff} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	V , м/цикл	ΔK_{eff} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	V , м/цикл	ΔK_{eff} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	V , м/цикл	$\Delta K'_{\text{eff}}$, МПа $\sqrt{\text{м}}$	V , м/цикл
11,8	5,9	2,12E-7	6,25	2,38E-7	6,9	3,75E-7	5,8	2,02E-7
13,8	6,9	3,85E-7	6,95	2,5E-7	8	6,76E-7	6,8	3,65E-7
15,8	7,9	6,44E-7	7,90	4,71E-7	9,2	1,13E-6	7,8	6,11E-7

У моделі враховуються лише пластичні деформації в околі втомної тріщини та залишкові стискувальні напруження. Таким чином, коефіцієнт φ у формулі (8) є поправкою, яка інтегрально враховує зростання

шорсткості зламу та накопичення продуктів корозії на берегах та у вістрі тріщини.

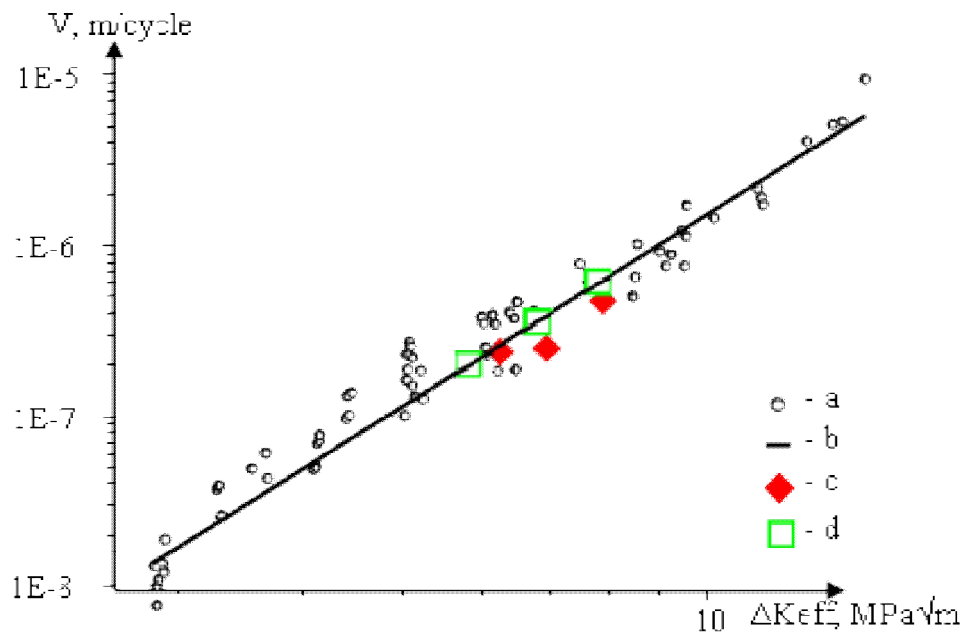


Рисунок 7. Кінетична діаграма сплаву Д16Т в ефективних координатах за асиметрії циклу навантаження $R=0$: а) експеримент з поправкою Елбера; б) апроксимація експериментальних даних, ф-ла (4); с) експеримент, метод координатних сіток [15]; д) моделювання MCE в ANSYS

В подальшому швидкість РВТ V у кожному із комп'ютерних експериментів обчислювали за формулою (4) з урахуванням $\Delta K'_{\text{eff}}$,

$$V = C(\Delta K'_{\text{eff}})^n. \quad (9)$$

Для порівняння змодельованих та експериментальних даних побудовано кінетичну діаграму сплаву Д16Т в ефективних координатах (рис.7). На ній зображено дані, які отримали експериментально (з поправкою Елбера U (3)) (рис. 7а), методом координатних сіток [19] (рис. 7с) та запропонованою методикою моделювання в ANSYS (рис. 7д). З діаграми бачимо задовільне узгодження експериментальних та змодельованих значень для кожного з експериментів.

Висновки. З використанням MCE (ANSYS) розроблено модель прямокутної пластини з центральною тріщиною в пружно-пластичній постановці (кінематичне зміцнення) та з урахуванням умов плоского напруженого стану. Опрацьовано методику скінченноелементного моделювання РВТ, яка базується на поцикловому підрахунку приросту

тріщини з урахуванням напруження відкриття тріщини, розмаху ефективного напруження та ефективного КІН циклу навантаження. При програмному моделюванні РВТ враховували вплив залишкових пластичних деформацій і стискувальних напружень в околі вістря тріщини на її закриття. Показано, що для підвищення достовірності обчислення напруження відкриття тріщини і ефективного КІН потрібно враховувати дані моделювання після усталення НДС в околі вістря тріщини, тобто після її підростання на $\Delta l \geq 2$ мм. Запропоновано, окрім пластичного деформування матеріалу в околі тріщини, враховувати шорсткість поверхні руйнування та накопичення продуктів корозії на берегах та у вістрі тріщини шляхом введення поправкового параметричного коефіцієнта. Отримані результати моделювання кінетики тріщини задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

Література

1. Richard H.A. Numerical investigations of the fatigue crack growth under service loading [In: CD-ROM] : Proceedings of ECF 15 / Richard H. A.; Sander M. – Stockholm, 2004.
2. Mottitschka T. Fatigue crack growth in nodular cast iron - Influences of graphite spherical size and variable amplitude loading / T. Mottitschka, G. Pusch, H. Biermann, L. Zybelle, M. Kuna // 15th International Conference on the Strength of Materials (ICSMA-15). – 16–21 August, 2009, Dresden, Germany. – Journal of Physics: Conference Series 240 (2010).
3. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втомі і тріщиноотривкість / П.В. Ясній. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
4. Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension / Elber W. // Eng. Fract. Mech. – 1970. – 2, №1. – P. 37–45.
5. Elber W. The significance of fatigue crack closure / Elber W. // Damage tolerance in Aircraft structures. – Philadelphia (PA): ASTM STP №486. – 1971. – P. 230–242.
6. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications / Anderson T.L. // Boca Raton: CRC Press. – 1991. – P. 793.
7. Романив О.Н. Эффект закрытия трещин и оценка циклической трещиностойкости конструкционных сплавов / О.Н. Романив, Г.Н. Никифорчин, Б.Н. Андрусив // Физ.-хим. механика материалов. – 1983. – №3. – С. 47–61.
8. Newman J.C. Mechanics of Fatigue Crack Closure / Edited by Newman J. C., Elber W. – ASTM International, 1988.

9. Benoit D. Oxidation of fatigue fracture surface at low crack growth rate / Benoit D., Namdar-Irani R., Tixier R. // Mater. Sci. and Eng. – 1980 – 45, №1. – P. 1–7.

10. Minakawa K. On crack closure in near - threshold region / Minakawa K., McEvelly A. J. // Scr. Met. – 1981. – 15, №6. – P. 633–636.

11. Ткач А.Н. Влияние частоты, асимметрии нагружения и структуры стали 10ГН2МФА на закрытие и рост трещин вблизи порога / А.Н. Ткач, Ю.Н. Ленец // Физ.–хим. механика материалов. – 1986. – №4. – С. 60–67.

12. Norubogen E. Martensitic transformation at a propagation crack / Norubogen E. // Ibid. – 1978. – 26, №1. – P. 147–152.

13. Tzou J.L. Fatigue crack propagation in oil environments. I. Crack growth behaviour in silicone and paraffin oils / Tzou. J.L., Suresh S., Ritchie R.O. // Acta met. – 1985. – 33, №1. – P. 105–116.

14. Методика и некоторые результаты исследования раскрытия трещины усталости / В.Т. Трощенко, П.В. Ясній, В.В. Покровский, П.В. Токарев // Проблемы прочности. – 1987. – №10. – С. 8–13.

15. Newman J.C. Elastic–plastic analysis of propagating crack under cyclic loading / Newman J.C., Armen H. // AIAA Journal. – 1975. – 13, №8. – P. 1017–1023.

16. Newman J.C. A crack–closure model for predicting fatigue crack growth under aircraft spectrum loading / Newman J.C. // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading. – ASTM STM 748. – 1981. – P. 53–84.

17. Advances in Fatigue Crack Closure Measurement and Analysis: Second Volume, Випуск 1343R. Craig McClung, J. C. Newman ASTM International, 1 січ. 1999 - 479 стор.

18. Giuseppe P. The finite–element method, Part I. / Giuseppe P. // Antennas and Propagation Magazine, IEEE. – 2007. – P. 180–182.

19. Моделювання розкриття втомної тріщини в сплаві Д16Т за регулярного навантаження методом скінченних елементів / П. Ясній, Ю. Пиндус, О. Галушак, В. Фостик // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2013. – №2. – С. 7–14.

20. Ясній П. Методика дослідження ефекту закриття втомної тріщини з допомогою оптичного методу координатних сіток / П. Ясній, Ю. Пиндус, В. Фостик. // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т.14 – №2. – С. 7–14.

21. Johnson W. S. Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth / Johnson W. S. // Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading. – Philadelphia (Pa) – ASTM STP №748 – 1981. – P. 85–102.

Petro Yasniy, Yuriy Pyndus, Oleh Galushchak
SIMULATION OF FATIGUE CRACK GROWTH IN D16T ALLOY
USING FINITE ELEMENT METHOD

The aim of this study was to simulate fatigue crack growth using ANSYS software, determine crack growth rate and compare it with experimental data. In order to simulate the fatigue crack propagation along the direction of its growth, contact conditions were applied on two separate surfaces – cracks faces. This made it possible to simulate the processes that occur at the crack closure due to the formation of residual plastic deformations, contact and compressive stresses in the crack tip. In order to simulate crack propagation, the rate of crack growth was determined by the Paris formula. Crack growth rate was determined after application of each cycle of regular loading and summarized using of the «cycle by cycle» technique. Results of stress-strain state simulation for each load step, including plastic deformations, were considered during simulation of next load step (cycle). During crack growth on its faces residual plastic deformations (extensions) were formed. Therefore during unloading the crack faces closed up prematurely, before unload is finished. This leads to the crack closure effect. In addition, after premature crack closure, residual contact compressive stress appears on the crack faces. Thus, the created model made possible to take into account the effect of residual plastic deformation (extensions) on crack faces and consequently residual compressive stresses. To compare the simulated and experimental results, the $V \sim \Delta K_{\text{eff}}$ diagram of D16T alloy in effective ΔK_{eff} values was built. The diagram shows satisfactory agreement of experimental and simulated results for each experiment.

Key words: *crack closure, stress intensity factor, fatigue crack growth, finite elements method.*

УДК 539.3

Петро Ясній, Сергій Гладь, Віктор Скочиляс, Олександр Семенець

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДОРНУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ОТВОРІВ НА ВТОМНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ СИЛОВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КРИЛА ЛІТАКА

У роботі описано розрахунок методом скінчених елементів з використанням програмного забезпечення ANSYS одновісного пружно-пластичного деформування пластини з центральним деформаційно зміцненим отвором діаметром 8 мм та 10 мм після дорнування з натягом 1%, 2%, 3%. Побудовано залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм в зразках від номінальних і локальних нормальних напружень в околі функціонального отвору.

***Ключові слова:** алюмінієвий сплав, дорнування отвору, одновісний циклічний розтяг, криві втоми.*

Постановка проблеми. Безпека експлуатації конструкції є надзвичайно важливою у авіабудуванні. Силкові конструктивні елементи, переріз яких ослаблений концентраторами напружень, дуже чутливі до процесів втомного руйнування під впливом внутрішніх напружень а також експлуатаційного навантаження. Для підвищення втомної довговічності силових конструктивних елементів використовують різні технологічні методи обробки поверхневим пластичним деформуванням шару матеріалу [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що попередня пластична деформація істотно впливає на межу витривалості та швидкість росту втомних тріщин [5-7]. Незалежно від натягу дорнування тріщини зароджуються від кромek пластично деформованих отворів з боку входу дорна [8]. Кількість циклів до зародження втомної макротріщини на поверхні довжиною 0,25 мм від отворів збільшується із підвищенням відносного натягу дорнування [8].

Експериментально досліджено вплив геометрії дорна (конус або куля)

та натягу дорнування (до $i=0\%..6\%$) на довговічність пластин з алюмінієвого сплаву 2024 T3 за одновісного розтягу [9]. З підвищенням відносного натягу дорнування від 1% до 2% ефективний коефіцієнт інтенсивності напружень та швидкість поширення втомної тріщини зменшуються [8]. Виявлено, що найбільше підвищення довговічності (у 6-7 разів при використанні конічного дорна та у 3-4 рази при використанні кулі) було досягнуто за натягу дорнування $i=5\%$. Глибина залягання залишкових напружень стиску досягає 5-6 мм [9].

Тому важливою є оптимізація параметрів дорнування з точки зору максимального підвищення довговічності елементів конструкцій з функціональними отворами з урахуванням розмірів отворів і амплітуди напруження.

Для моделювання та аналізу НДС конструктивних елементів під час технологічного і експлуатаційного деформування ефективно застосовується моделювання методом скінчених елементів [10-12].

Мета роботи. Методом скінчених елементів змоделювати напружений стан та побудувати криві втоми пластин із деформаційно зміцненими отворами за циклічного навантаження з урахуванням кінетики залишкових технологічних напружень.

Методика дослідження. Досліджували вплив дорнування отворів діаметром 8 мм, 10 мм та 12 мм в пластинах із алюмінієвого сплаву Д16чТ товщиною $t=6$ мм та шириною робочої ділянки 60 мм на локальний напружений стан за циклічного пружно-пластичного деформування. Креслення зразків і дорна, а також методика дорнування детально описана в праці [4].

Для моделювання НДС отвору використовували програмний комплекс нелінійної динаміки ANSYS Explicit Dynamics. Для опису істинної діаграми пружно-пластичного деформування сплаву Д16чТ використано модель Steinberg Guinan Strength. Параметри діаграми подані в праці [4]. Діаграма деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ отримана експериментально та за допомогою моделі Steinberg Guinan Strength зображена на рис. 1. Для розрахунку НДС в околі функціонального отвору після дорнування з різним відносним натягом та циклічного навантажування побудовано скінчено-елементну модель чверті досліджуваного плоского зразка з центральним отвором.

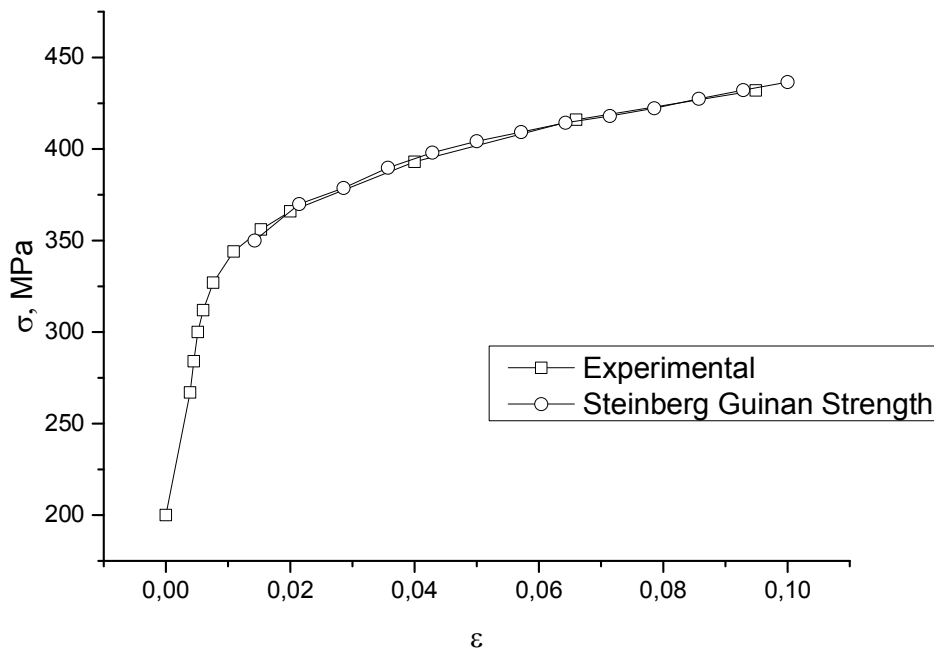


Рисунок 1. Діаграма пружно-пластичного деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ.

Для побудови сітки використовували елемент Solid95, який має властивості повзучості, пластичності та враховує зміну жорсткості при навантаженні, значні переміщення та деформації.

Зусилля прикладали до однієї поверхні краю моделі зразка, а іншу поверхню фіксували і обмежували її вертикальне переміщення (вздовж напрямку прикладання сили).

НДС аналізували за локальними максимальними напруженнями σ_{yy}^{max} , мінімальними напруженнями σ_{yy}^{min} , а також за локальним розмахом напружень $\Delta\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{min} - \sigma_{yy}^{max}$.

Розглядали циклічне пружно-пластичне деформування розтягом пластини з центральним отвором із алюмінієвого сплаву Д16чТ в умовах м'якого навантаження за коефіцієнту асиметрії циклу навантаження $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0$ тут $\sigma_{min} = 0$ та $\sigma_{max} = 147$ МПа відповідно найменше і найбільше номінальне напруження. Характеристики механічних властивостей сплаву Д16чТ за кімнатної температури: умовна границя текучості – $\sigma_{0,2} = 300$ МПа ; тимчасовий опір руйнуванню – $\sigma_B = 430$ МПа [4].

Будували залежності довговічності до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм від локальних напружень (σ_{yy}) та розмаху локальних

напружень ($\Delta\sigma_{yy}$), розрахованих методом скінчених елементів.

Результати дослідження та їх обговорення. На рисунку 2 схематично зображено чверть робочої ділянки зразка з отвором та показано напрямок та область прикладання навантаження.

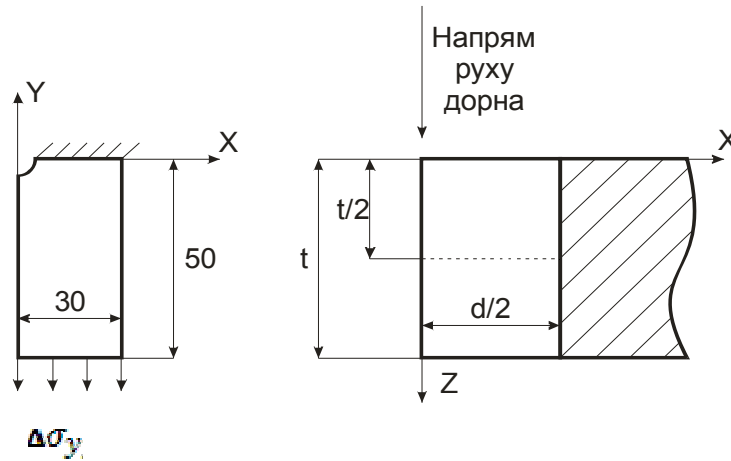


Рисунок 2. Схематичне креслення чверті робочої ділянки зразка.

На даній моделі досліджено НДС в околі отвору при циклічному навантажуванні, локальні напруження розраховані методом скінчених елементів (σ_{yy}) напруження на циліндричній поверхні отвору ($x = d/2$) на поверхні зразка з боку входу дорна ($z = 0$) та середній частині ($z = t/2$).

На рисунку 3 зображено залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах з отвором від локальних максимальних напружень σ_{yy} в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та натягів дорнування $i=0\%...3\%$ на поверхні зразка з боку входу дорна ($z = 0$) для другого півциклу навантаження.

На рисунку 4 зображено залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у пластинах з отвором від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм, 10 мм та натягів дорнування $i=0\%...3\%$ на поверхні зразка з боку входу дорна ($z = 0$) для другого півциклу навантаження.

З рисунків 3, 4 слідує, що максимальні локальні напруження та розмах локальних напружень знижується із підвищенням натягу дорнування. Довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм від отвору діаметром 8 мм та 10 мм підвищується у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин з отворами.

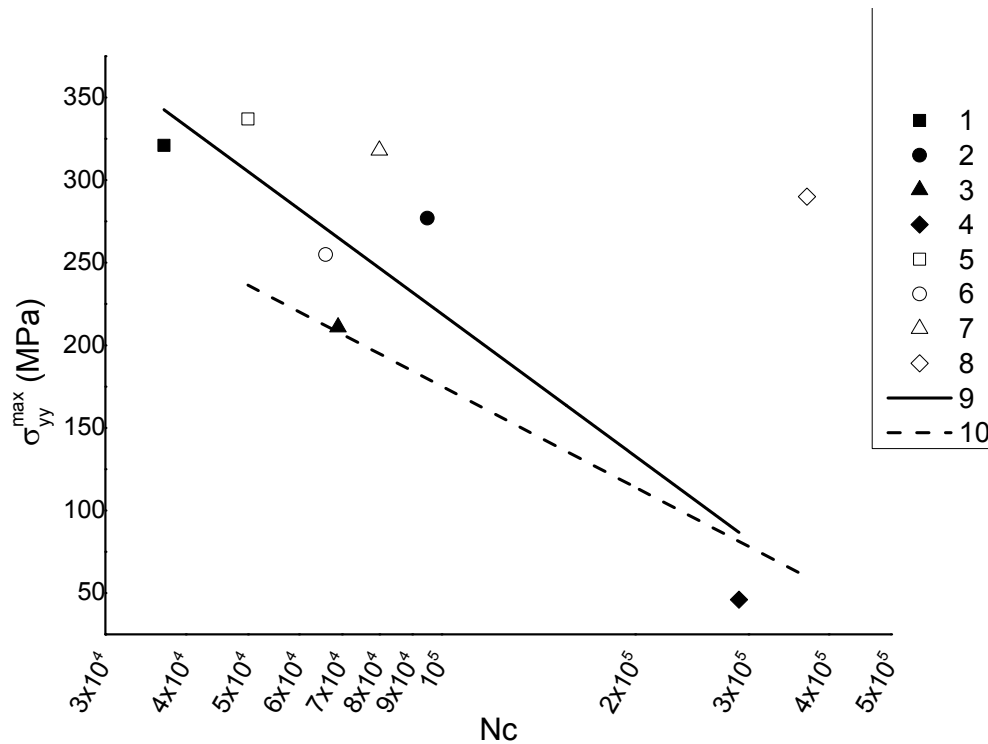


Рисунок 3. Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від максимальних напружень σ_{yy}^{\max} в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4) та 10 мм (5-8) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

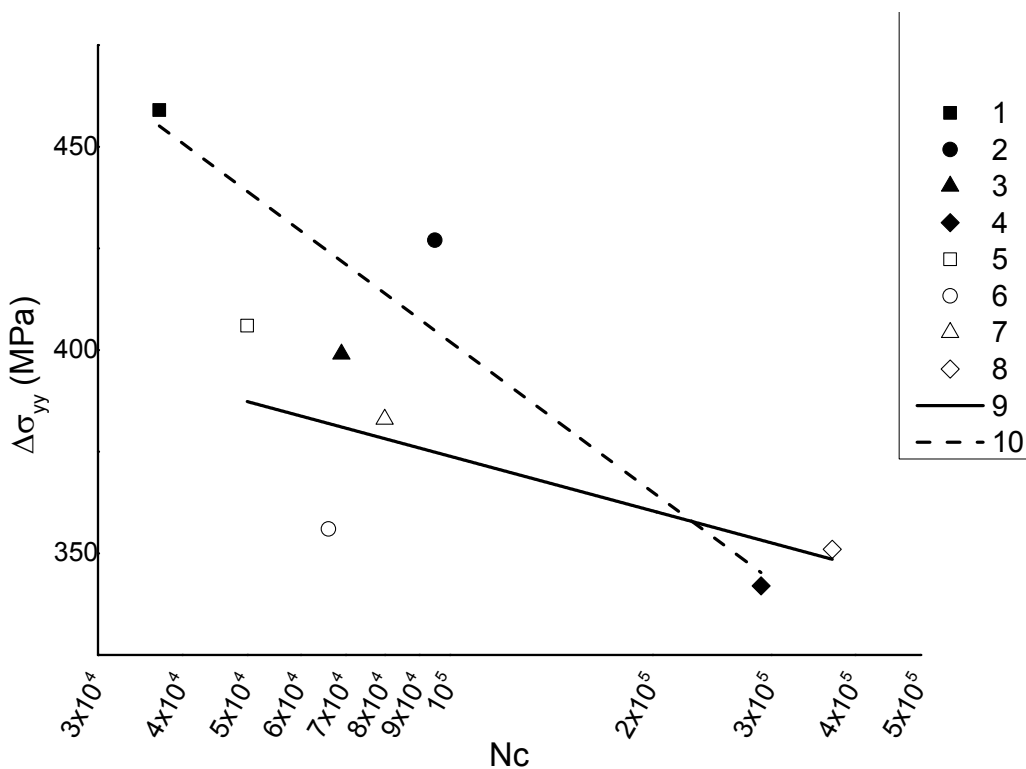


Рисунок 4. Залежність кількості циклів до зародження втомної тріщини (довжиною 0,25 мм) на поверхні зразка ($Z = 0$) у пластинах з отвором від розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (1-4) та 10 мм (5-8) за натягу дорнування 0%(1,5), 1%(2,6), 2%(3,7), 3%(4,8)

Аналогічна залежність спостерігається для дорнування з натягом $i=2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i=3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з отворами.

Висновки.

Методом скінчених елементів з використанням програмного модуля ANSYS обчислено найбільші і найменші локальні напруження за циклічного пружно-пластичного деформування розтягом алюмінієвих пластини з центральним отвором діаметром 8 мм, 10 мм після дорнування з натягом 1%, 2%, 3%.

Отримано залежності кількості циклів до зародження втомної тріщини в алюмінієвих зразках від локальних максимальних напружень σ_{zz} та розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{zz}$ в околі функціонального отвору діаметром 8 мм та 10 мм. Дорнування з натягом $i=1\%$ підвищує довговічність пластин до зародження втомної тріщини довжиною 0,25 мм у 1,5-3 разів проти недорнованих пластин. Аналогічна залежність спостерігається для дорнування з натягом $i=2\%$. З подальшим підвищенням натягу дорнування (до $i=3\%$) довговічність до зародження втомної тріщини підвищується у 7-10 разів проти недорнованих пластин з отворами.

Література

1. Pasta S. Fatigue crack propagation from a cold-worked hole. // Engineering Fracture Mechanics – 2007. – №74. – P. 1525-1538.
2. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново, 2009. – 64 с.
3. Ясній П.В., Гладьо С.В., Сорочак А.П. Дослідження мікромеханізмів руйнування алюмінієвого сплаву Д16чТ після поверхневого зміцнення // Машинознавство.– 2013. – №3-4. – С. 16-19.
4. Ясній П., Гладьо С. Вплив дорнування отворів на зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві // Вісник

Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2014. – № 1. – С. 7-17.

5. Troshchenko V.T., Yasnii P.V., Pokrovskii V.V., Timofeev B.T., Fedorova V.A. Effect of single plastic prestraining on crack resistance. 1. The rate of fatigue crack growth in heat-resistant steel // *Strength of Materials*. – 1988.– 20 (12), pp. 1552-1558.

6. P.F.P. de Matos, A.J. McEvily, P.M.G.P. Moreira, P.M.S.T. de Castro. Analysis of the effect of cold-working of rivet holes on the fatigue life of an aluminum alloy // *International Journal of Fatigue*.– 2007.– 29 .– pp. 575–586.

7. Pasta S. Fatigue crack propagation from a cold-worked hole // *Engineering Fracture Mechanics*, 74 (2007), pp. 1525–1538.

8. Ясній П., Гладьо С. Вплив дорнування отворів на кінетику зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві Д16чТ // *Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя: Том II. – "Матеріалознавство та машинобудування" – Тернопіль, 20-21 листопада, 2013. – С. 83.*

9. H.D. Gopalakrishna, H.N. Narasimha Murthy, M. Krishna, M.S. Vinod, A.V. Suresh. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study. // *Engineering Failure Analysis*. – 2010. – №17. P. 361-368.

10. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

11. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: Ленанд, 2008. – 456 с.

12. Дашченко А.Ф. Ansys в задачах инженерной механики / А.Ф. Дашченко, Д.В. Лазарева, Н.Г. Сурьянинов. – Одесса: Астропринт, 2007. – 488 с.

Petro Yasniy, Sergii Glado, Viktor Skochylyas, Oleksandr Semenets

**INFLUENCE OF FUNCTIONAL HOLES BURNISHING
PARAMETERS ON THE FATIGUE LIFE OF A CONSTRUCTIVE
ELEMENT OF AIRCRAFT WING**

The paper deals with the calculation of uniaxial elastic-plastic deformation of the plate with a central holes after burnishing using the finite element method. The dependences of number of cycles fatigue crack initiation (length 0,25 mm) in samples on nominal and local normal stresses near the functional hole were obtained.

Keywords: *aluminium alloy, hole burnishing, monaxonic cyclic loading, fatigue curves.*

УДК 539.3

Михайло Михайлишин**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В РОЛИКАХ МАШИН
БЕЗПЕРЕРВНОЇ РОЗЛИВКИ СТАЛІ**

Досліджено температурний стан в довгому ролику, який використовується в машинах безперервної розливки сталі для лиття плоских заготовок. Отримано аналітичний розв'язок задачі, який дозволяє досліджувати температурні поля, що виникають в роликах в процесі їх експлуатації.

Ключові слова: *машини безперервної розливки сталі, температурні поля.*

Розглянемо задачу визначення температурного стану в довгому ролику, який використовується в МБРС для лиття широких плоских заготовок. В якості розрахункової схеми ролика приймемо порожнистий довгий циліндр, який обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо своєї осі й знаходиться під дією незмінної вздовж цієї осі неосесиметричної теплової дії. В такому випадку можна вважати поле температур плоским.

Зв'яжемо з поперечним перерізом ролика полярну систему координат (r, θ) з центром на осі ролика (рис. 1). Вважаємо, що кут θ відраховується в напрямку обертання ролика від променя, який в початковий момент часу проходить через середину зони контакту ролика зі злитком.

Введемо також нерухому систему координат (r, φ) з центром на осі ролика, причому

$$\varphi = \theta + \omega\tau. \quad (1)$$

З представлення (1) бачимо, що якщо $\theta = -\omega\tau$, то це відповідає точкам, які лежать завжди на промені, що проходить через середину зони контакту ролика зі злитком. Таким чином, в нерухомій системі координат на цьому промені маємо $\varphi = 0$.

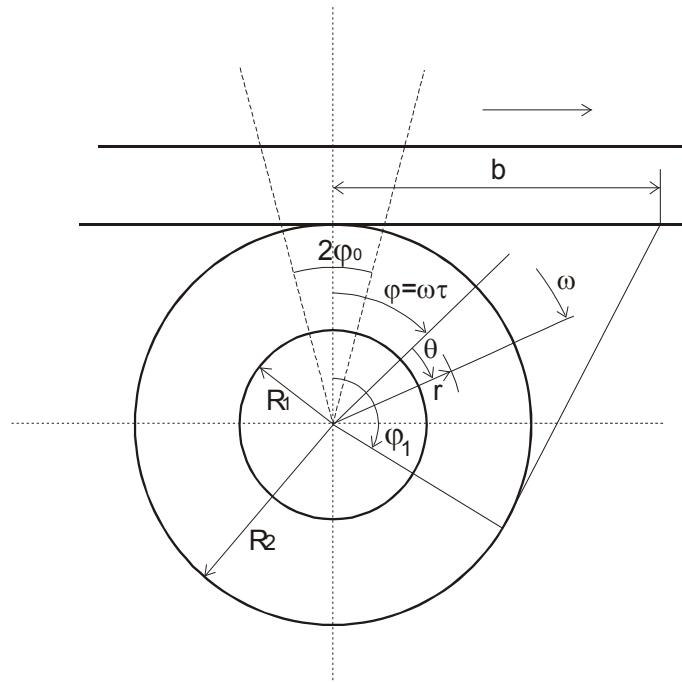


Рисунок 1. Полярна система координат, зв'язана з поперечним перерізом ролика

Розподіл температури в ролику в прийнятих допущеннях описується рівнянням

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right). \quad (2)$$

Якщо ввести заміну (1) і позначити $T(r, \theta, t) = \theta(r, \varphi, t)$, то рівняння (2) перепишеться так

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \omega \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \right). \quad (3)$$

У випадку, коли ролик обертається достатньо довго при незмінних умовах теплообміну, то відносно нерухомої системи координат температурний стан буде квазістаціонарним. Тоді задача визначення розподілу температури $\theta(r, \varphi)$ зводиться до розв'язання такого рівняння

$$\omega \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \right). \quad (4)$$

На границях ролика теплообмін із зовнішнім середовищем будемо задавати граничними умовами III-го роду. В зоні контакту $|\varphi| \leq \varphi_0$, $r = R_2$ до ролика підводиться тепловий потік за рахунок контактного теплообміну. Його густина

$$q_k(\varphi) = \alpha_k [T_{zn} - \theta(R_2, \varphi)], \quad (5)$$

де α_k – термічна провідність контакту, T_{zn} – температура поверхні злитка в зоні контакту. На решті поверхні ролика $r = R_2$ здійснюється конвективний теплообмін із зовнішнім середовищем. Густина теплового потоку, що підводиться при цьому до поверхні ролика, така:

$$q_2(\varphi) = \alpha_2 [T_3 - \theta(R_2, \varphi)], \quad (6)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі на цій поверхні, T_3 – температура зовнішнього середовища. На практиці використовуються різні умови охолодження як зовнішньої так і внутрішньої поверхонь ролика. Найчастіше використовується повітряне або водяне охолодження. Будемо надалі вважати, що ця різниця враховується лише величиною коефіцієнта тепловіддачі, який позначимо α_2'' – для повітряного охолодження і α_2^e – для водяного.

Крім контактного і конвективного теплообміну між частиною зовнішньої поверхні ролика і злитком здійснюється променевий теплообмін. Будемо вважати, що коефіцієнти випромінювання поверхні ролика і поверхні злитка однакові і густина променевого теплового потоку, що підводиться до зовнішньої поверхні ролика, визначається так

$$q_{np} = \varepsilon \sigma_0 F(\varphi) [T_{zn}^4 - \theta^4(R_2, \varphi)], \quad (7)$$

де $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ – стала Стефана-Больцмана, ε – коефіцієнт випромінювання поверхонь, $F(\varphi)$ – кутовий коефіцієнт випромінювання, який залежить від взаємного розміщення випромінюваних поверхонь і відстані між ними.

На внутрішній поверхні ролика ($r = R_1$) відбувається також конвективний теплообмін, причому густина теплового потоку, який відводиться від цієї поверхні, дорівнює

$$q_1 = \alpha_1 [\theta(R_1, \varphi) - T_6]. \quad (8)$$

Тут α_1 – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні, причому його значення дорівнює α_1'' чи α_1^e в залежності від того, яке охолодження там використовується – повітряне чи водяне; T_6 – температура внутрішнього середовища.

Променевий теплообмін справедливий для деякої області поверхні $r=R_2$, яка залежить від довжини ділянки злитка b (рис. 1), з якою відбувається променевий теплообмін ролика і яка визначається за формулою

$$\varphi_0 \leq |\varphi| \leq \varphi_1, \quad (9)$$

де

$$\varphi_1 = 2 \operatorname{arctg} \frac{b}{R_2}. \quad (10)$$

Внаслідок нелінійності граничної умови (7) надзвичайно важко (а в більшості випадків і неможливо) знайти аналітичний розв'язок задачі. Є два способи спрощення цієї задачі [1]. Перший спосіб використовується тоді, коли T_{3l} у формулі (7) велика порівняно з температурою поверхні для розглядуваного періоду часу. Тоді можна знехтувати $\theta^4(R_2, \varphi)$ порівняно з T_{3l}^4 . Так, наприклад, якщо $\theta(R_2, \varphi) \leq 0,5 T_{3l}$, то

$$T_{3l}^4 - \theta^4(R_2, \varphi) = T_{3l}^4 (1 - (0,5)^4) = T_{3l}^4 (1 - 0,0625) \approx 0,94 T_{3l}^4. \quad (11)$$

В нашому випадку для цієї зони, де справедливий променевий теплообмін, це дійсно має місце. При охолодженні зовнішньої поверхні ролика водою максимальне значення температури досягається на поверхні ролика в зоні безпосереднього його контакту зі злитком і при цьому в цій зоні $\theta(R_2, \varphi) \approx (0,5 - 0,6) T_{3l}$. Для зони променевого теплообміну температура поверхні ролика ще нижча.

Другий випадок має місце тоді, коли ні одна з температур в формулі (7) не змінюється в дуже широких межах. Тоді множник в квадратних дужках правої частини формули (7) розкладається на множники

$$\varepsilon \sigma_0 F(\varphi) [T_{3l}^4 - \theta^4(R_2, \varphi)] = \varepsilon \sigma_0 F(\varphi) (T_{3l}^3 + T_{3l}^2 \theta + T_{3l} \theta^2 + \theta^3) (T_{3l} - \theta). \quad (12)$$

Якщо температура джерела і поверхні не зазнають значних змін, то коефіцієнт при $(T_{3l} - \theta)$ можна вважати постійним і рівним

$$\varepsilon \sigma_0 (T_{3l}^3 + T_{3l}^2 \theta + T_{3l} \theta^2 + \theta^3) = h_r. \quad (13)$$

Цей коефіцієнт часто називають коефіцієнтом теплообміну при випромінюванні. Зауважимо також, що у формулі (7) під $\theta(r_2, \varphi)$ і T_{3l}

розуміються абсолютні температури. Так як абсолютна і відносна температури зв'язані співвідношенням

$$\theta(K) = T(^{\circ}C) + 273,$$

то в умові (10) можна вважати, що в множнику $(T_{3n} - \theta)$ температури вимірюються в градусах Цельсія. Тоді з врахуванням (11) бачимо, що гранична умова для променевого теплообміну запишеться у вигляді, подібному до конвективного, тобто

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = h_r F(\varphi) [T_{3n} - \theta(r_2, \varphi)], \quad r = R_2. \quad (14)$$

Для запису граничної умови на поверхні $r = R_2$ використаємо асиметричні одиничні функції

$$S_{\pm}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0,5 \mp 0,5, & x = 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (15)$$

Тоді у випадку першої апроксимації нелінійної умови (7) закон теплообміну запишеться так

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = & \alpha_n [S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0)] [T_{3n} - \theta(r, \varphi)] + \alpha_2 [T_{306} - \theta(r, \varphi)] + \\ & + \varepsilon \sigma_0 F(\varphi) T_{3n}^4 \cdot [S_-(\varphi + \varphi_1) - S_+(\varphi - \varphi_1)], \quad r = R_2. \end{aligned} \quad (16)$$

В другому випадку маємо

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = & \alpha_n [S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0)] [T_{3n} - \theta(R_2, \varphi)] + \alpha_2 [T_{306} - \theta(R_2, \varphi)] + \\ & + F(\varphi) h_r [S_-(\varphi + \varphi_1) - S_+(\varphi - \varphi_1)] [T_{3n} - \theta(R_2, \varphi)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Зауважимо, що ми припустили, що конвективний і променевий теплообмін мають місце також і в зоні контакту. Це зв'язано з тим, що область контакту дуже мала і в цій області тепловий потік за рахунок контакту значно перевищує теплові потоки променевого і конвективного теплообміну. Виключення цієї області для променевого і конвективного теплообміну привело б до значного ускладнення математичного опису і, в результаті, до втрати точності.

Крім граничних умов, функція розподілу температури повинна також задовольняти умовам періодичності

$$\theta(r, \varphi) = \theta(r, \varphi + 2\pi); \quad \frac{\partial \theta(r, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial \theta(r, \varphi + 2\pi)}{\partial \varphi}. \quad (18)$$

Враховуючи ці умови, представимо розв'язок рівняння (4) у вигляді

$$\theta(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} [\theta_{n1}(r) \cos n\varphi + \theta_{n2}(r) \sin n\varphi]. \quad (19)$$

Підставимо розв'язок (19) в рівняння (4). Порівнюючи коефіцієнти при однакових функціях $\cos n\varphi$ і $\sin n\varphi$ знайдемо рівняння для визначення $\theta_{n1}(r)$, $\theta_{n2}(r)$:

$$\frac{d^2\theta_{01}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta_{01}}{dr} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{d^2\theta_{n1}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta_{n1}}{dr} - \frac{n^2}{r^2} \theta_{n1} = \frac{\omega n}{a} \theta_{n2}, \quad (21)$$

$$\frac{d^2\theta_{n2}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta_{n2}}{dr} - \frac{n^2}{r^2} \theta_{n2} = -\frac{\omega n}{a} \theta_{n1}. \quad (22)$$

Загальний розв'язок рівняння (20) такий

$$\theta_{01} = C_{01} + C_{02} \ln r. \quad (23)$$

Якщо підставити значення θ_{n2} (21) у (22), знайдемо рівняння для знаходження θ_{n1}

$$r^4 \frac{d^4\theta_{n1}}{dr^4} + 2r^3 \frac{d^3\theta_{n1}}{dr^3} - (1 + 2n^2) \left(r^2 \frac{d^2\theta_{n1}}{dr^2} - r \frac{d\theta_{n1}}{dr} \right) + n^2 \left[(n^2 - 4) + r^4 \frac{\omega^2}{a^2} \right] \theta_{n1} = 0. \quad (24)$$

Аналогічне рівняння отримаємо для знаходження θ_{n2} , якщо підставимо значення θ_{n1} з (22) у формулу (21).

Введемо заміну

$$x = \sqrt{\frac{\omega n}{a}} r = \beta_n r. \quad (25)$$

Тоді рівняння (24) перепишеться так

$$x^4 \theta_{n1}^{IV} + 2x^3 \theta_{n1}^{III} - (1 + 2n^2) (x^2 \theta_{n1}^{II} - x \theta_{n1}^I) + (n^4 - 4n^2 + x^4) \theta_{n1} = 0, \quad (26)$$

де верхніми індексами позначені похідні по змінній x .

Загальний розв'язок рівняння (26) має вигляд [2]

$$\theta_{n1}(r) = C_{n1} \text{ber}_n(\beta_n r) + C_{n2} \text{bei}_n(\beta_n r) + C_{n3} \text{ker}_n(\beta_n r) + C_{n4} \text{kei}_n(\beta_n r), \quad (27)$$

де ber_n , bei_n , ker_n , kei_n – функції Кельвіна, n – натуральні числа.

Підставивши вираз для $\theta_{n1}(r)$ в рівняння (21), знайдемо

$$\theta_{n2}(r) = -C_{n1} \text{bei}_n(\beta_n r) + C_{n2} \text{ber}_n(\beta_n r) - C_{n3} \text{kei}_n(\beta_n r) + C_{n4} \text{ker}_n(\beta_n r). \quad (28)$$

Константи $C_{n1}, C_{n2}, C_{n3}, C_{n4}$ знаходимо з граничних умов (8) і (16) або (17). Задоволимо умову (8). В результаті отримаємо такі рівняння

$$-\frac{\alpha_1}{\lambda} C_{01} + C_{02} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{\alpha_1}{\lambda} \ln R_1 \right) = -\frac{\alpha_1}{\lambda} T_{\epsilon}, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & C_{n1} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) ber_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_1) + ber_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] + \\ & + C_{n2} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) bei_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_1) - ber_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] + \\ & + C_{n3} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) ker_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_1) + ker_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] + \\ & + C_{n4} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) kei_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_1) - ker_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] = 0, \\ & C_{n1} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) bei_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_1) - ber_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] - \\ & - C_{n2} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) ber_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_1) + ber_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] + \\ & + C_{n3} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) kei_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_1) - ker_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] - \\ & - C_{n4} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{n}{R_1} \right) ker_n(\beta_n R_1) + \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_1) + ker_{n-1}(\beta_n R_1)) \right] = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Для того, щоб задовольнити граничну умову (16), представимо її у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\alpha_2}{\lambda} \theta &= \frac{\alpha_k}{\lambda} [S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0)] (T_{3z} - \theta) + \frac{\alpha_2}{\lambda} T_{30\epsilon} + \\ & + \frac{\epsilon \sigma_0}{\lambda} F(\varphi) T_{3z}^4 [S_-(\varphi + \varphi_1) - S_+(\varphi - \varphi_1)], \quad r = R_2. \end{aligned} \quad (31)$$

Розкладемо всі функції від φ в правій частині в ряди Фур'є:

$$\frac{\alpha_k}{\lambda} [S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0)] T_{3z} = \frac{\alpha_k}{\lambda} T_{3z} \left[\frac{\varphi_0}{\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\varphi_0}{n} \cos n\varphi \right], \quad (32)$$

$$\frac{\epsilon \sigma_0 T_{3z}^4}{\lambda} F(\varphi) [S_-(\varphi + \varphi_1) - S_+(\varphi - \varphi_1)] T_{3z} = \frac{\epsilon \sigma_0 T_{3z}^4}{\lambda} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi) \right], \quad (33)$$

де позначено

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\varphi_1}^{\varphi_1} F(\varphi) d\varphi; \quad a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\varphi_1}^{\varphi_1} F(\varphi) \cos n\varphi d\varphi; \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\varphi_1}^{\varphi_1} F(\varphi) \sin n\varphi d\varphi. \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\alpha_k}{\lambda} [S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0)] \theta(R_2, \varphi) = \\
& = -\frac{\alpha_k}{\lambda} [S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0)] \left\{ C_{01} + C_{02} \ln R_2 + \sum_{k=1}^{\infty} [\theta_{k1}(R_2) \cos k\varphi + \theta_{k2}(R_2) \sin k\varphi] \right\} = \\
& = -\frac{\alpha_k}{\lambda} (C_{01} + C_{02} \ln R_2) \left[\frac{\varphi_0}{\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n\varphi_0}{n} \cos n\varphi \right] - \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\varphi_0}{k} \theta_{k1}(R_2) + \right. \\
& \quad + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{k=1}^{\infty} \theta_{k1}(R_2) \left[\frac{\sin(k+n)\varphi_0}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\varphi_0}{k-n} \right] \cos n\varphi + \right. \\
& \quad \left. \left. + \sum_{k=1}^{\infty} \theta_{k2}(R_2) \left[\frac{\sin(k-n)\varphi_0}{k-n} - \frac{\sin(k+n)\varphi_0}{k+n} \right] \sin n\varphi \right] \right\}. \tag{35}
\end{aligned}$$

Підставляючи знайдені розклади в (31) і прирівнюючи коефіцієнти при однакових функціях φ зліва і справа, знайдемо

$$\begin{aligned}
& C_{01} \frac{1}{\lambda} \left(\alpha_2 - \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} \right) + C_{02} \left[\frac{1}{R_2} + \frac{\ln R_2}{\lambda} \left(\alpha_2 - \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} \right) \right] = \\
& = \frac{1}{\lambda} \left\{ \alpha_2 \Gamma_{306} + \Gamma_{37} \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} + \frac{a_0}{2} \varepsilon \sigma_0 \Gamma_{37}^4 - \frac{\alpha_k}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\varphi_0}{k} \theta_{k1}(R_2) \right\}, \tag{36} \\
& C_{n1} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) ber_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_2) + ber_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] + \\
& + C_{n2} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) bei_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_2) - ber_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] + \\
& + C_{n3} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) ker_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_2) + ker_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] + \\
& + C_{n4} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) kei_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_2) - ker_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] = \\
& = -\frac{2\alpha_k}{\lambda\pi} (C_{01} + C_{02} \ln R_2) \frac{\sin n\varphi}{n} + \frac{2\alpha_k}{\lambda\pi} \Gamma_{37} \frac{\sin n\varphi_0}{n} + \frac{\varepsilon\sigma_0}{\lambda} \Gamma_{37}^4 a_n - \\
& - \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left[C_{k1} ber_k(\beta_k R_2) + C_{k2} bei_k(\beta_k R_2) + C_{k3} ker_k(\beta_k R_2) + \right. \\
& \quad \left. + C_{k4} kei_k(\beta_k R_2) \right] \left[\frac{\sin(k+n)\varphi_0}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\varphi_0}{k-n} \right] - \\
& - C_{n1} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) bei_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_2) - ber_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] + \tag{37} \\
& + C_{n2} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) ber_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (bei_{n-1}(\beta_n R_2) + ber_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -C_{n3} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) kei_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_2) - ker_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] + \\
 & + C_{n4} \left[\left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) ker_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} (kei_{n-1}(\beta_n R_2) + ker_{n-1}(\beta_n R_2)) \right] = \\
 & = \frac{\varepsilon \sigma_0}{\lambda} T_{3l}^4 b_n - \frac{\alpha_k}{\lambda \pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left[-C_{k1} bei_k(\beta_k R_2) + C_{k2} ber_k(\beta_k R_2) - \right. \\
 & \left. - C_{k3} kei_k(\beta_k R_2) + C_{k4} ker_k(\beta_k R_2) \right] \left[\frac{\sin(k-n)\varphi_0}{k-n} - \frac{\sin(k+n)\varphi_0}{k+n} \right].
 \end{aligned}$$

Система рівнянь (29), (30), (36), (37) складає повну систему рівнянь для знаходження всіх невідомих коефіцієнтів $C_{01}, C_{02}, C_{n1}, C_{n2}, C_{n3}, C_{n4}$ при $n=1, 2, \dots$. Зауважимо, що в праві частини рівнянь (36) і (37) входять всі невідомі для $n=1, 2, \dots$. Якщо обмежитись в розкладі (19) деякою обмеженою кількістю членів, наприклад $n=0, 1, \dots, N$, то для знаходження $4N$ невідомих $C_{n1}, C_{n2}, C_{n3}, C_{n4}$ при $n=1, 2, \dots, N$ можна отримати систему $4N$ рівнянь. Для цього розв'яжемо систему рівнянь (29), (36) відносно C_{01} і C_{02} . Знайдемо

$$\begin{aligned}
 C_{02} = \frac{1}{\nu} \left\{ \alpha_2 (T_{306} - T_\sigma) + \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} (T_{3l} + T_\sigma) + \frac{a_0}{2} \varepsilon \sigma_0 T_{3l}^4 - \right. \\
 \left. - \frac{\alpha_k}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k \varphi_0}{k} [C_{k1} ber_k(\beta_k R_2) + C_{k2} bei_k(\beta_k R_2) + C_{k3} ker_k(\beta_k R_2) + C_{k4} kei_k(\beta_k R_2)] \right\}, \quad (38)
 \end{aligned}$$

$$C_{01} = T_\sigma + C_{02} \left(\frac{\lambda}{\alpha_1 R_1} - \ln R_1 \right), \quad (39)$$

де введені позначення

$$\nu = \frac{\lambda}{R_2} + \mu \left(\alpha_2 - \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} \right); \quad \mu = \frac{\lambda}{\alpha_1 R_1} + \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (40)$$

Якщо підставити вирази для C_{01} і C_{02} в праву частину першого рівняння (37), то вона переписеться так

$$\begin{aligned}
 & - \frac{2\alpha_k}{\lambda \pi} \frac{\sin n \varphi_0}{n} \left\{ T_\sigma - T_{3l} + \frac{\mu}{\nu} \left[\alpha_2 (T_{306} - T_\sigma) + \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} (T_\sigma + T_{3l}) + \frac{a_0}{2} \varepsilon \sigma_0 T_{3l}^4 \right] \right\} + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\lambda} T_{3l}^4 a_n - \\
 & - \frac{\alpha_k}{\lambda \pi} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_{nk} [C_{k1} ber_k(\beta_k R_2) + C_{k2} bei_k(\beta_k R_2) + C_{k3} ker_k(\beta_k R_2) + C_{k4} kei_k(\beta_k R_2)] \right\}, \quad (41)
 \end{aligned}$$

де позначено

$$\gamma_{nk} = -\frac{2\mu\alpha_k \sin n\varphi_0 \sin k\varphi_0}{\nu\pi nk} + \frac{\sin(k+n)\varphi_0}{k+n} + \frac{\sin(k-n)\varphi_0}{k-n},$$

$$\gamma_{kk} = -\frac{2\mu\alpha_k \sin^2 k\varphi_0}{\nu\pi k^2} + \frac{\sin 2k\varphi_0}{2k} + \varphi_0.$$

Переносячи всі члени з невідомими коефіцієнтами в ліву частину рівняння при всіх значеннях n (аналогічно і в другому рівнянні (37) при всіх n), отримуємо систему рівнянь в звичайній формі для знаходження всіх $4N$ невідомих.

Введемо позначення

$$C_j = \begin{pmatrix} C_{j1} \\ C_{j2} \\ C_{j3} \\ C_{j4} \end{pmatrix}; \quad A_j = \begin{pmatrix} a_1^{(j)} \\ a_2^{(j)} \\ a_3^{(j)} \\ a_4^{(j)} \end{pmatrix}; \quad B_j = \begin{pmatrix} b_1^{(j)} \\ b_2^{(j)} \\ b_3^{(j)} \\ b_4^{(j)} \end{pmatrix}, \quad (43)$$

де

$$\begin{aligned} a_1^{(j)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) ber_j(\beta_j R_1) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [bei_{j-1}(\beta_j R_1) + ber_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ a_2^{(j)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) bei_j(\beta_j R_1) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [bei_{j-1}(\beta_j R_1) - ber_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ a_3^{(j)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) ker_j(\beta_j R_1) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [kei_{j-1}(\beta_j R_1) + ker_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ a_4^{(j)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) kei_j(\beta_j R_1) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [kei_{j-1}(\beta_j R_1) - ker_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ b_1^{(j)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) bei_j(\beta_j R_1) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [bei_{j-1}(\beta_j R_1) - ber_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ b_2^{(j)} &= -\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) ber_j(\beta_j R_1) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [bei_{j-1}(\beta_j R_1) + ber_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ b_3^{(j)} &= \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) kei_j(\beta_j R_1) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [kei_{j-1}(\beta_j R_1) - ker_{j-1}(\beta_j R_1)], \\ b_4^{(j)} &= -\left(\frac{\alpha_1}{\lambda} + \frac{j}{R_1} \right) ker_j(\beta_j R_1) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [kei_{j-1}(\beta_j R_1) + ker_{j-1}(\beta_j R_1)]. \end{aligned} \quad (44)$$

Тоді система рівнянь (30) запишеться так

$$C_j^T \cdot A_j = 0, \quad C_j^T \cdot B_j = 0, \quad j=1,2,\dots,N. \quad (45)$$

Аналогічно введемо наступні позначення

$$D_{jk} = \begin{pmatrix} d_1^{(jk)} \\ d_2^{(jk)} \\ d_3^{(jk)} \\ d_4^{(jk)} \end{pmatrix}; \quad E_{jk} = \begin{pmatrix} e_1^{(jk)} \\ e_2^{(jk)} \\ e_3^{(jk)} \\ e_4^{(jk)} \end{pmatrix}, \quad (46)$$

$$F_j = -\frac{2\alpha_k \sin j\varphi_0}{\lambda\pi} \frac{1}{j} \left\{ T_\epsilon - T_{3\pi} + \frac{\mu}{\nu} \left[\alpha_2 (T_{30\epsilon} - T_\epsilon) + \frac{\alpha_k \varphi_0}{\pi} (T_\epsilon + T_{3\pi}) + \frac{a_0}{2} \varepsilon \sigma_0 T_{3\pi}^4 \right] \right\} + \frac{\varepsilon \sigma_0}{\lambda} T_{3\pi} a_j, \quad (47)$$

$$G_j = \frac{\varepsilon \sigma_0}{\lambda} T_{3\pi}^4 b_j, \quad (48)$$

$$d_1^{(jk)} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk} \text{ber}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ \left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{ber}_j(\beta_j R_2) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{bei}_{j-1}(\beta_j R_2) + \text{ber}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases}$$

$$d_2^{(jk)} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk} \text{bei}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ \left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{bei}_j(\beta_j R_2) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{bei}_{j-1}(\beta_j R_2) - \text{ber}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases} \quad (49)$$

$$d_3^{(jk)} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk} \text{ker}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ \left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{ker}_j(\beta_j R_2) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{kei}_{j-1}(\beta_j R_2) + \text{ker}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases}$$

$$d_4^{(jk)} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk} \text{kei}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ \left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{kei}_j(\beta_j R_2) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{kei}_{j-1}(\beta_j R_2) - \text{ker}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases}$$

$$e_1^{(jk)} = \begin{cases} -\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk}^{(0)} \text{bei}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ -\left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj}^{(0)} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{bei}_j(\beta_j R_2) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{bei}_{j-1}(\beta_j R_2) - \text{ber}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases}$$

$$e_2^{(jk)} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk}^{(0)} \text{ber}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ \left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj}^{(0)} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{ber}_j(\beta_j R_2) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{bei}_{j-1}(\beta_j R_2) + \text{ber}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases} \quad (50)$$

$$e_3^{(jk)} = \begin{cases} -\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk}^{(0)} \text{kei}_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ -\left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj}^{(0)} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \text{kei}_j(\beta_j R_2) + \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} [\text{kei}_{j-1}(\beta_j R_2) - \text{ker}_{j-1}(\beta_j R_2)], & k = j, \end{cases}$$

$$e_4^{(jk)} = \begin{cases} \frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jk}^{(0)} \ker_k(\beta_k R_2), & k \neq j \\ \left(\frac{\alpha_k}{\lambda\pi} \gamma_{jj}^{(0)} + \frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{j}{R_2} \right) \ker_j(\beta_j R_2) - \frac{\beta_j}{\sqrt{2}} \left[\ker_{j-1}(\beta_j R_2) + \ker_{j+1}(\beta_j R_2) \right], & k = j, \end{cases}$$

причому

$$\gamma_{jk}^{(0)} = \begin{cases} \frac{\sin(k-j)\varphi_0}{k-j} - \frac{\sin(k+j)\varphi_0}{k+j}, & k \neq j \\ \varphi_0 - \frac{\sin 2j\varphi_0}{2j}, & k = j. \end{cases} \quad (51)$$

Тоді система рівнянь (37) запишеться у вигляді

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N C_k^T \cdot D_{jk} &= F_j, \\ \sum_{k=1}^N C_k^T \cdot E_{jk} &= G_j, \quad j=1,2,\dots,N. \end{aligned} \quad (52)$$

Таким чином, ми отримали систему $4N$ лінійних алгебраїчних рівнянь відносно $4N$ невідомих $C_{k1}, C_{k2}, C_{k3}, C_{k4}, k=\overline{1, N}$. Ця система значно спроститься, якщо в праву частину граничних умов (16) не будуть входити члени типу $f(\varphi) \cdot \theta(r, \varphi)$. Можна припустити, що в області контакту температура поверхні $r=R_2$ приблизно постійна і прийняти там $T_{3l} - \theta(r, \varphi) \square T_{3l}^{np}$, де T_{3l}^{np} – деяка приведена температура злитку. Тоді гранична умова (16) запишеться так

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} + \alpha_2 \theta &= \alpha_k \left[S_-(\varphi + \varphi_0) - S_+(\varphi - \varphi_0) \right] T_{3l}^{np} + \alpha_2 T_{306} + \\ &+ \varepsilon \sigma_0 F(\varphi) T_{3l}^4 \left[S_-(\varphi + \varphi_1) - S_+(\varphi - \varphi_1) \right], \quad r = R_2. \end{aligned} \quad (53)$$

Проводячи аналогічні перетворення, як і вище, знайдемо N незалежних систем рівнянь для знаходження невідомих $C_{k1}, C_{k2}, C_{k3}, C_{k4}$ при кожному значенні $k=1,2,\dots,N$. Цю систему можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} C_n^T \cdot A_n &= 0, \\ C_n^T \cdot B_n &= 0, \\ C_n^T \cdot A'_n &= F'_n, \\ C_n^T \cdot B'_n &= G'_n, \quad n=1,2,\dots,n, \end{aligned} \quad (54)$$

де додатково позначено

$$A'_n = \begin{pmatrix} a_1^{(n)} \\ a_2^{(n)} \\ a_3^{(n)} \\ a_4^{(n)} \end{pmatrix}; \quad B'_n = \begin{pmatrix} b_1^{(n)} \\ b_2^{(n)} \\ b_3^{(n)} \\ b_4^{(n)} \end{pmatrix}. \quad (55)$$

$$a_1^{(n)} = \left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) ber_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} [bei_{n-1}(\beta_n R_2) + ber_{n-1}(\beta_n R_2)],$$

$$a_2^{(n)} = \left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) bei_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} [bei_{n-1}(\beta_n R_2) - ber_{n-1}(\beta_n R_2)],$$

$$a_3^{(n)} = \left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) ker_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} [kei_{n-1}(\beta_n R_2) + ker_{n-1}(\beta_n R_2)],$$

$$a_4^{(n)} = \left(\frac{\alpha_2}{\lambda} - \frac{n}{R_2} \right) kei_n(\beta_n R_2) - \frac{\beta_n}{\sqrt{2}} [kei_{n-1}(\beta_n R_2) - ker_{n-1}(\beta_n R_2)],$$

$$b_1^{(n)} = -a_2^{(n)}, \quad b_2^{(n)} = a_1^{(n)}, \quad b_3^{(n)} = -a_4^{(n)}, \quad b_4^{(n)} = a_3^{(n)}.$$

Таким чином, отримано аналітичний розв'язок задачі, який дозволяє досліджувати температурні поля, що виникають в роликах МБРС в процесі їх експлуатації в залежності від різних теплофізичних параметрів та умов експлуатації.

Література.

1. Б. Боли и Дж. Уэйнер. Теория температурных напряжений. – М.: МИР, 1964, – 517с.
2. Справ очник по специальным функциям. Под редакцией М. Абрамовича и И. Стиган. – М.: Наука, 1979, – 830с.

Mykhaylo Mykhaylyshyn

**INVESTIGATION OF TEMPERATURE FIELDS IN ROLLERS
OF CONTINUOUS STEEL TEEMING MACHINE**

The temperature state of a long roller of continuous steel teeming machine for planar workpiece teeming is investigated. Analytical solution which allows studying temperature fields in rollers during their service is obtained.

Keywords: *continuous steel teeming machines, temperature fields.*

УДК 539.3

Олег Ясній, Віталій Бревус, Володимир Ясній**ОЦІНКА ГРАНИЧНОГО СТАНУ КОЛЕКТОРА
ПАРОПЕРЕГРІВНИКА ТЕС**

Теплові електростанції (ТЕС) належать до важливих об'єктів, відмови яких можуть призвести до аварій із значними наслідками. Більшість ТЕС в Україні вичерпала свій проектний ресурс, який залежить від стану основних елементів пароводяної системи енергоблоків, що часто мають експлуатаційні пошкодження. Тому важливим завданням є достовірна оцінка граничного стану колекторів пароперегрівників із застосуванням сучасних європейських підходів та врахувавши експлуатаційну деградацію матеріалу.

Ключові слова: колектор пароперегрівача, сталь 12Х1МФ, напружено-деформований стан, термомеханічне навантаження, діаграма оцінювання руйнування.

Теплові електростанції (ТЕС) належать до важливих об'єктів, відмови яких можуть призвести до аварій із значними наслідками. Більшість ТЕС в Україні вичерпала свій проектний ресурс, який залежить від стану основних елементів пароводяної системи енергоблоків [1], що часто мають експлуатаційні пошкодження [2, 3].

В експлуатованому матеріалі колектора на фоні множинного розтріскування, коли довжина більшості тріщин не перевищує 2 мм, виявлено значне локалізоване пошкодження колектора у вигляді частково колової тріщини довжиною 149 мм на внутрішній поверхні і найбільшою глибиною 37,8 мм, яка перетинає всі отвори кріплення патрубків [3]. Тріщини таких розмірів можуть бути причиною раптового руйнування колектора. Тому важливим завданням є оцінювання можливості подальшої експлуатації колектора із наявними дефектами.

Для оцінювання міцності елементів конструкцій застосовують процедуру R6 [4], яка ґрунтується на двопараметричному критерії руйнування тіл із тріщинами – діаграмі оцінювання руйнування (ДОР).

Вхідними даними для перевірки руйнування елемента конструкції є геометричні параметри конструкції та тріщини; параметри експлуатаційного навантаження; механічні властивості матеріалу.

Метою роботи було дослідити вплив розмірів дефекту на граничний стан експлуатованого колектора пароперегрівника.

Оцінювали граничний стан колектора, знятого після 179 тис. год. експлуатації пароперегрівника котла типу ТП–100. Колектор виготовлений із сталі 12Х1МФ, хімічний склад якої наведено у праці [5].

Координати точки на ДОР визначають за формулами [6]:

$$K_r = \frac{K_{Ip}}{K_{mat}} + \frac{K_{Is}}{K_{mat}} + \rho, \quad L_r = \frac{P}{P_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{0,2}}, \quad (1)$$

де K_{Ip} і K_{Is} – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) для прикладених і залишкових напружень відповідно; K_{mat} (K_{Ic}) – в'язкість руйнування матеріалу за статичного навантаження; ρ – поправка на пластичність; P (або σ_{ref}) – прикладене навантаження (напруження); P_L (або границя плинності $\sigma_{0,2}$) – навантаження (напруження) початку текучості матеріалу в ослабленому перерізі зразка. Криву оцінювання руйнування $K_r = f_{R6}(L_r)$, що відділяє безпечну ділянку від ділянки руйнування елемента конструкції, визначають за результатами випробувань зразків із тріщинами на в'язкість руйнування [4].

Колектор пароперегрівника схематизовано розглядали у вигляді товстостінного циліндра, заглушеного на торцях, із частково коловою поверхневою тріщиною на внутрішній стінці. Циліндр навантажений внутрішнім тиском.

Схему частково колової поперечної тріщини на внутрішній стінці колектора ТЕС зображено на рисунку 1.

Товщина стінки циліндра $t = 50$ мм, внутрішній радіус $R_i = 112,5$ мм, внутрішній тиск $p = 15,5$ МПа. Оскільки виконується нерівність $t > 0,1(2R_i + t)/2$, циліндр вважали товстостінним. Внаслідок осьової симетрії

циліндра та навантажень діючі напруження і відповідні їм деформації також симетричні відносно його осі.

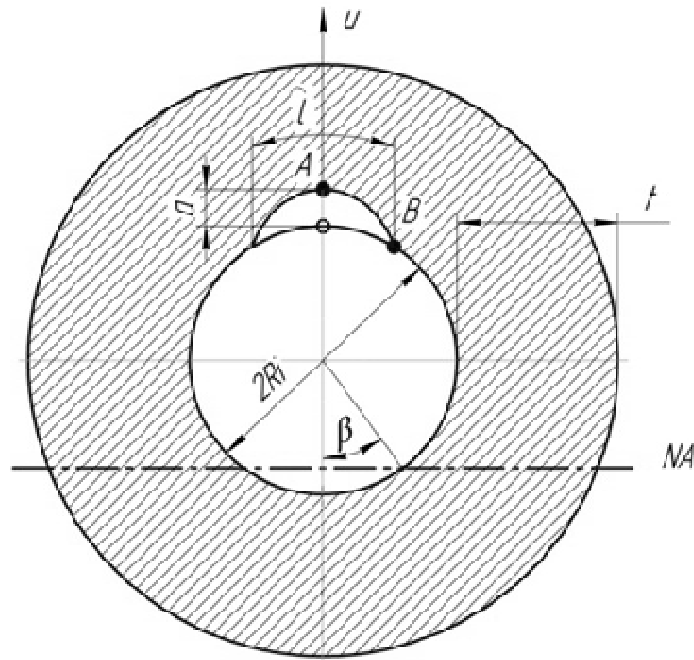


Рисунок 1. Схема частково колової тріщини на внутрішній стінці колектора; глибина, l — довжина дефекту на поверхні, NA — нейтральна вісь [7].

Для досліджуваної геометрії колектора пароперегрівника розподіл напружень у стінці циліндра без отворів, для тиску 15,5 МПа зображено на рисунку 2.

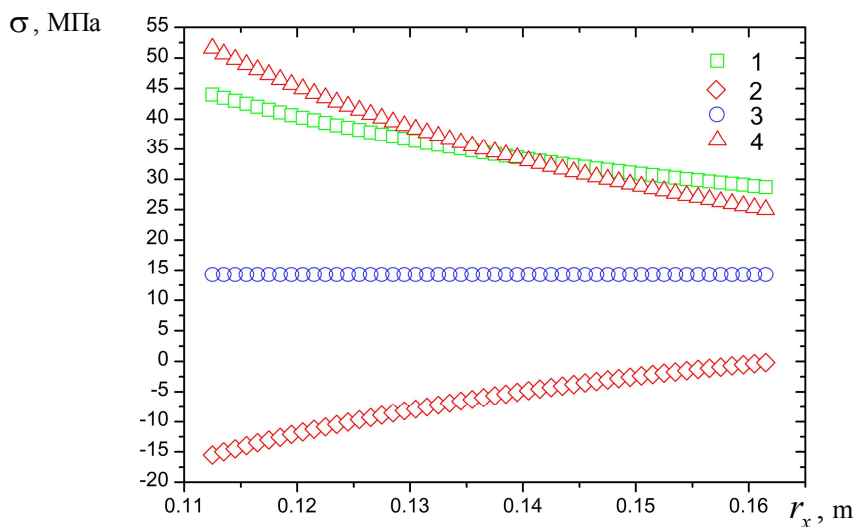


Рисунок 1. Розподіл напружень по товщині товстостінного циліндра без отворів: 1 – тангенціальні, 2 – радіальні, 3 – осьові, 4 – еквівалентні.

Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) обчислювали для точок A та B фронту тріщини (рис. 1) за формулою [8]:

$$K_I = \sqrt{\pi a} \left(\sum_{j=1}^3 \sigma_j f_j(a/t, l/a, R_i/t) + \sigma_{bg} f_{bg}(a/t, l/a, R_i/t) \right), \quad (2)$$

де σ_j ($j = 0$ до 3) – коефіцієнти многочлена, отримані апроксимацією розподілу напружень у стінці циліндра без тріщини многочленом 3–го степеня за формулою

$$\sigma = \sigma(u) = \sum_{j=0}^3 \sigma_j \left(\frac{u}{a} \right)^j \quad \text{при } 0 \leq u \leq a, \quad (3)$$

де σ_{bg} – напруження згину, у досліджуваному випадку дорівнюють нулю; f_j, f_{bg} – поправкові функції для точок A та B (проміжні значення знаходили лінійною інтерполяцією) [9].

Для оцінки руйнування обчислювали значення L_r та K_r . Допустима ділянка обмежена кривою оцінювання руйнування згідно з процедурою R6 [6], яка визначається рівнянням

$$K_r \leq f_{R6} = (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)]. \quad (4)$$

Допустиме пошкодження також оцінювали з використанням підходу, описаного у праці [10], у якому пропонуються коефіцієнти запасу міцності для параметрів L_r та K_r ,

$$\frac{K_I}{K_{cr}} + \frac{\rho}{\sqrt{SF_J}} \leq \frac{f_{R6}(L_r)}{\sqrt{SF_J}}, \quad (4)$$

$$L_r \leq \frac{L_r^{max}}{SF_L}, \quad (5)$$

де SF_J – коефіцієнт запасу міцності для механізму крихкого руйнування, SF_L – коефіцієнт запасу міцності для механізму пластичного колапсу, K_{cr} – в'язкість руйнування.

Для матеріалу труби феритної структури $SF_J = 10,0$; $SF_L = 2,22$ [10].

З урахуванням наведених вище міркувань, побудовано ДОР із допустимою ділянкою, що визначається вказаними вище коефіцієнтами запасу міцності.

На рисунку 3 зображено ДОР моделі колектора пароперегрівника за $20\text{ }^\circ\text{C}$, $K_{mat} = K_{lc}$. Глибина тріщини $a = 5, 10, \dots, 50$ мм, $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), при цьому не розглядали дефекти з довжиною тріщини більшою за $2\pi R_i \approx 706,86$ мм.

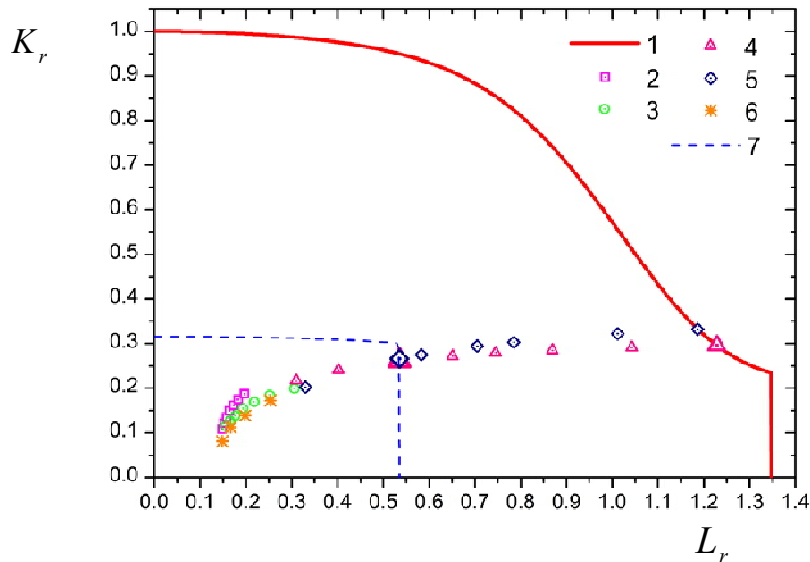


Рисунок 3. ДОР моделі колектора за $20\text{ }^\circ\text{C}$, $K_{mat} = K_{lc}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ мм, гранична крива f_{R6} (1), $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), гранична крива за коефіцієнтами запасу (7)

На рисунку 4 зображено ДОР моделі колектора пароперегрівника при $20\text{ }^\circ\text{C}$, $K_{mat} = K_{fc}$. Глибини тріщин такі ж, як і при ДОР для $K_{mat} = K_{lc}$.

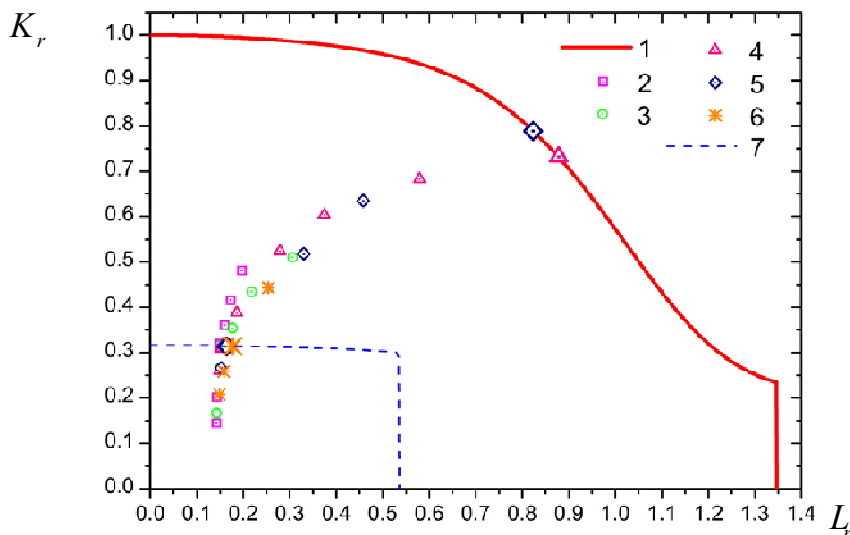


Рисунок 4. ДОР моделі колектора за $20\text{ }^\circ\text{C}$, $K_{mat} = K_{fc}$, $a = 5, 10, \dots, 50$ мм, гранична крива f_{R6} (1), $l/a = 2$ (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5), 32 (6), гранична крива за коефіцієнтами запасу (7)

Найменші розміри тріщин, які є критичними для експлуатації конструкції при $K_{mat} = K_{fc}$ та $K_{mat} = K_{lc}$, із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності та без їх урахування наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.

Критичні розміри тріщин з урахуванням коефіцієнтів запасу міцності та без їх урахування

$K_{mat} = K_{fc} = 32,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		$K_{mat} = K_{lc} = 82,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$		
$a, \text{ мм}$				
l / a	з коефіцієнтами запасу міцності	без коефіцієнтів запасу міцності	з коефіцієнтами запасу міцності	без коефіцієнтів запасу міцності
	25,40	–	–	–
	23,00	–	–	–
	15,14	48,06	44,26	48,10
	12,77	41,75	37,00	44,03
	11,90	–	–	–

Виявлено, що із збільшенням відношення l / a зменшується критичне зачення мінімальної глибини тріщини. Приміром, із зростанням l / a від 2 до 16 із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності для $K_{mat} = K_{fc}$ мінімальна глибина дефекту зменшується від 25,40 мм до 12,77 мм.

Висновки. З використанням двокритеріального підходу R6 та діаграми оцінювання руйнування, що дозволяє аналізувати дефект за двома граничними станами – крихким руйнуванням і пластичним колапсом:

- досліджено вплив розмірів внутрішньої поверхневої тріщини, перпендикулярної до осі циліндра, на залишкову міцність моделі колектора пароперегрівника ТЕС із теплостійкої сталі;
- побудовано діаграми оцінювання руйнування моделі колектора, які враховують характеристики механічних властивостей та в'язкість руйнування сталі 12Х1МФ після 179 тис. год. експлуатації за статичного і циклічного навантаження, а також коефіцієнти запасу міцності для механізму крихкого руйнування та пластичного колапсу;
- виявлено, що зі збільшенням відношення l / a зменшується мінімальна глибина тріщини, критична для елемента конструкції.

Приміром, із зростанням l/a від 2 до 16 із урахуванням коефіцієнтів запасу міцності для $K_{mat} = K_{fc}$ мінімальна критична глибина дефекту зменшується від 25,40 мм до 12,77 мм.

Література

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / за заг. ред. Панасюка В. В. – Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Стащук, Л. Тот; за ред. І. М. Дмитраха. – Київ: ВД “Академперіодика”, 2005. – 378 с.
2. Оцінювання експлуатаційної деградації матеріалу колектора пароперегрівника ТЕС / О. Ясній, Т. Вухерер, В. Ясній та ін. // Вісник ТНТУ. – 2011. – Т. 16. – № 1. С. 7–15.
3. Пошкодження внутрішньої поверхні ділянки колектора пароперегрівника під час експлуатації / Ясній О., Собчак А., Ясній В. та ін. // Машинознавство. – 2011. – Т. 163–164. № 1-2. – С. 16–19.
4. R6: Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 4, Amendment 2, British Energy, Gloucester, 2003.
5. Сталь теплоустойчивая. Технические условия: ГОСТ 20072–74. – Москва: Стандартинформ. – 1987. – 19 с.
6. Milne I. Assessment of the integrity of structures containing defects / I. Milne et al // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1988. – Vol. 32, № 1–4. – P. 3–104.
7. Delfin P. Limit Load Solutions for Cylinders with Circumferential Cracks Subjected to Tension and Bending / P. Delfin. SAQ // FoU-Report. – Stockholm: SAQ Kontroll AB, 1997. – 96/05.
8. Chapuliot S. Stress intensity factors for internal circumferential cracks in tubes over a wide range of radius over thickness ratio / S. Chapuliot, M. H. Lacire, P. Le. Delliou // ASME PVP. – 1998. – 365. – P.95-106.
9. Ясній О. П. Вплив температури на циклічну тріщиностійкість сталі колектора пароперегрівника / О. Ясній, В. Бревус, В. Немченко // Вісник ТНТУ. – 2012. – Т. 68. – № 4. – С. 35–41.

10. Dillstroem P. A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks / P. A. Dillstroem, M. Bergman, B. Brickstad et al: Handbook. – 2008. – P. 173–175

Oleh Yasniy, Vitaliy Brevus, Volodymyr Yasniy

ASSESSMENT OF THERMAL POWER PLANT SUPERHEATER COLLECTOR LIMITING STATE

Thermal power plants are the important objects, failure of which can cause accidents with severe consequences. A large portion of Ukrainian thermal power plants has exceeded its design life, which is determined, to large extent, by the main elements of steam power systems. Therefore, the main task is to assess correctly the superheaters collectors limiting state using modern approaches and taking into account the service degradation of material

Keywords: *superheater collector, 12Cr1MoV steel, stress-strain state, thermo-mechanical loading, failure assessment diagrams.*

УДК 631.356.2

Володимир Дзюра, Роман Романовський

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ПНЕВМОМЕХАНІЧНИХ ТРАНСПОРТЕРІВ

В статті наведено результати експериментальних досліджень енергосилових параметрів процесу транспортування сипких матеріалів з різними реологічними властивостями шнековим пневмо-механічним транспортером. При цьому проведено порівняння зміни енергосилових параметрів при транспортуванні сипкого матеріалу з використанням пневмоприводу і без нього.

Ключові слова: *транспортування сипких матеріалів, енергосилові параметри*

Постановка проблеми. Шнекові гвинтові конвеєри як окремий технічний елемент транспортних механізмів знайшли широке використання в компоновальних схемах машин для перенавантаження або переміщення дрібносипких матеріалів у зв'язку з їх простотою конструкції, нескладністю технічного обслуговування та можливістю завантаження й розвантаження матеріалу в будь-якому місці технологічного процесу роботи транспортного пристрою.

Загальним недоліком роботи шнекових механізмів є надання спіральними витками гвинтового конвеєра не тільки поступального осьового переміщення матеріалу, але й обертового руху, що призводить не тільки до пошкодження матеріалу, але і зменшення продуктивності механізмів і, як наслідок, досягнення найвищої економічної ефективності, або максимальної продуктивності пневмо-шнекового транспортера (ПШТ) в цілому.

Дослідженням роботи шнекових транспортерів присвячені роботи Р.М. Рогатинського [1], Б.М. Гевка [2], В.М. Гущина [3].

Мета роботи. Метою роботи є аналіз експериментальних даних процесу транспортування сипких матеріалів з різними реологічними

властивостями пневмо-механічним транспортером з метою подальших рекомендацій для вибору раціональних параметрів його роботи.

Результати дослідження. Для проведення експериментальних досліджень нами розроблено дослідний взірець пневмо-механічного транспортера (рис. 1). На рис. 1 зображено схему транспортера з підключеними до нього компресором і частотним перетворювачем «Altivar 71», через який здійснювалась фіксація і запис енергосилових параметрів процесу транспортування сипких матеріалів.

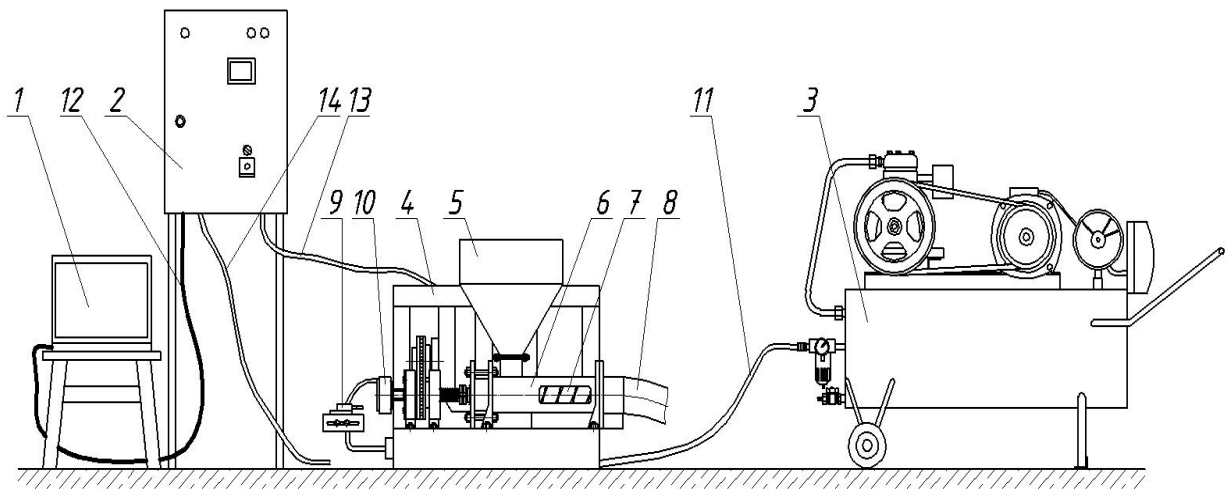


Рисунок 1. Схема дослідної установки: 1 – комп'ютер; 2 – частотний перетворювач «Altivar 71»; 3 – компресор; 4 – рама транспортера; 5 – бункер; 6 – корпус живильника; 7 – шнек; 8 – гнучка труба; 9 – пневморозподільник; 10 – обертовий пневмоперехід; 11 – повітряний шланг; 12 – комунікаційний кабель RS 232; 13 – кабель живлення електродвигуна транспортера; 14 – кабель живлення «Альтівара»



Рисунок 2. Пристрій «Альтівар» для дослідження силових характеристик приводу пневмо-механічного транспортера

Для визначення реальних силових параметрів процесу транспортування сипких матеріалів при проведенні експериментальних досліджень використовували частотним перетворювачем «Altivar 71» (рис. 2) – перетворювач частоти для асинхронних двигунів, який дозволяє здійснювати плавний пуск і регулювання частоту електродвигуна пневмомеханічного транспортера.

Однією з вагомих переваг даного пристрою є наявність віртуального осцилографа, який дає можливість відслідковувати зміну шуканих параметрів в часі з конкретними числовими значеннями.

Перетворювач частоти Altivar 71 має наступні налаштування, які відповідають найбільш частим застосуванням:

- Макроконфігурація: Пуск/Стоп.
- Частота напруги живлення двигуна: 50 Гц.
- Застосування з постійним моментом, векторні керування потоком без датчика зворотнього зв'язку.
- Спосіб нормальної зупинки з заданим темпом гальмування;
- Спосіб несправностей при несправності;
- Час лінійного розгону/гальмування – 3с;
- Нижня частота – 0 Гц;
- Верхня частота – 50 Гц;
- Тепловий струм двигуна рівний номінальному струму двигуна;
- Струм динамічного гальмування рівний 0,7 номінального струму перетворювача на протязі 0,5 с;
- Без автоматичного повторного пуску при виникненні несправностей;
- Дискретні та аналогові виходи.

При проведенні експериментальних досліджень використовували матеріали пшеницю, висівки та тирсу.

Напруга на електродвигуні – 380 В; частота струму змінювалась від 0 до 50 Гц, що відповідало 0-450 об/хв шнека транспортера.

При допомозі віртуального осцилографа по результатах експериментальних досліджень одержані наступні графіки.

На рис. 3 зображено зміну силових характеристик приводу пневмомеханічного транспортера в часі при транспортуванні пшениці фракцією 3,5 мм.

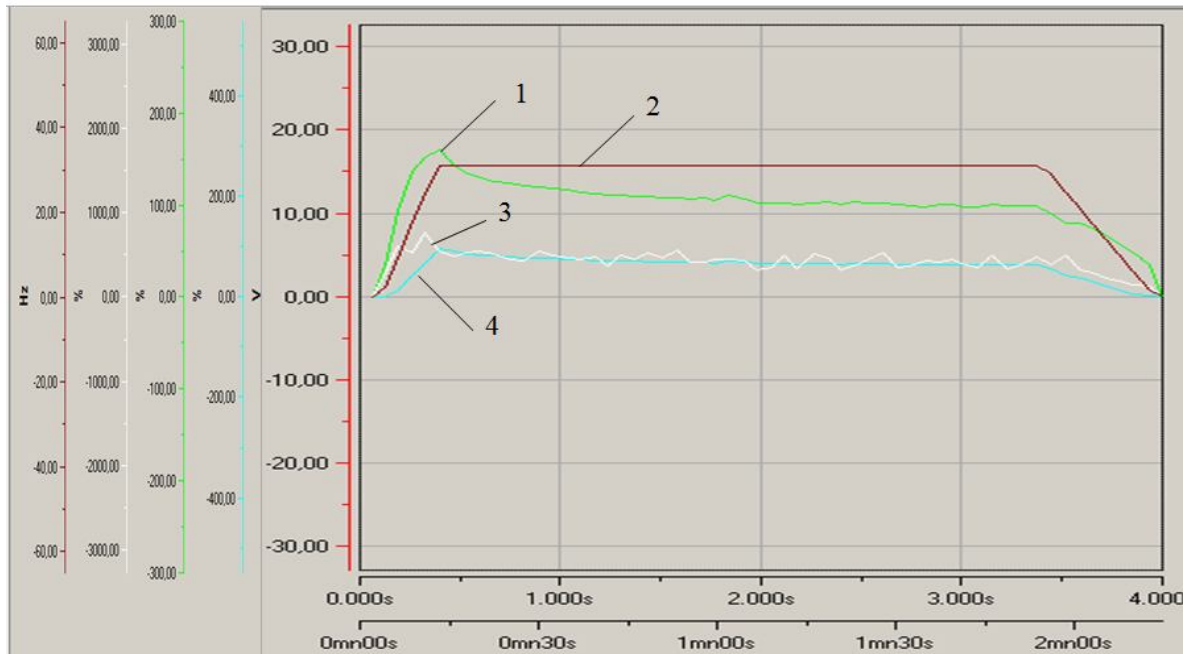


Рисунок 3. Графік зміни силових параметрів приводу пневмомеханічного транспортера при транспортуванні пшениці фракції 3,5 мм:
 1 – крутний момент двигуна; 2 – вихідна частота струму;
 3 – індикаторний крутний момент двигуна; 4 – потужність двигуна

Аналізуючи отриманий графік (рис. 3) виділяли три етапи його роботи. Перший етап триває від 0 до 15 секунд і характеризується зростанням навантаження на привід, що пояснюється його розгоном від 0 до 450 об/хв.

Другий етап роботи транспортера характеризується рівномірним режимом його роботи. Циклічне зростання крутного моменту на приводі й наступне його спадання пояснюється накопиченням сипкого матеріалу в корпусі живильника, що призводить до зростання навантаження на привід і випуском повітряного потоку з пневморозподільника, що призводить до зниження навантаження на привід.

Третій етап роботи транспортера – це його вимкнення, він характеризується спаданням усіх силових характеристик приводу з встановленого значення до нуля.

На рис. 4 зображено зміну силових характеристик приводу пневмомеханічного транспортера в часі при транспортуванні тирси фракцією 0,1 мм.

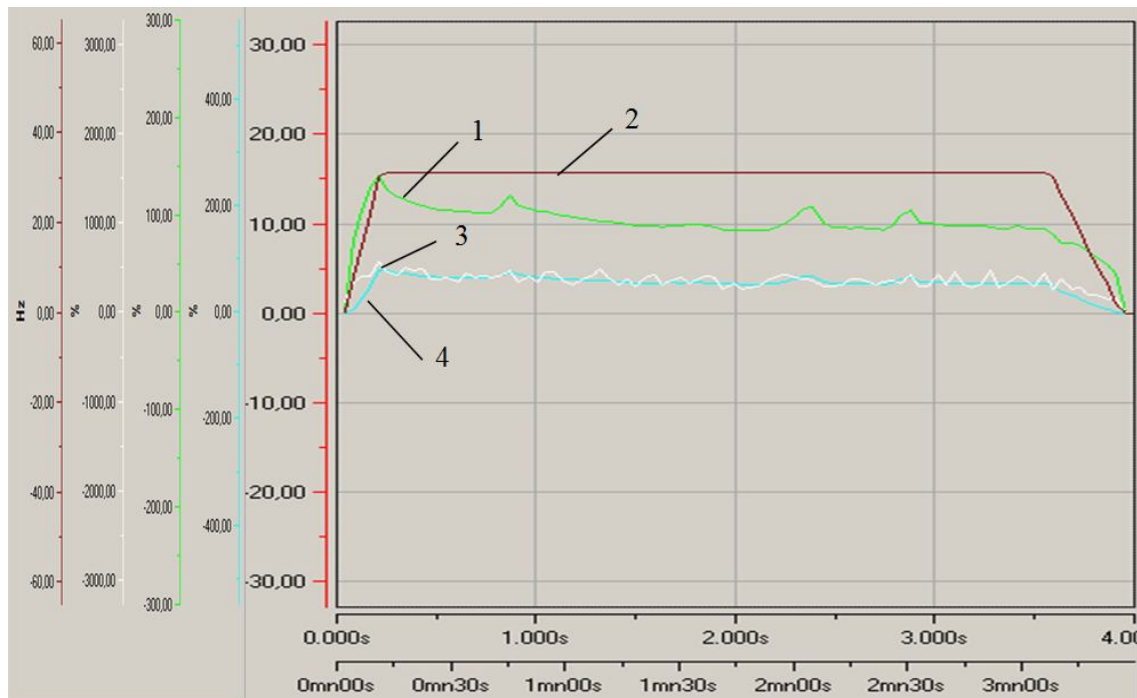


Рисунок 4. Графік зміни силових параметрів приводу пневмомеханічного транспортера при транспортуванні тирси фракції 0,1 мм:

1 – крутний момент двигуна; 2 – вихідна частота струму;
3 – індикаторний крутний момент двигуна; 4 – потужність двигуна.

Аналізуючи графік (рис. 4) зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера при транспортуванні тирси фракції 0,1 мм бачимо, що перший етап роботи приводу транспортера характеризується зростанням усіх силових показників, що є наслідком зростання частоти приводу.

Другий етап роботи приводу характеризується інтенсивнішим ніж при транспортуванні пшениці вмиканням пневморозподільника, що відображається на графіку (крива 3).

Третій етап роботи транспортера – це його вимкнення, він характеризується спаданням усіх силових характеристик приводу з встановленого значення до нуля. Однак спадання крутного моменту на приводі відбувалось плавно.

На рис. 5 зображено зміну силових характеристик приводу пневмо-механічного транспортера в часі при транспортуванні висівок фракцією 0,1 мм.

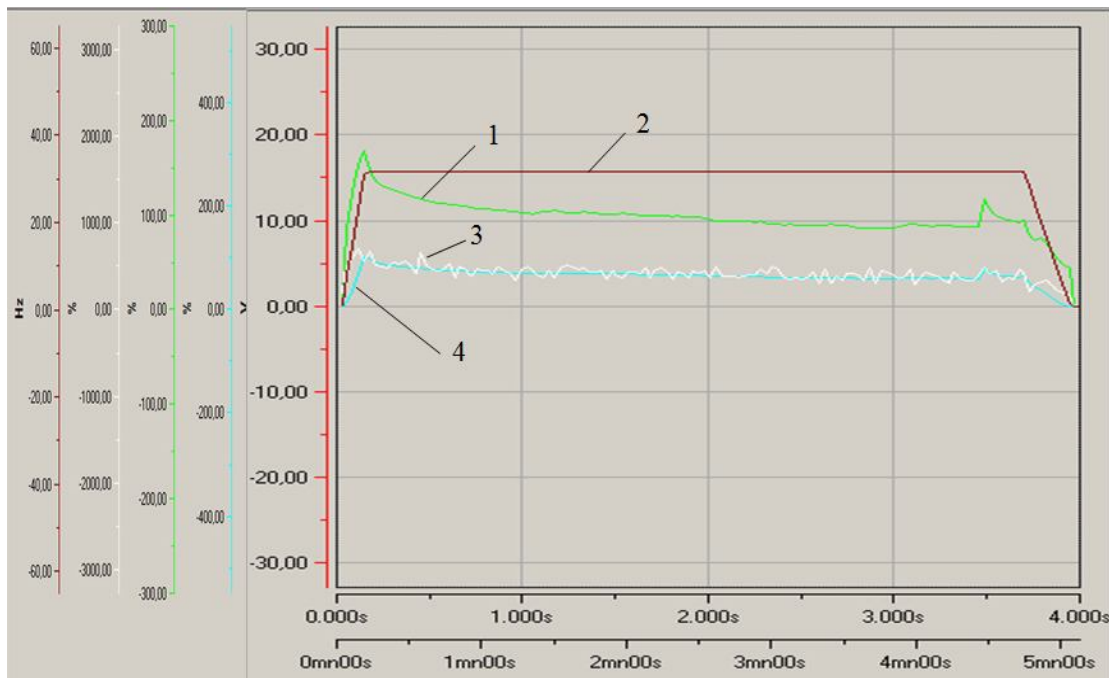


Рисунок 5. Графік зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера при транспортуванні висівок фракції 0,1 мм:

- 1 – крутний момент двигуна; 2 – вихідна частота струму;
3 – індикаторний крутний момент двигуна; 4 – потужність двигуна

Аналізуючи графік (рис. 5) зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера при транспортуванні висівок фракції 0,1 мм бачимо, що перший етап роботи приводу транспортера характеризується зростанням усіх силових показників, що є наслідком зростання частоти приводу.

Другий етап роботи характеризується рівномірним режимом роботи. Однак циклічність зміни крутного моменту є значно вищою, що пояснюється частішим накопиченням сипкого матеріалу в корпусі живильника.

Третій етап роботи транспортера – це його вимкнення, він характеризується спаданням усіх силових характеристик приводу з встановленого значення до нуля. Однак спадання силових характеристик, зокрема крутного моменту на приводі, відбувалось не плавно.

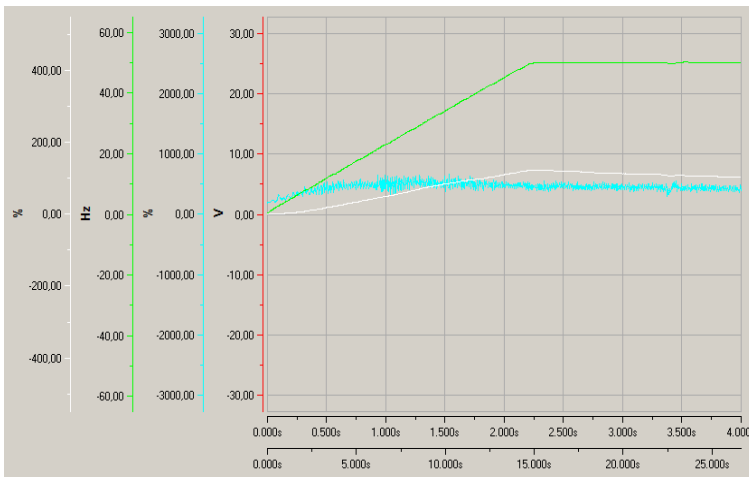


Рисунок 6. Графік зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера з підживленням транспортного потоку при транспортуванні гороху

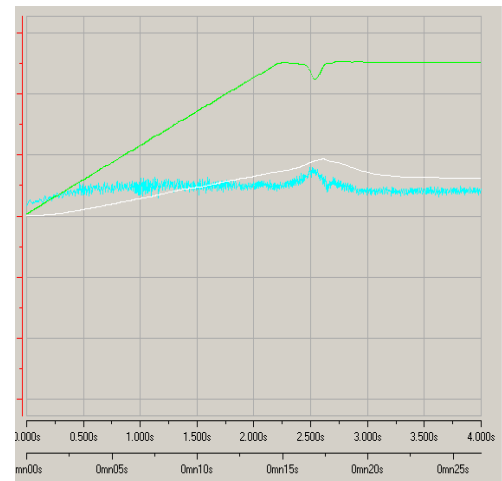


Рисунок 7. Графік зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера з підживленням транспортного потоку при транспортуванні пшениці

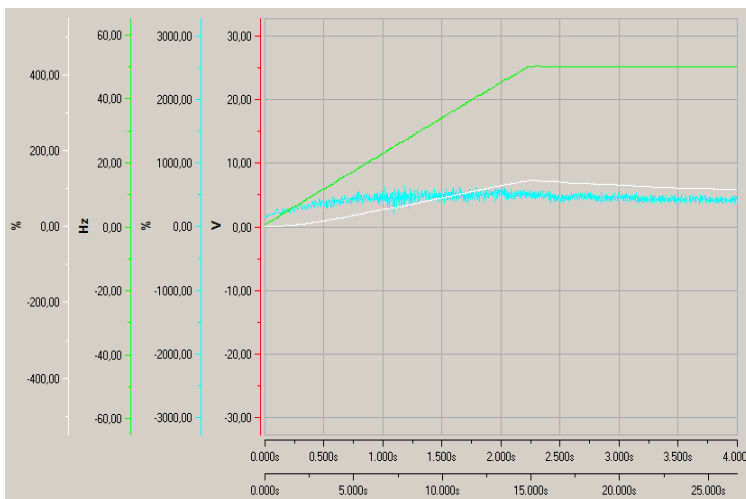


Рисунок 8. Графік зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера з підживленням транспортного потоку при транспортуванні висівок фракції 0,1 мм

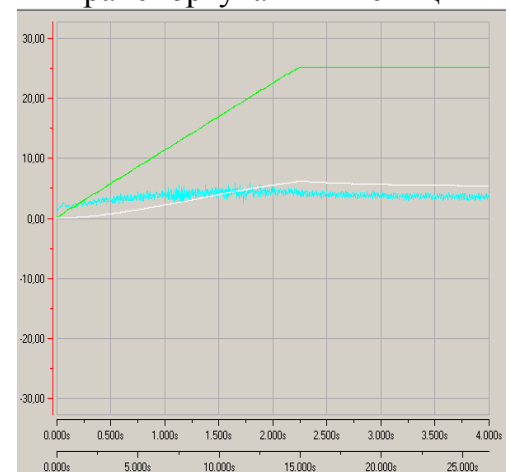


Рисунок 9. Графік зміни силових параметрів приводу пневмо-механічного транспортера з підживленням транспортного потоку при транспортуванні тирси

Аналізуючи всі три графіки, можемо відзначити, що плавність роботи транспортера залежить від властивостей матеріалу, який доводиться транспортувати, зокрема це впливає на частоту вмикання пневматичного приводу, що запобігає його перевантаженню і відповідно завчасній поломці. Крім цього, вмикання пневматичного приводу руйнує утворені ущільнення сипкого транспортного матеріалу.

Підживлення за допомогою повітряної подушки значно покращує процес транспортування сипкого матеріалу, однак вимагає більших витрат повітря.

Підживлення транспортного потоку крім підвищення продуктивності транспортування сипкого матеріалу чинить позитивний вплив на роботу самого транспортера, усуваючи значні перевантаження, які викликані утворенням ущільнень транспортного матеріалу.

На рис. 6 – 9 наведено енергосилові характеристики роботи пневмомеханічного транспортера з пневматичним підживленням транспортних потоків. Якщо порівнювати характеристики приводу під час роботи транспортера без підживлення транспортного потоку в гнучкому рукаві, то бачимо, що підживлення забезпечує відсутність стрибкоподібного зростання крутного моменту двигуна при його розгоні. При цьому значно зменшуються динамічні навантаження, пов'язані з порційністю транспортування матеріалу в гнучкому рукаві.

Максимальна відстань транспортування сипкого матеріалу при підживлення одним соплом складає: для гороху – 0,65 м, пшениці – 2,6 м, висівок – 2,5 м, тирси – 3 м, що більше, ніж при відсутності підживлення [3].

Висновки

Проаналізувавши отримані графіки залежностей, встановлено, що використання повітряного підживлення транспортного потоку в гнучкому рукаві, створює ефект повітряної подушки, яка покращує транспортування сипкого матеріалу.

Література

1. Рогатынский Р.М. Винтовые подающие механизмы сельскохозяйственных машин / Б.М. Гевко, Р.М. Рогатынский. – Львов : Вища школа, 1989. – 176 с.
2. Технология изготовления спиралей шнеков. Гевко Б.М. — Львов: Вища шк. Изд-во при Львов, ун-те, 1986. — 128 с.
3. Гуцин Олег Володимирови. Створення пневмотранспортної

установки з порційним рухом сипких будівельних матеріалів: дис. канд. техн. наук: 05.05.02 / Київський національний університет будівництва і архітектури. – К., 2008. – 195 с.

Volodymyr Dzyura, Roman Romanovsky

PNEUMATIC SCREW MATERIAL CONVEYOR TESTING

The paper presents experimental research of energy-power parameters of transporting bulk materials with different rheological properties by screw pneumo-mechanical conveyor. Energy-power parameters change during the transportation of bulk material using air drive or without air is analysed .

Keywords: *pneumatic screw transportation, bulk material conveyor.*

Анатолій Матвійчук

**СИЛОВІ РОЗРАХУНКИ ВЕРСТАТА
ДЛЯ ПОРІЗКИ АВТОТРАКТОРНИХ ШИН**

В статті проведено силові розрахунки для визначення величини пружного моменту, сумарного зусилля різання, максимального видовження стійок та величини прогину вала, які виникають при порізці автотракторних шин.

Ключові слова: *різальний верстат,, порізка шин.*

Верстат відноситься до галузі машинобудування і може мати широке використання у процесах механічного розрізання утилізованих автотракторних шин [1]. Верстат для порізки автотракторних шин виконаний у вигляді нерухомої станини, рухомої рамки, на якій закріплюється привід головного руху різання і радіальної подачі, різальний інструмент у вигляді дискових ножів і подаючі зубчасті колеса, механізму базування шини, який виконаний у вигляді опорно-сферичного ролика, що має форму, аналогічну внутрішньому профілю автотракторної шини. Навпроти опорно-сферичного ролика зовні шини встановлено центрувально-притискний ролик, який має можливість вертикального переміщення з наступною його жорсткою фіксацією. Він виконаний у вигляді циліндра з обмежувачами дисками з двох боків. Також шина фіксується з двох боків хрестовинами, які мають можливість горизонтального переміщення з наступною їх жорсткою фіксацією. Одночасно, хрестовини дозволяють шині здійснювати обертовий рух. В центральній частині по радіусу шини встановлено опорно-різальний ролик, який виконує роль матриці, в яку входять ножі при порізці. Механізм врізання виконано з використанням пневмоциліндра, що одним

кінцем кріпиться до станини, а іншим до рухомої рамки. Глибина різання встановлюється за допомогою механізму гвинт-гайка і кінцевого упора.

Конструкція верстату дозволяє регулювати ширину полос, на які розрізається відпрацьована шина.

Величина крутного моменту, необхідного для процесу розрізання визначається за формулою:

$$M = K_1 \cdot n \left(\frac{K \cdot S^2 \cdot \tau_p \cdot r \cdot \sqrt{r}}{2(\sqrt{S+a} + \sqrt{a})} + r \cdot f \cdot F \cdot \sigma_p \right) \left(\frac{\sqrt{\frac{a+S}{r}} + \sqrt{\frac{a}{r}}}{2} \right),$$

де $K_1 = 1,2..1,5$ – коефіцієнт, який враховує стан обладнання;

K – коефіцієнт, який враховує затупленість інструменту, зусилля подачі тощо, $K = 2$;

n – кількість фрез, які працюють одночасно;

S – товщина шини, $S_{\text{MAX}} = 20$ мм;

τ_p – опір різанню в момент прикладання вертикальної сили від дискової фрези, $\tau_p = 5$ Н/мм²;

r – радіус дискової фрези, $r=60$ мм;

a – величина заходу фрези в матрицю, $a=30$ мм;

f – коефіцієнт тертя між шиною і фрезою, $f=0,83$;

F – площа двостороннього контакту шини з фрезою, $F=200$ мм²;

σ_p – напруження стиску шини при її розрізанні, $\sigma_p=10$ Н/мм².

Сумарне зусилля різання обчислюється за формулою:

$$P = n \left(\frac{K \cdot S^2 \cdot \tau_p \cdot \sqrt{r}}{2(\sqrt{S+a} + \sqrt{a})} + f \cdot F \cdot \sigma_p \right) \text{ кН.}$$

Розрахунок на міцність проводимо для смуг, на яких держиться пневмоциліндр (рис.1).

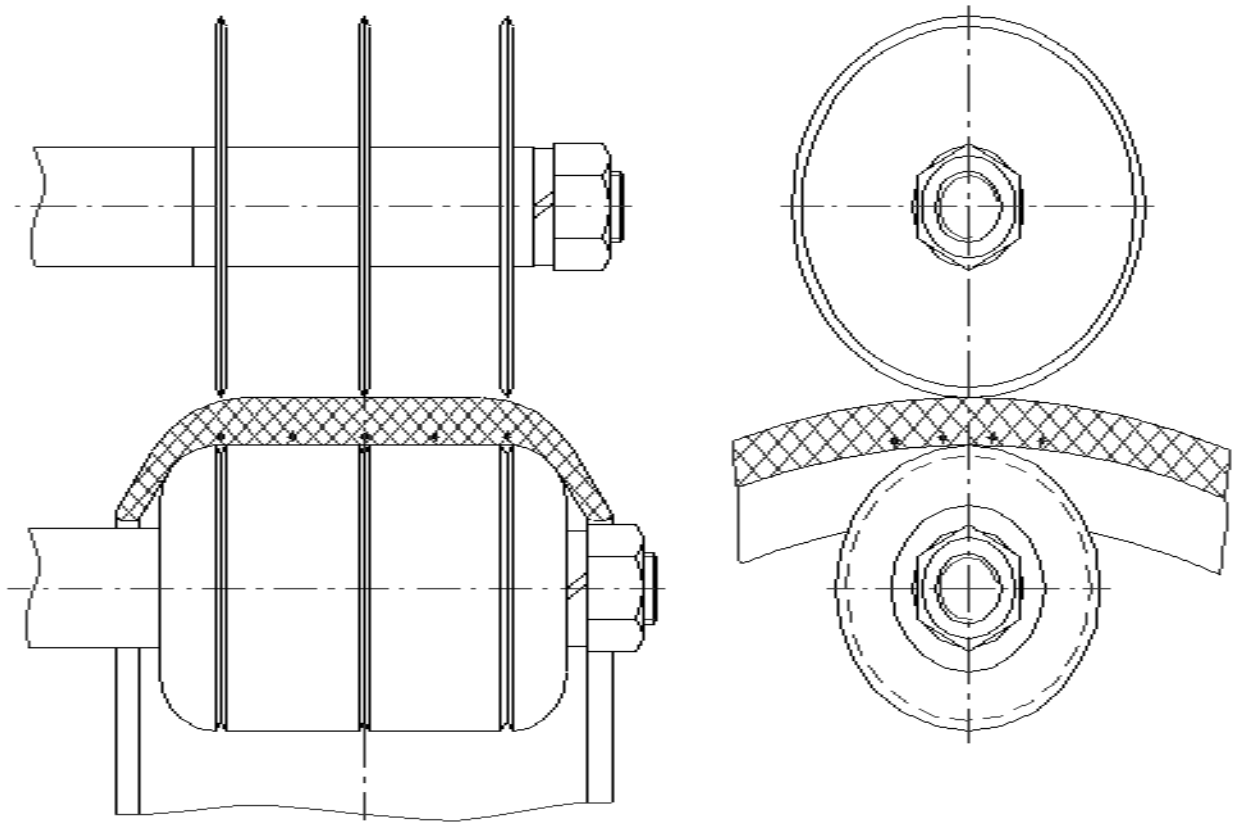


Рисунок 1. Схема встановлення інструменту в конструкції верстата для порізки автотракторних шин

Напруження при стиску/розтягу обчислюємо за формулою:

$$\sigma = \frac{P}{A} \leq [\sigma],$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження, для сталі Ст.3 $[\sigma] = 100\text{МПа}$;

P – максимальне зусилля тяги пневмоциліндра, при тиску 6,3атм $P = 1,4\text{кН}$;

A – площа поперечного перерізу смуги, з якої виготовленні стійки, у даному випадку $A = n \cdot b \cdot h = 2 \cdot 150 \cdot 8 = 2400\text{мм}^2$, де n – кількість стійок.

Максимальне видовження стійок складатиме:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A},$$

де l – висота стійки, мм;

E – модуль Юнга першого роду, $E = 2 \cdot 10^5\text{МПа}$.

Величину прогину вихідного валу із закріпленням на ньому різально-подаючим пристроєм обчислюємо за наступною формулою:

$$f_P = \frac{P \cdot l^3}{3E \cdot J},$$

де P – сумарна сила різання, $P = 8,68$ кН;

$J = \frac{\pi d^4}{32}$ – момент інерції поперечного перерізу вихідного валу, у

даному випадку – круга $d = 40$ мм;

E – модуль Юнга першого роду, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;

l – виліт інструменту, $l = 150$ мм.

Література

1. Пат. 53992А Україна, МПК 7 В26 D1/00. Верстат для порізки відпрацьованих автотракторних шин /В. І. Михайлишин, І. Б. Гевко, А. В. Матвійчук - Чинний від 17.02.2003.

Anatoliy Matviychuk

FORCE CALCULATION OF A LATHE FOR AUTOMOBILE AND TRACTOR TIRES CUTTING

In the paper force calculations are carried out for elastic torque, net cutting stress, maximum pole expansion and shaft bending magnitude determination during automobile and tractor tires cutting.

Keywords: *cutting lathe, tire cutting.*

Петро Стухляк, Віталій Карташов

**ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТНИХ СИЛОВИХ ПОЛІВ ДЛЯ
РЕГУЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ЕПОКСИДНІЙ ОСНОВІ**

Досліджено вплив обробки полімерних композитів змінним магнітним полем на їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. Встановлено, що застосування магнітного оброблення забезпечує орієнтацію компонентів у композиції. Така орієнтація залишається і після формування композиції у виробі. Досліджено вплив наповнювачів різної дисперсності, фізичної та хімічної природи на фізико-механічні властивості модифікованих змінним магнітним полем епоксикомпозитів. Запропоновано режими магнітного оброблення для покращення наведених фізико-механічних характеристик.

Ключові слова: *епоксидний олігомер, поліетиленполіамін, композитний матеріал, модифікація, твердник, дисперсний наповнювач.*

На даному етапі розвитку сучасна промисловість ставить широкий комплекс вимог до нових композитних матеріалів. При використанні традиційних технологій не забезпечується вирішення поставлених задач у повній мірі. Перспективним у даному напрямку досліджень є розроблення та застосування полімерних композицій, зокрема на епоксидній основі. Для підвищення експлуатаційних характеристик виробів, виготовлених із епоксидних композитів, широко застосовують модифікацію зовнішніми силовими полями, а саме магнітним обробленням. Тому важливе значення має дослідження фізико-хімічних процесів, що відбуваються при зшиванні матеріалу під впливом магнітного поля та врахування впливу різноманітних зовнішніх чинників. Це дасть можливість оцінити увесь

спектр властивостей модифікованих магнітним обробленням композитних матеріалів, та прогнозовано формувати матеріали із наперед заданими характеристиками.

У наш час регулювання міжфазних процесів здійснюють шляхом введення в олігомерну матрицю наповнювачів різної дисперсності та фізико-хімічної природи, регулюванням температурно-часових параметрів формування та застосуванням оброблення зовнішніми силовими полями, а саме змінним магнітним полем. Магнітне оброблення є перспективним методом модифікації епоксидних композицій завдяки доступності, низькій вартості та можливості регулювання параметрів оброблення у широких межах. У зв'язку з цим, важливим є встановлення закономірностей впливу оброблення змінним магнітним полем на процеси структуроутворення матриці і, як наслідок, на властивості матеріалів, у тому числі й експлуатаційні.

Одним із способів регулювання структури полімер-композитних матеріалів є оброблення композицій зовнішніми фізичними полями, а саме змінним магнітним полем (ЗМП). Застосування даного методу модифікування дає змогу змінювати як надмолекулярну структуру, густину, так і термомеханічні властивості епоксикомпозитних матеріалів [1, 2]. Доведено, що вплив ЗМП на характеристики епоксикомпозитів більш ефективний при використанні феромагнітних наповнювачів завдяки більшому значенню магнітної сприйнятності середовища (табл. 1).

Однак, на нашу думку, недостатньо уваги, на сьогоднішній день, приділено питанням дослідження впливу способів магнітного оброблення на експлуатаційні властивості оброблених епоксикомпозитів. Для дослідження цього питання використали два способи оброблення композицій ЗМП: попереднє оброблення (до введення твердника) та оброблення у процесі зшивання матеріалу (після введення твердника) при формуванні зразків для досліджень.

Попереднє магнітне оброблення полягає у тому, що компоненти матеріалу обробляють на протязі заданого часу окремо, або після суміщення зв'язувача та наповнювача. Протягом магнітного оброблення

як окремі складові, так і композиція в цілому, набувають орієнтаційної поляризації, нагріваються вихровими струмами до певної температури, залежно від параметрів електромагнітного поля. Після припинення дії поля епоксидна композиція, що є полярним діелектриком, зберігає певний час орієнтацію компонентів суміші. Проте вплив теплового поля намагається ізотропно розмістити по усіх напрямках дипольні моменти окремих молекул. Тому наступним етапом є охолодження складових або суміші до кімнатної температури 295 ± 2 К, при якій компоненти з епоксидної матриці та наповнювача суміщають із твердником ПЕПА гідродинамічним способом, а далі проводять формування виробу, чи наносять композицію на основу у якості покриття. У даній роботі не досліджували оброблення фізичними полями окремих складових полімерних композицій, тому надалі розглядаємо в якості об'єкту магнітного оброблення виключно суміш матриці з наповнювачем, або композицію з твердником. За період оброблення електромагнітним полем спостерігали орієнтацію макромолекул та надмолекулярних утворень епоксидного олігомера, які є диполями з фізичної точки зору, вздовж силових ліній магнітного поля. У випадку, коли введений у матрицю наповнювач є феромагнітної природи, відбувається збільшення магнітного моменту феромагнітних частинок, оскільки намагніченість у феромагнетиках під впливом зовнішнього магнітного поля зростає стрибкоподібно. Внаслідок цього відбувається взаємодія макромолекул та надмолекулярних утворень із магнітним полем навколо дисперсних феромагнітних частинок, що забезпечує формування навколо них поверхневих шарів із високим ступенем орієнтації та значною протяжністю. Проте після введення твердника в оброблену композицію спостерігали підвищення температури при формуванні, що супроводжується більш інтенсивними структурними процесами у матеріалі. Встановлено, що такий матеріал лише частково зберігає орієнтований стан після зшивання.

Для подолання цієї проблеми потрібно затверджувати матеріал безпосередньо у магнітному полі, щоб макромолекули та частинки

наповнювача постійно перебували під впливом електромагнітного поля до того часу, поки макромолекули зв'язувача не втратять рухливість, тобто до моменту повного зшивання матеріалу. Проте оброблення епоксидних композицій змінним магнітним полем в процесі зшивання матеріалу є ускладненим, особливо при використанні твердників холодного тверднення (ПЕПА). Це пов'язано, по-перше із підвищенням температури середовища в зоні оброблення, а по-друге із необхідністю розташування всього виробу в ній. Оскільки епоксидна матриця є діелектриком по своїй фізичній природі, для забезпечення структурної орієнтації матеріалу на її основі необхідне магнітне поле значної напруженості, величину якої можна визначити виключно дослідним шляхом. Слід зауважити, що у будь-якому випадку при створенні ЗМП присутні втрати, що призводять до перетворення енергії магнітного поля в теплову, що підвищує температуру в зоні оброблення. Крім того, додатковий нагрів відбувається вихровими струмами при застосуванні феромагнітних наповнювачів. Експериментально встановлено, що у випадку оброблення електромагнітним полем на попередній стадії температура композиції зростає, але при введенні твердника композицію охолоджували до кімнатних температур. Тому при такій обробці нагрів практично не впливає на кінцеві експлуатаційні властивості отриманого матеріалу. При зшиванні матеріалу в ЗМП нагрів композиції є небажаним, оскільки підвищення температури призводить до пришвидшення проходження хімічних реакцій, що зумовлює суттєве прискорення процесу тверднення матеріалу. У даному випадку час живучості композиції різко знижується. Крім того, композити при зменшенні тривалості тверднення характеризуються зростанням залишкових напружень, що негативно відображається на експлуатаційних властивостях матеріалу. Слід зауважити, що при збільшенні температури композиції вище $t = 353..363 \text{ K}$ спостерігали спінення композиції, що призводило до утворення дефектів та пустот у матеріалі, які негативно впливають на міцнісні характеристики отриманого композиту.

Як бачимо, кожен із методів оброблення ЗМП епоксидних композицій має свої переваги та недоліки, тому, щоб встановити, який метод є оптимальним для отримання максимальних міцнісних характеристик матеріалу, проводили випробування композитів, оброблених ЗМП різними методами, на ударну в'язкість. Припускали, що структура із орієнтованим станом матеріалу буде мати максимальних вплив саме на міцність матеріалу при ударі, прикладеному в перпендикулярному напрямку до зорієнтованих ланцюгів макромолекул та частинок наповнювачів. У якості об'єкта дослідження вибрали композити із епоксидної матриці (без наповнювачів) та композити із феромагнітним наповнювачем (ферит марки 1500НМ3) в концентрації 30 мас.ч. наповнювача на 100 мас.ч. зв'язувача (тут і далі по тексту концентрація наповнювача приведена у масових частках на 100 мас.ч. зв'язувача) оскільки відомо, що така концентрація наповнювача є оптимальною для досягнення максимальних міцнісних характеристик отриманого матеріалу [3] (рис.1).

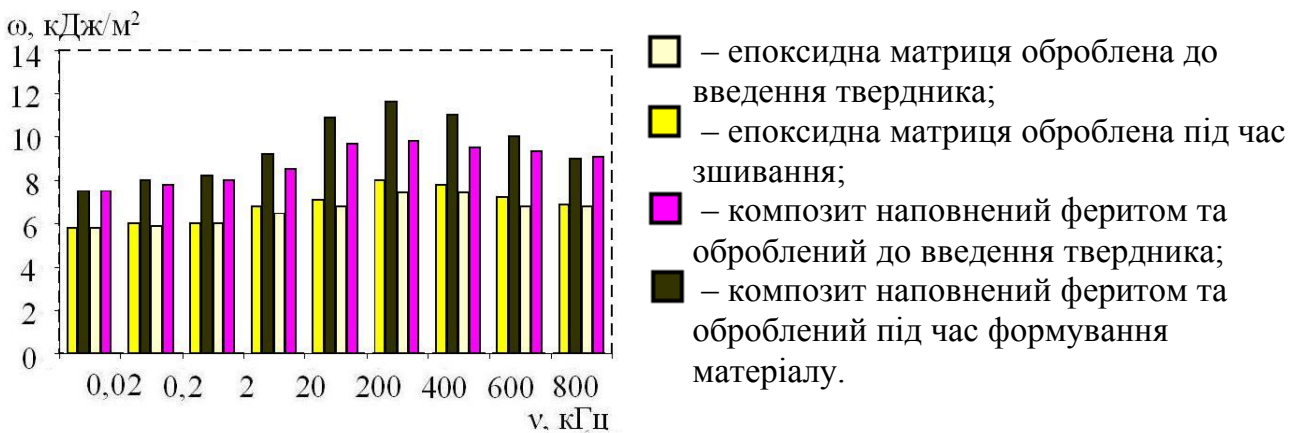


Рисунок 1. Залежність ударної в'язкості епоксикомпозитів від частоти змінного магнітного поля.

Встановлено, що застосування попереднього оброблення ЗМП епоксидної матриці призводить до зростання ударної в'язкості (ω) в середньому на 27 %, а композиції, наповненої феритом, на 30 %. Так для не модифікованого композиту із епоксидної матриці без наповнювачів ω становить 5,8 кДж/м², що добре узгоджується із роботами [4, 5]. При попередньому обробленні епоксидної матриці протягом 30 хв ЗМП

частотою $\nu = 20 \dots 200$ кГц ударна в'язкість зростає до $\omega = 7,4$ кДж/м², що можна пояснити як орієнтацією макромолекул та надмолекулярних утворень, так і підвищенням ступеня зшивання матеріалу. Попереднє оброблення ЗМП композицій, наповнених феритом, забезпечує підвищення ω на 30 %, з $\omega = 7,5$ кДж/м² до $\omega = 9,8$ кДж/м². Можна стверджувати, що ЗМП також має вплив на некомпенсований магнітний момент частинок фериту. Проте, оскільки після попереднього оброблення ЗМП відбувається суміщення композиції із твердником, частинки наповнювача розміщуються в об'ємі матеріалу хаотично. Припускали, що збільшення ω для композитів із феромагнітним наповнювачем, порівняно з композитами на основі лише епоксидної матриці, відбувається через збільшення магнітного моменту феромагнітних частинок. Це сприяє покращенню взаємодії макромолекул олігомера із дисперсними частинками наповнювача.

Особливий інтерес становить поведінка значень ω для композитів, що зшивали безпосередньо у ЗМП. Для композитів на основі лише епоксидної матриці без наповнювача, спостерігали зростання значень ω на 38 % із $\omega = 5,8$ кДж/м² до $\omega = 8$ кДж/м². Аналогічні тенденції спостерігали для зшитих у ЗМП композитів, наповнених феритом. Збільшення ударної в'язкості для таких композитів спостерігали в 1,55 рази відповідно з $\omega = 7,5$ кДж/м² до $\omega = 11,61$ кДж/м². Тобто можна стверджувати, що зшивання епоксидних композицій безпосередньо у ЗМП є ефективнішою модифікацією для отримання кращих експлуатаційних властивостей композитного матеріалу. В загальному механізм орієнтації компонентів матриці при структуроутворенні при зшиванні композиту в ЗМП відбувається наступним чином. Глобули макромолекул можна представити у вигляді доменів, котрі на початкових станах досить рухливі й орієнтуються вздовж силових ліній поля. Проте поступово матеріал зшивається і домени втрачають рухливість, залишаючись у зорієнтованому положенні. Після припинення дії зовнішнього намагнічуючого поля такий матеріал короткочасно володіє магнетоелектретними властивостями. Далі відбувається процес релаксації,

коли поляризований неврівноважений стан переходить в неполяризований рівноважний, тобто вихідний. А гетерозаряд переходить в гомозаряд, тобто заряд поверхні діелектрика [6]. Це має вагомий вплив на адгезійні властивості такого матеріалу.

Встановлено, що для всіх композицій максимум значень ω спостерігали при частоті $\nu = 20 \dots 200$ кГц. Очевидно, що при частоті менше 20 Гц ЗМП не проявляє суттєвого впливу на міцнісні характеристики композитів. Можна припустити, що це пов'язано із значними втратами на низьких частотах в соленоїді пристрою для оброблення зразків ЗМП. Характерно, що при збільшенні частоти ЗМП вище $\nu = 300$ кГц спостерігали поступове зниження значень ω . Припускали, що це пов'язано із зменшенням значень магнітної індукції, як основної силової характеристики ЗМП, при збільшенні частоти.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що підвищення міцнісних показників характерне як для композитів, зшитих безпосередньо у змінному магнітному полі, так і для композитів, що підлягали попередньому обробленню ЗМП, що добре узгоджується з роботами [7, 5, 8]. Оскільки в композитах, котрі оброблялись ЗМП на попередній стадії, орієнтація структурних елементів матеріалу частково втрачається через тепловий рух при екзотермічній реакції полімеризації після введення твердника, то можна припустити, що на зростання міцнісних характеристик має вплив не тільки орієнтація макромолекул та частинок наповнювача вздовж силових ліній ЗМП, а й інші процеси, а саме – підвищення ступеня зшивання матеріалу внаслідок інтенсифікації процесів зшивання у поверхневих шарах матриці через взаємодію магнітного поля феромагнітного наповнювача та дипольного моменту полярних макромолекул епоксидної смоли. З метою перевірки такого припущення проводили експериментальні дослідження ступеня зшивання від часу оброблення ЗМП визначенням вмісту гель-фракції у матеріалі методом Сокслета (рис. 2).

Відомо, що вміст гель-фракції у епоксидній матриці становить $G = 95 \%$ [9,7]. Введення в матрицю 30 мас.ч. дрібнодисперсного

наповнювача марки ферит призводить до збільшення вмісту гель-фракції на 1,5 % ($G = 96,5$ %). На першому етапі проводили дослідження вмісту гель-фракції у композитах, що підлягали попередньому обробленню ЗМП. Встановлено, що найвищий вміст гель-фракції характерний для таких композитів, котрі піддавали дії змінного магнітного поля протягом $t = (3,3-4,2) \cdot 10^3$ с. При цьому вміст гель-фракції підвищився на 1,2 % ($G = 97,7$ %).

На другому етапі проводили дослідження вмісту гель-фракції у композитів з аналогічним наповнювачем, котрі зшивали у ЗМП (рис. 2).

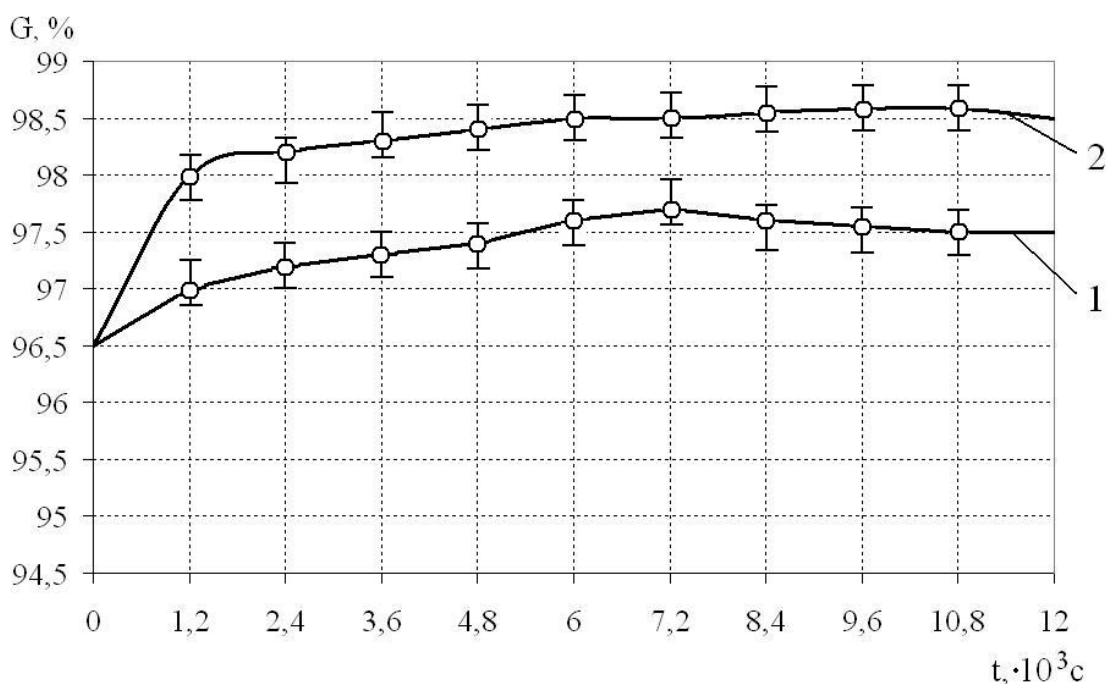


Рисунок 2. Залежність вмісту гель-фракції у зв'язувачі з феритовим наповнювачем від часу оброблення змінним магнітним полем: 1 – на попередній стадії (до введення твердника); 2 – у процесі зшивання.

Встановлено, що найвищий вміст гель-фракції для таких композитів досягається при обробленні змінним магнітним полем протягом $t = (9-10,8) \cdot 10^3$ с. При цьому вміст гель-фракції зростає на 2,2 % ($G = 98,7$ %). Як бачимо, оброблення композицій таким полем у процесі зшивання дозволяє отримати вищі показники вмісту гель-фракції порівняно із попереднім обробленням ЗМП. Експериментально встановлено (рис. 3), що для досягнення максимального значення вмісту гель-фракції потрібно обробляти епоксидну композицію в 2,6 рази довше, тривалістю біля $(9,6-10,8) \cdot 10^3$ с. Це можна пояснити тим, що при зшиванні композиції в ЗМП

макромолекули та надмолекулярні утворення поступово втрачають рухливість. Аналізуючи отримані результати можна стверджувати, що оброблення змінним магнітним полем в процесі зшивання епоксидних композицій на протязі $t = (9-10,8) \cdot 10^3$ с забезпечує кращі умови для отримання матеріалу із вищою степінню зшивання. Очевидно оброблення ЗМП при таких режимах є оптимальним для формування матеріалу з найвищим степінем зшивання.

Для підтвердження впливу обробки ЗМП на процес зшивання епоксидного зв'язувача проводили ІЧ-спектральний аналіз зразків КМ (рис. 3). Із усього набору хвильових чисел область частот $800 \div 900$ та $1200 \div 1300 \text{ см}^{-1}$ становить особливий інтерес, оскільки цим частотам відповідають валентні коливання груп епоксидного циклу олігомера та валентні коливання СО груп у епоксидній групі.

У зразків КМ, затверджених у ЗМП (рис. 3, крива в) спостерігали зміщення піку пропускання в область менших хвильових чисел на $2 \div 15 \text{ см}^{-1}$ в порівнянні із матеріалом, затвердженому за нормальних умов (рис. 3, крива а) при температурі $T = 293\text{K}$. Збільшення інтенсивності піку пропускання на ІЧ-спектрах поглинання свідчить про зміну структурних перетворень у матеріалі зв'язувача. При дії ЗМП на епоксидний олігомери у процесі структуроутворення, знижується відносний коефіцієнт пропускання Δ . Доведено, що це пов'язано зі збільшенням щільності низькомолекулярної області композиту, що призводить до підвищення його міцності.

На нашу думку, механізм дії ЗМП на структуру КМ полягає в активації дипольно-групової поляризації і, як результат, в зміні його топологічної структури, яка характеризує розподіл агломератів, їх густину. Зниження дефектності структури низькомолекулярної фракції і збільшення розмірів сіткових агломератів в структурі затвердженого матеріалу призводить до підвищення його міцності внаслідок збільшення ступеня зшивання матеріалу.



Рисунок 3. ІЧ-спектри поглинання епоксидної матриці при різних режимах обробки змінним магнітним полем: а – матриця, затверджена без обробки; б – матриця, при попередній обробці змінним магнітним полем; в – матриця, затверджена при дії змінного магнітного поля.

Такий ефект, на нашу думку, можна пояснити також і зниженням енергетичного бар'єру реакції затвердження олігомеру, за рахунок крутильних коливань дипольних молекул олігомера ЕД-20 і поліамінів (ПЕПА) електричним вектором електромагнітного поля, що створює додаткові умови для зшивання макромолекул.

Висновки. Доведено, що при зшиванні епоксидних композицій в змінному магнітному полі виникає орієнтований стан у структурі матеріалу та підвищується степінь зшивання. Вплив такої обробки на структуру матеріалу додатково підтверджено ІЧ-спектральним аналізом. Обґрунтовано доцільність застосування магнітного оброблення при зшиванні матеріалу, порівняно із обробленням на попередній стадії (до введення твердника). При цьому при обробці на попередній стадії спостерігали підвищення значення ударної в'язкості з $\omega = 7,5$ кДж/м² до $\omega = 11,61$ кДж/м², а при обробці в процесі зшивання з $\omega = 7,5$ кДж/м² до $\omega = 9,8$ кДж/м². При цьому оптимальна частота змінного магнітного поля становила $\nu = 100 \dots 200$ кГц.

Література

1. Полимерные композиционные материалы: Структура, свойства, технология: Учебное пособие / Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др.; Под общ. ред. А.А.Берлина. – М. : Профессия, 2008. – 557 с.
2. Крыжановский В.К. Технология полимерных материалов / Крыжановский В. К. – С-Пб. : Профессия, 2008. – 544 с.
3. Fortelny I., Zivny I. Theoretical description of steady droplet size in polymer blends containing a compatibilizer // Polymer. – 2000. – V.41. – P. 6865–6897.
4. Луцейкин Г. А. Полимерные электреты / Луцейкин Г.А. – (2-е изд., перераб. и доп.) – М. : Химия, 1984. – 183 с.
5. Кальба Є.М. Регулювання структури і властивостей полімеркомпозиційних зносо- та корозійностійких покриттів магнітною обробкою / Кальба Є.М., Букетов А.В. // Фізико-хімія конденсованих структурно-неоднорідних систем: матеріали ІІІ Всеукраїнської наукової

конференції “Функціональна та професійна підготовка фахівців з фізики”.
– Ч.ІІ. – К. : НПУ. – 1998. – С.104–107.

6. Букетов А.В. Вплив магнітної природи наповнювачів на реологічні властивості полімеркомпозиційних корозійностійких покриттів // *Машинознавство*. – 1999. – № 4. – С.61–62.

7. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах / Липатов Ю.С. – К. : Наукова Думка, 1980. – 260 с.

8. Середюк В.А. Синтез полімерного апретуючого покриття на поверхні $Al(OH)_3$ і $BaSO_4$ методом радикальної полімеризації у водній фазі / В.А. Середюк, В.С. Токарев, С.А. Воронов // *Доп. НАН України*. – 2000. – № 7. – С. 156-160.

9. Зубов П.И. Структура и свойства полимерных покрытий / Зубов П.И., Сухарева Л.А. – М. : Химия, 1982. – 256 с.

Petro Stuhlyak, Vitaliy Kartashov

**APPLICATION OF MAGNETIC FORCE FIELDS FOR REGULATION
OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY –
BASED POLYMER COMPOSITES**

Effect of the alternating magnetic field treatment on the physical, mechanical and performance characteristics of epoxycomposites has been investigated. The use of magnetic treatment has been found to provide ordering of components in the composition. This ordering remains after formation of the product out of the composition. The influence of different dispersion, physical and chemical nature of fillers on the physical-mechanical properties of epoxycomposites, modified by alternating magnetic field has been investigated. Magnetic treatment regimes have been proposed to improve the physical and mechanical properties.

Key words: epoxy oligomer, polyethylene polyamine, composite material, modification, particulate filler, hardener, disperse filler.

УДК 621.762

Валерій Лазарюк**ОСОБЛИВОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ
ТВЕРДОГО СПЛАВУ (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al**

Проведено комплексне дослідження та аналіз закономірностей високотемпературного окислення твердих сплавів (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al у інтервалі температур 1173 – 1393 К на повітрі з метою виявлення взаємозв'язків між кінетичними характеристиками приросту маси та структурою, морфологією, фазовим та хімічним складом окалини. Пошаровим рентгенофазовим аналізом у зовнішньому шарі окалини на зразках найбільш жаростійкого сплаву із 24 (мас.%) Ni-Cr виявлено, крім основної фази рутилу TiO_2 , також оксиди хрому Cr_2O_3 та ніобію Nb_2O_5 . Підшар окалини із оксидами титану, хрому та ніобію характеризувався високою щільністю та низькою пористістю. Виявлено, що утворення оксидів хрому та ніобію у окалинні приводить до інтенсифікації спікання рутильної окалини та уповільнення процесу утворення оксикарбідної фази $Ti(C_xO_y)$ у внутрішньому окисленому шарі, що суттєво зменшує швидкість окислення сплавів.

Ключові слова: карбід титану, твердий сплав на основі карбіду титану, високотемпературне окислення, окалина, дифузія.

Вступ. Тверді сплави на основі карбіду титану переважають стандартні тверді сплави WC-Co та WC-TiC-Co за жаростійкістю, що робить їх перспективними матеріалами для виготовлення різального інструменту для обробки металів із високою швидкістю різання, конструкційних деталей вузлів тертя, деталей твердооксидних паливних елементів, плазмових металокерамічних покриттів та інструментів зварювання тертям [1-4]. Жаростійкість твердих сплавів на основі карбіду титану підвищують легуванням карбідної складової та металевої зв'язки. З

цією метою в сплави вводять карбіди металів V-ої групи періодичної таблиці, а також хром, кремній та алюміній [5-7].

У даній роботі з метою виявлення особливостей високотемпературного окислення сплавів (Ti,Nb)C-Ni-Cr-Al проведено комплексне дослідження закономірностей зміни структури, морфології, фазового та хімічного складу окалини.

Матеріали та методи дослідження

Для дослідження використано сплави із постійним вмістом легуючої добавки карбіду ніобію і дисперсної добавки нітриду алюмінію та різним вмістом нікель-хромової зв'язки 10, 18, 24 мас.% при постійному співвідношенні Ni : Cr = 3 : 1 [5].

Зразки для дослідження отримували за технологією порошкової металургії, що включала мокре розмелювання протягом 72 годин, холодне пресування та спікання у вакуумі. Для досліджень використовували шліфовані циліндричні зразки висотою 10 мм та діаметром 8 мм.

У вихідному стані мікроструктура сплавів дрібнозерниста із середнім розміром зерен 0,7-1,0 мкм. Металографічним та мікрорентгеноспектральним методами аналізу встановлено наявність кільцевої структури карбідних зерен. В центрі зерен розміщений карбід титану, а по периферії - твердий розчин карбідів титану, ніобію та хрому. Металічна зв'язка є твердим розчином титану, хрому та ніобію на основі нікелю. Рентгенівським аналізом в структурі сплаву виявлені наступні фази (Ti, Nb)C, Ni, Cr₇C₃ [5].

Дослідження жаростійкості сплавів проведено за приростом маси зразків, які досліджували методом термогравіметричного аналізу на приладі "Деріватограф-1500Q" в ізотермічних умовах на повітрі при температурах 1173К, 1223 К, 1273 К, 1393 К протягом шести годин.

Структуру окалини досліджували на поперечних та "косих" шліфах, а також на її зламах. Рентгенофазовий аналіз окремих шарів окалини проводили на дифрактометрі "ДРОН-4" в монохроматичному Cu-K_α випромінюванні. Дослідження структури окалини та фактографічний аналіз її зламу проводили на оптичному мікроскопі МИМ-10, мікроскопі

мікротвердоміра ПМТ-3 та растрових електронних мікроскопах “Самscan 4DV” та РЕМ-106И. На скануючих електронних мікроскопах виконували також мікрорентгеноспектральний аналіз окалини. Вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 50 та 100 г.

Кінетика окислення

Кінетичні криві окислення сплавів показані на рисунку 1.

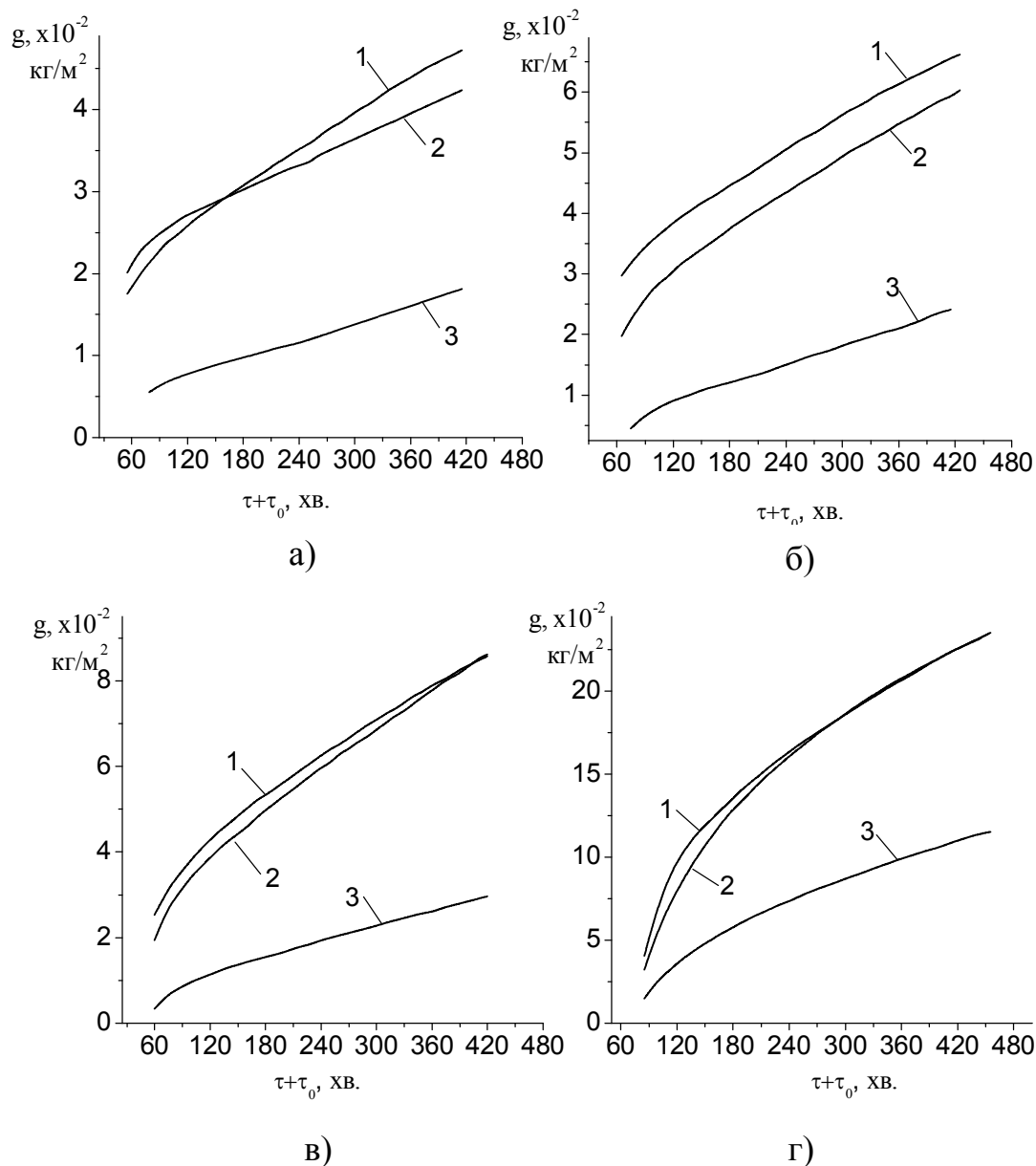


Рисунок 1. Залежність питомого приросту маси g сплавів $(Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al$ із вмістом $Ni-Cr$ зв'язки 1 - 10, 2 - 18; 3 - 24 мас.% від тривалості нагріву $\tau + \tau_0$ при температурах 1073 К (а), 1173 К (б), 1273 К (в) та 1393 К (г).

Питомий приріст маси окислених зразків g (10^{-2} кг/м²) при

температурах 1173-1393 К найменший у сплаву з 24 % Ni-Cr зв'язки і не перевищує при температурах 1273 К та 1393 К за шість годин відповідно $2,97 \cdot 10^{-2}$ кг/м² та $11,4 \cdot 10^{-2}$ кг/м². Для порівняння, питомий приріст маси компактних зразків карбиду титану та сплаву марки ТН-20 за шість годин [4, 8] становив відповідно при температурі 1273 К – $3,7 \cdot 10^{-2}$ кг/м² та $8,0 \cdot 10^{-2}$ кг/м², а при температурі 1393 К – $11 \cdot 10^{-2}$ кг/м² та $22 \cdot 10^{-2}$ кг/м². Отримані результати показали вищу стійкість до високотемпературного окислення досліджуваного сплаву за промисловий аналог – сплав ТН-20 (TiC-Ni-Mo).

Кінетика окислення протягом перших 1,5-2 годин добре описується логарифмічним рівнянням, а далі лінійним. Після 3 годин окислення для опису залежностей також було використано параболічне рівняння [9].

Таблиця 1.

Константа швидкості окислення (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al сплавів k_3 , мг²·хв²/см⁴

Вміст Ni-Cr зв'язки, % (мас.)	Температура окислення, К			
	1173	1223	1273	1393
10	0,0393	0,0962	0,2076	1,347
18	0,0567	0,0923	0,2307	1,392
24	0,0133	0,0193	0,0267	0,349

Порівняння констант швидкості окислення сплавів із різним вмістом Ni-Cr зв'язки показує відмінність швидкості окислення сплавів із 10 та 18 % Ni-Cr зв'язки та сплаву із 24 % Ni-Cr (таблиця 1). Швидкість окислення сплаву із 24 % Ni-Cr зменшується при 1273 К та 1393 К, у 8,21 та 3,92 рази [5].

Позірна енергія активації у температурному інтервалі 1173 – 1273 К дорівнює 218, 174 та 86 кДж/моль, відповідно для сплавів із 10, 18 та 24 %(мас.) Ni-Cr зв'язки [9]. В температурному інтервалі 1273-1393 К значення енергії активації становили 218, 220 та 316 кДж/моль, відповідно для сплавів із 10, 18 та 24 %(мас.) Ni-Cr зв'язки [9]. Позірна енергія активації при температурі 1393 К для сплаву із 24 %(мас.) Ni-Cr зв'язки на

відміну від сплаву із 10 %(мас.) Ni-Cr зв'язки збільшується у порівнянні із температурним інтервалом 1173-1273 К в 3,6 рази, що вказує на зміну механізму процесу окислення.

Структура, склад та морфологія окислених шарів

Оцінка жаростійкості сплавів на основі карбідів металів тільки за величиною питомого приросту маси зразків не показує реальну картину процесу окислення, оскільки крім збільшення маси зразка, що обумовлено утворенням оксидів, відбувається зменшення його маси за рахунок видалення газоподібних продуктів окислення. Тому важливим є дослідження зміни товщини окалини та її структури.

Металографічними дослідженнями поперечних та косих зрізів зразків виявлено [5], що структура окалини на даних сплавах складається з зовнішнього *I* та внутрішнього *III* окислених шарів, див. рис. 2. Така структура є типовою для високотемпературного окислення карбиду титану. При тривалій витримці у окалині за ознаками кольору, пористості, мікротвердості, фазового та хімічного складу також виділено проміжний шар *II* (рис.2).

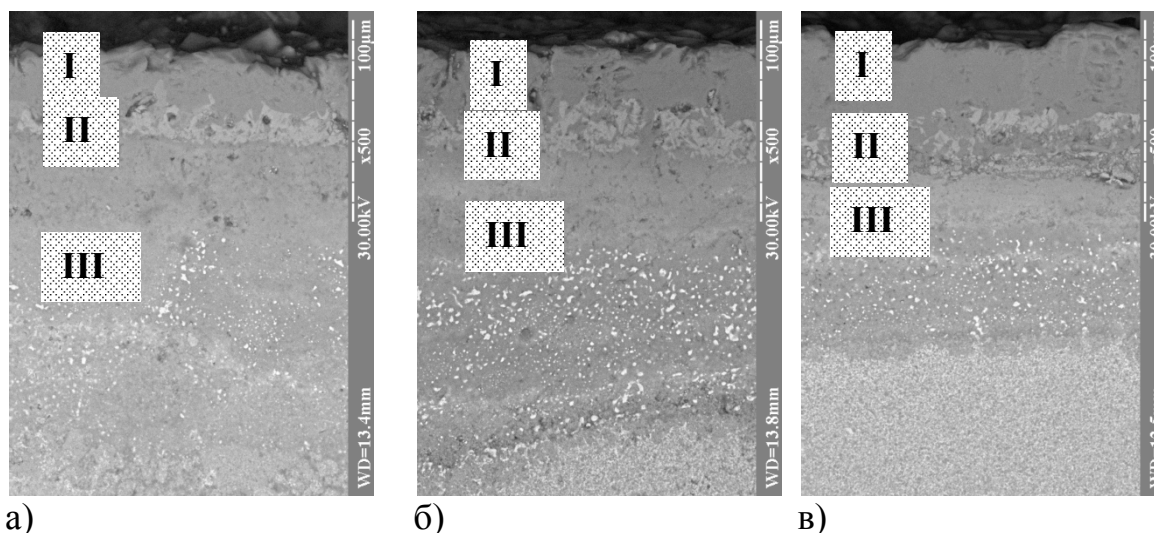


Рисунок 2. Поперечний зріз окалини на сплавах (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al з 10 (а), 18 (б) та 24 (в) %(мас.) Ni-Cr. Температура окислення 1393 К, тривалість окислення 6 годин.

Основною складовою окислених шарів є діоксид титану TiO_2 (рутил). Особливістю внутрішнього шару є наявність фаз перехідного складу TiO_{2-x} та твердого розчину на основі нікелю. З метою дослідження фазового складу поверхні сплаву окисленого при 1393 К було проведено пошаровий

рентгенівський аналіз, таблиця 2.

Виявлено, що зовнішній окислений шар утворює також складний оксид титану та нікелю NiTiO_3 , а проміжний підшар є багатофазною оксидною системою з наступними фазами: TiO_2 , Ti_2O_3 , NiTiO_3 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 . Із збільшенням вмісту Ni-Cr зв'язки до 18-24 мас.% у окаліні з'являється оксид хрому Cr_2O_3 .

Вимірювання мікротвердості показали вищі середні значення зовнішнього окисленого шару, ніж внутрішнього, відповідно 8,4–10,8 ГПа та 5,2–7,9 ГПа, що відповідає мікротвердості рутилу у окаліні [11]. На окремих точкових ділянках мікротвердість підвищується до 12,1-13,5 ГПа, що близько до мікротвердості компактного діоксиду титану 12-16 ГПа [12].

Таблиця 2.

Фазовий склад окислених шарів (температура 1393 К, тривалість 6 годин)

Окислений шар	Вміст Ni-Cr зв'язки, мас. %		
	10	18	24
Зовнішній (поверхня)	TiO_2 , NiTiO_3	TiO_2 , NiTiO_3	TiO_2 , NiTiO_3
Проміжний підшар	TiO_2 , Ti_2O_3 , Nb_2O_5 , NiTiO_3	TiO_2 , Ti_2O_3 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3	TiO_2 , Nb_2O_5 , Ti_2O_3 , Cr_2O_3
Внутрішній (межа з проміжним підшаром)	TiO_{2-x} , Ni , TiO	TiO_{2-x} , Cr_2O_3 , Ni , Nb_2O_5 ,	TiO_{2-x} , Cr_2O_3 , TiC , Ni , Ti_2O_3 , Nb_2O_5
Основа зразка	$(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$, Ni , Cr_7C_3	$(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$, Ni , Cr_7C_3	$(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$, Ni , Cr_7C_3

Найвищу мікротвердість 10-12 ГПа у всіх сплавів виявлено у проміжного шару, у ньому також немає металопоподібних виділень та у його фазовому складі спостерігаються оксиди Nb_2O_5 , Cr_2O_3 . Даний шар формується після 2-4 годин окислення.

На рис. 3 показано залежність структури та товщини окислених шарів від вмісту нікель–хромової зв'язки та температури окислення при тривалості

витримки 6 год. З підвищенням температури загальна товщина окалини на всіх сплавах зростає, і при 1273 К складає 85 мкм для сплаву з 10%(мас.) Ni-Cr, 45 мкм для сплаву з 18 % Ni-Cr та 35 мкм для сплаву з 24 % Ni-Cr, відповідно при 1393 К: 210, 170 та 155 мкм. З підвищенням вмісту нікель-хромової зв'язки у сплаві з 10 % до 24 % загальна товщина окалини зменшується при усіх досліджених температурах окислення, при цьому значно зменшується товщина внутрішнього окисленого шару при 1273 К у 1,3–1,8 рази, а при 1393 К у 1,7–2 рази. Структура зовнішнього окисленого шару усіх сплавів є подібною, проте його товщина з підвищенням вмісту зв'язки збільшується, що свідчить про зростання ролі дифузії іонів металів до окислюючої атмосфери. Основною відмінністю окалини на різних сплавах є товщина внутрішнього окисленого шару.

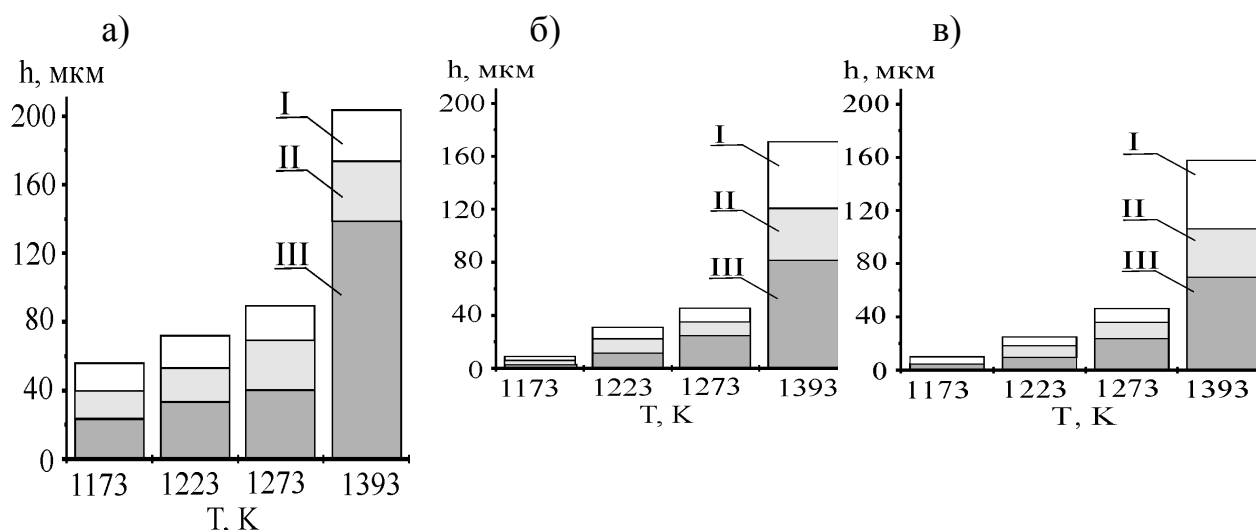


Рисунок 3. Будова та товщина окалини на сплавах (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al із вмістом Ni-Cr зв'язки, (мас)%: а) 10; б) 18; в) 24. Тривалість окислення – 6 год.

I, II – зовнішній шар, II – проміжний підшар, III – внутрішній шар.

У внутрішньому окисленому шару спостерігається структура оксикарбідного каркасу, яка за ознаками фазового контрасту серцевини окислених карбідних зерен нагадує вихідну структуру карбідної основи. Особливістю виявленої структури на межі розділу окалина - сплав є окислені карбідні зерна титану та ніобію (див табл.2, рис.3, табл. 3) або їх конгломерати, що оточені оксидами компонентів сплаву та округлими металопоподібними включеннями на основі Ni, Ti та Nb (див. табл.1, рис. 3, табл. 3). Характер структури внутрішнього окисленого шару також

показує особливості розподілу металічної зв'язки між карбідними зернами та їх конгломератами, рис. 2.

У внутрішньому шарі нікель присутній у металоподібних округлих включеннях (рис. 2, табл. 3). Дослідження границі розділу окалини-сплав підтверджує те, що окислення починається в першу чергу з металів зв'язки, оксиди яких на границі розділу окалини – сплав розміром 4-8 мкм, оточують неокислені карбідні зерна (рис.4).

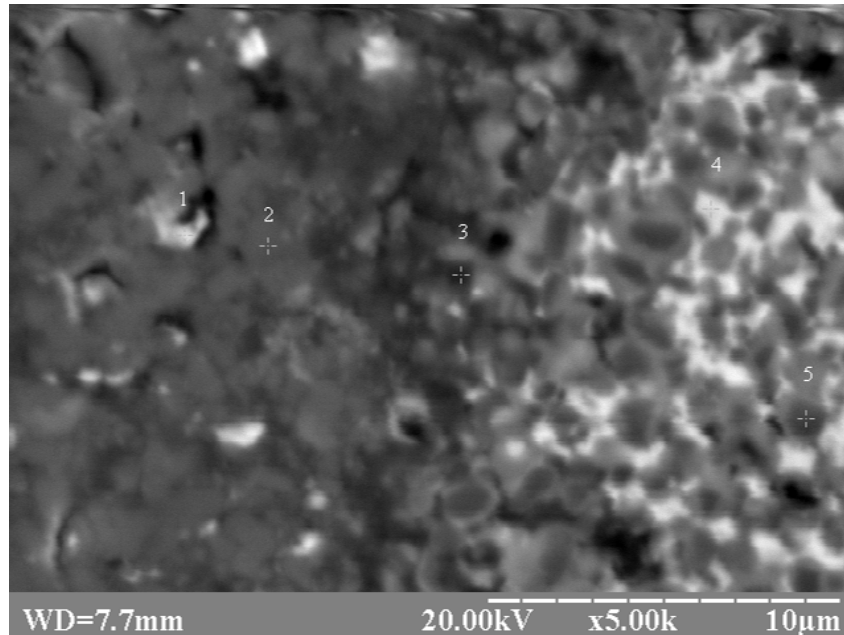


Рисунок 4. Границя розділу окалини–сплав (у структурі сплаву: біла фаза – металічна зв'язка, темна та сіра фаза – карбідні зерна) на сплаві (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al з 18 мас.% Ni-Cr. Температура окислення 1393 К, тривалість 6 годин.

Особливістю окислення металокерамічних сплавів є різні механізми окислення їх тугоплавкої та металічної фаз та формування окалини. Окислення металічної фази, що є твердим розчином компонентів сплаву на основі нікелю, починається з температур близько 500 °С. Окислення карбіду титану значно інтенсифікується вище 800-900 °С [2, 6]. В результаті дифузії іонів титану та металів зв'язки у перші години окислення утворюється більше 50% зовнішнього шару окалини над вихідною поверхнею [7].

Таблиця 3.

Результати МРСА в окремих фазах сплаву на границі розділу окалини–сплав на рис. 4

	1 - мет. включ.	2 - сіра фаза, ок.	3 - темна фаза, ок.	4 - звязка, біла фаза	5 - зерно, темна фаза
Ti	11,17	21,79	30,62	24,92	41,90
Nb	8,52	13,48	5,45	9,99	3,54
W	8,80	1,81	3,21	6,16	3,71
Ni	34,02	1,64	1,52	41,17	6,78
Cr	0,66	0,90	1,10	1,59	0,71
Al	0,12	0,24	0,91	0,22	0,33
Fe	1,07	0,11	0,03	1,07	0,17
O	33,82	53,81	54,19	12,02	33,21
C	1,82	0,22	2,99	2,86	3,66

Особливості механізму окислення (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al сплавів

Окислення карбіду титану відбувається через розчинення кисню в його кристалічній ґратці та утворення оксикарбідних фаз $Ti(C_xO_y)$, кількість яких збільшується з ростом температури [8, 13]. При подальшому окисленні карбідів титану та ніобію спостерігається виділення CO [15]. Головними компонентами окислених шарів досліджуваних сплавів є діоксид титану та оксикарбідні фази титану (табл.2).

Окислення карбідів хрому відбувається за механізмом, у якому відсутня стадія утворення оксикарбідних фаз. Спочатку відбувається розчинення кисню в карбіді хрому, а далі окислення проходить за найбільш імовірними реакціями з виділенням металічного хрому та оксидів вуглецю [6].

Виділення газів CO та CO₂ приводить до руйнування суцільних окислених шарів та утворенні пористості, що є причиною зменшення жаростійкості металокерамічних сплавів на основі карбідів. З іншого боку утворення пористості також є характерною особливістю окислення титану та його сплавів внаслідок переважаючої дифузії титану до зовнішньої поверхні [7, 15].

Мікрорентгеноспектральний аналіз, проведений на межі розділу шарів, що виявлені на зламі зразку сплаву з 24 мас.% нікель-хромової зв'язки (рис. 5), дозволив виявити характер міжфазової взаємодії у окислених шарах (табл. 4). На межі розділу внутрішній окислений шар – сплав виявлено підвищену концентрацію хрому. Виявлена підвищена концентрація хрому 19,56 ат.% (табл. 4) у внутрішньому окисленому шарі сплаву з 24 мас.% зв'язки у 3 рази більша, ніж у основі сплаву, та у 2-2,5 рази більша, ніж концентрація хрому у такому ж шарі сплавів з 10 та 18 мас.% зв'язки. Це добре узгоджується з результатами робіт по дослідженню жаростійкості бінарних сплавів титану та хрому. У таких сплавах порогове значення концентрації хрому, що різко підвищує їх жаростійкість, становить 18% [2].



Рисунок 5. Злам окалини на сплаві (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al з 24 мас.% Ni-Cr. Температура окислення 1393 К, тривалість шість годин.

Згідно існуючих уявлень про механізм окислення металів у бінарних сплавах, компонент з великим спорідненням до кисню окислюється по внутрішньому фронту зони окислення ще в металічній фазі [7, 16]. Підвищення концентрації металу з великим спорідненням до кисню сприяє переходу його оксиду розподіленого в матричному металі у компактний та суцільний шар. Так, при підвищенні концентрації хрому до 11-20 % у Ni-Cr сплавах швидкість окислення різко зменшується, а окалина утворюється з паралельних шарів оксидів NiCr_2O_4 та Cr_2O_3 .

Таблиця 4.

Розподіл елементів Ti, Nb, Ni, Cr, Al в поверхневому шарі сплаву з 24 мас.% нікель-хромової зв'язки після шести годин окислення при 1393 К (точки аналізу згідно рис. 5).

Області аналізу	Концентрація елементів, ат.%				
	Ti	Nb	Ni	Cr	Al
Зовнішній окислений шар, т.4	94,11	0,32	2,12	0,38	3,07
Внутрішній окислений шар, т.3	81,02	0,19	9,17	6,84	2,78
Внутрішній окислений шар, т.2	69,75	8,46	0,55	19,56	1,68
Основа сплаву, т.1	52,48	7,16	32,82	6,86	0,69

Відомо, що при введенні 2-6 мас.% хрому до карбіду титану, приріст маси зразків в температурному інтервалі 650-1400 °С зменшується [2, с.265], а максимальна стійкість до високотемпературного окислення карбіду титану спостерігається при вмісті 5% Cr [2, с.261]. При цьому показано, що збільшення вмісту хрому приводить до зменшення товщини внутрішнього шару та сприяє покращенню зчеплення його з основою. Даний результат підтверджено у роботі [3], у якій показано, що при введенні 5-20 мас.% Cr₃C₂ у сплав TiC-Co швидкість його окислення зменшується. У роботі [17] виявлено, що окислення покриттів (Ti,Cr)N на початкових стадіях при 900 °С контролюється дифузією титану та кисню через щільний шар оксиду хрому. Утворення складних оксидів хрому та титану у внутрішній частині окалини виявлено також авторами робіт з дослідження високотемпературного окислення сплавів Ti(C,N)-Ni-Cr [18]. Утворення оксиду хрому також виявлено в окалині досліджуваних сплавів [19].

Відомо [20], що катіони з валентністю 3 і вище дифундують в рутилі по міжвузловому механізму, що включає одночасний рух міжвузлового катіону титану Ti⁴⁺ (Ti³⁺) та катіону домішки. Катіони хрому Cr³⁺ збільшують кількість міжвузлових катіонів Ti⁴⁺ титану в TiO₂ [21]. При цьому підвищується кількість кисневих вакансій [20], дифузія яких є лімітуючою стадією при спіканні рутилу [6, 7]. Таким чином, збільшується швидкість спікання зовнішнього шару рутилу та формується

спечений проміжний шар на основі оксидів титану, хрому та ніобію. При цьому експериментальні кінетичні дані після трьох годин окислення описуються параболічним законом (рис.1, табл.1). Енергія активації, розрахована з параболічних констант швидкості окислення, збільшується до 316 кДж/моль, що близько до енергії активації дифузії кисню або титану в рутилі [22].

Формування у окалині досліджуваного сплаву щільного спеченого шару на основі оксидів титану, хрому та ніобію зменшує дифузію титану та кисню, що уповільнює утворення, головним чином, внутрішнього окисленого шару. Зменшення парціального тиску кисню у внутрішньому окисленому шарі приводить до зміни термодинамічної рівноваги та швидкості реакцій на межі окалини із основою сплаву та до зменшення швидкості утворення оксикарбідних фаз титану.

Отже, підвищення жаростійкості досліджуваних сплавів на основі карбіду титану при збільшенні у ньому вмісту нікель-хромової зв'язки відбувається в результаті інтенсифікації спікання окалини, формування дифузійного бар'єрного шару з оксидів титану, хрому та ніобію та зменшення швидкості утворення оксикарбідних фаз на границі розділу окалина-сплав.

Література

1. Самсонов Г.В., Воронкин М.А., Линников А.П., Локтионов В.А. Безвольфрамовые твердые сплавы на основе двойных карбидов. II. Исследование физико-механических свойств сплавов // Порошковая металлургия. – 1976. – №12. – С.37-41.
2. Еременко В.Н. Титан и его сплавы. – К:Изд. АН УССР, 1960. – 500с.
3. Hinnuber J., Rüdiger O. und Kinna W. Über die Oxidation von Karbidlegierungen für Hochtemperaturzwecke // Plansee Seminar "De Re Metallica", 1955, P.142-163.
4. Пугач Э.А., Лавриненко Л.Н., Филипченко С.И. Окисление сплавов на основе карбида титана // Порошковая металлургия. – 1990. – N5. – С.63-68.
5. Лазарюк В.В. Розробка та дослідження жаростійких безвольфрамових твердих сплавів (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al: Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.16.06. – НТУУ "КПІ", – Київ, 2004. – 20 с.

6. Войтович Р.Ф. Окисление карбидов и нитридов. – К: Наук. думка, 1981.–192с.
7. Войтович Р.Ф., Головкин Э.И. Высокотемпературное окисление титана и его сплавов – К: Наук. думка. – 1984. – 256с.
8. Жилиев В.А., Любимов В.Д., Швейкин Г.П. Механизм фазовых превращений при окислении TiC на воздухе // Неорганические материалы. –1974. – №10. – С.47-52.
9. Бодров В.П., Бодрова Л.Г., Лазарюк В.В. Залежність кінетичних характеристик керметів на основі карбідів титану та ніобію від вмісту нікель-хромової зв'язки // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету. – 2000. – Вип.4. – С.30-34.
10. Lavrenko V.A., Glebov L.A., Pomitkin A.P., Protsenko T.G. High-temperature oxidation of titanium carbide in oxygen. Oxidation of Metals. – 1975. –№9(2). – P.171-179.
11. Чуприна В. Г. Изучение процесса окисления никелида титана II. Фазовый состав окарины // Порошковая металлургия. – 1989. – №6. – С.57-61.
12. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов. – М.: Металлургиздат, 1978. –478с.
13. Belucci A., Gozzi D., Latini A. Overview of the TiC/TiO₂ (rutile) interface // Solid State Ionics. – No 172. – 2004. – P. 369-375.
14. Аскарлова Л.Х., Жилиев В.А. Высокотемпературное окисление карбидов ванадия и ниобия при пониженных давлениях воздуха // Журнал неорганической химии. –1994. –Том 39, №7. –С.1105-1108.
15. Бай А.С., Лайнер Д.И., Слесарева Е.Н., Цыпин М.И. Окисление титана и его сплавов. – М.:Металлургия, 1970. – 320с.
16. Окисление металлов. Т.1. Теоретические основы. Под ред. Ж.Бенара. – М: Металлургия, 1967. – 499с.
17. Lee K.H., Jung S.J., Lee J.J., Park C. High-temperature oxidation behaviors of (Ti_{1-x}Cr_x)N coatings // J. Mat. Sci. Lett. – 2002. Vol. 21. – P.423-425.
18. Qingqing Yang, Weihao Xiong
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838810017317> - cor0005.
19. Shiqi Li et al. Early high temperature oxidation behaviour of Ti(C,N)-based cermets in air // Corrosion Science . – 2010. – Vol. 52, Issue 10. – P.

3205-3211.

20. Hoshino K., Peterson N.L., Wiley C.L. A study of oxygen self-diffusion on the c-direction of rutile using a nuclear technique // J.Phys.Chem. Solids. –1981. –N46. – P.1397-1411.

21. Baumard J.F., Tani E. Electrical properties and defect structure of rutile slightly doped with Cr and Ta // J. Solid State Chem. –1980. –32, №1.– P.105–113.

22. Sasaki J., Peterson N.L. Hoshino K. Tracer impurity diffusion in single crystal rutile (TiO_{2-x}) // J. Phys. Chem. Solids. – 1985. – No 46. – P.1267-1284.

Valeriy Lazaryuk

**PECULIARITIES OF HIGH TEMPERATURE OXIDATION OF
(Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al CERMET**

The paper presents the research of high temperature oxidation (Ti, Nb)C-Ni-Cr-Al cermets carried out at temperatures of 1173 to 1393 K in air. The interrelations between the weight gain, structure, morphology and phase composition of scale and oxidation mechanism were shown. The layered XRD analysis of scale for the most heat resistive cermet with the 24 (wt.%) Ni-Cr has revealed the presence of the chromium oxide Cr_2O_3 and niobium oxide Nb_2O_5 , in addition to base rutile phase TiO_2 , in sublayer of outer layer scale. The sublayer of scale was characterised by the high density and low porosity. It have been observed that the apperance of the chromium and niobium oxides between outer and inner scale layers leads to the intensification of sintering of rutile and decreases the rate of oxycarbide phase $\text{Ti}(\text{C}_x\text{O}_y)$ formation in inner oxidised layer, that results in the decreased oxidation rate of cermet.

Key worlds: titanium carbide, TiC-based cermet, high temperature oxidation, scale, diffusion.

УДК 539.12.04

Юрій Нікіфоров, Михайло Нищенко, Богдан Ковалюк**ВПЛИВ УМОВ ОПРОМІНЕННЯ ЛАЗЕРОМ В РЕЖИМІ
МОДУЛЬОВАНОЇ ДОБРОТНОСТІ НА МОРФОЛОГІЮ ПОВЕРХНІ:
АНАЛІЗ ТА ДЕЯКІ ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

В статті розглянуто вплив опромінення лазером на морфологію поверхні при генерації лазерних ударних хвиль. Проаналізовано фактори, які визначають точку зустрічі ударної та теплової хвиль, наведено результати досліджень морфології поверхні, мікротвердості та коефіцієнта відбивання матеріалів, які використовуються в світлотехніці.

Ключові слова: лазерні ударні хвилі, морфологія поверхні.

По мірі розширення можливостей лазерної техніки зростає інтерес до вивчення впливу лазерних ударних хвиль (ЛУХ) як помітної складової комплексної лазерної дії зі специфічними властивостями. На даний момент, на відміну від перших років створення потужних лазерів, дія ЛУХ вивчається не як руйнуючий фактор, а як один із методів модифікації матеріалів на промисловому рівні. При модифікації приповерхневих шарів матеріалу використовують ЛУХ малої амплітуди, що генеруються лазерами з потужністю $2 \cdot 10^{11}$ Вт/м² – $4 \cdot 10^{13}$ Вт/м². При відносно невеликих густинах енергії від 0,2 Дж/см² до 0,3 Дж/см² досягається тиск ударної хвилі, необхідний для змін властивостей матеріалів, коли опромінення здійснюється через прозоре конденсоване середовище (ПКС) лазером в режимі модульованої добротності. Експерименти по опромінюванню сталей при генерації ЛУХ показали збільшення корозійної стійкості різних типів сталей для різних типів агресивних середовищ [1, 2], а також зростання енергії руйнування зразків теплостійкої сталі [3, 4]. Останнє пояснюється перерозподілом напружень,

викликаних дією ЛУХ. Виявлено, що він залежить як від умов опромінення так і від їх початкового розподілу.

Для розширення області застосування лазерної ударно-хвильової технології з точки зору якості обробки поверхні важливе значення має аналіз її пошкоджень, пов'язаних з абляцією, зокрема: зміни маси зразка, його механічних та електрофізичних властивостей.

Маловивченим на даний момент лишається питання впливу складу енергетичного імпульсу (пічковість) на процес абляції і зміни рельєфу поверхні при лазерному опроміненні в ПКС в умовах виникнення ударних хвиль (УХ).

Для встановлення закономірностей змін рельєфу поверхні твердих тіл після дії потужних лазерних імпульсів різної пічковості, що супроводжується генерацією лазерних ударних хвиль малої амплітуди, представляє інтерес провести електронну мікроскопію поверхні матеріалів із помітно відмінними теплофізичними та акустичними властивостями та проаналізувати разом із результатами по абляції даних матеріалів на основі інших методів.

В даній роботі наведено результати досліджень поверхні матеріалів, що мають відмінні теплофізичні та оптичні характеристики до та після дії неодимового лазера з модульованою добротністю з густиною енергії до $2 \cdot 10^5$ Дж/м².

Опромінення проводилось на установці ГОС-1001 з LiF затвором за типовою схемою опромінення. Особливістю даних експериментів є опромінення на повітрі та в ПКС при одному та двох пічках в імпульсі. Прозоре конденсоване середовище обмежує розширення плазми, завдяки чому підвищується тиск ударної хвилі.

Про закономірності абляції судили на основі аналізу морфології поверхні за допомогою електронного мікроскопа і зважування зразків до та після опромінення. Окремі відмінності в експериментальних схемах, застосованих при вивченні абляції, були пов'язані зі специфікою розміщення зразків відносно лазерного джерела, фокусуючої системи та

системи індикації параметрів лазерного імпульсу, а також виду прозорого конденсованого середовища.

Опромінення матеріалів лазером в режимі генерації ударних хвиль, як і в інших режимах, перш за все, приводить до зміни поверхні зразка. Внаслідок перерозподілу енергії між ПКС та зразком в залежності від середовища, в якому здійснюється опромінення, на поверхні зразка в зоні дії імпульсу по-різному змінюється рельєф та структура. Важливий вплив на рельєф поверхні сталі при опроміненні в ПКС чинить пічковість лазерного імпульсу. Для повноти аналізу експериментів по впливу лазерних ударних хвиль зображення поверхні зразків, отримані за допомогою електронного мікроскопа РЕМ-106, вивчались при різних збільшеннях. Зразки опромінювались на повітрі або в епоксидній смолі. При малих збільшеннях видно, що рельєф поверхні міді має вигляд періодичних структур у вигляді витягнутих крапель. Розміри таких структур лежать в межах 20 – 60 мкм. Край зони опромінення матеріалів має вигляд застиглих хвиль неправильної форми із помітним їх різким згасанням на краю зони. При цьому на поверхні сталі, опроміненої в ПКС, спостерігається велика кількість дрібних пор. По краях розміри пор менші, ніж у центрі, а їх концентрація значно більша.

Слід відмітити, що утворення різноманітних хвилеподібних структур на поверхні, пов'язаних із капілярними хвилями, спостерігається і при опромінюванні поверхні металів потужними іонними пучками тривалістю в десятки наносекунд, для яких, як відомо, характерним є наявність ударно-хвильового фактору впливу на матеріал.

Так, в роботі [5] повідомляється про утворення хвилеподібної поверхні з довжиною хвилі 40 ± 5 мкм для магнію і 6 мкм для алюмінію (тобто практично близького порядку із тими, що спостерігається при дії на метали лазерного імпульсу густиною потоку $10^8 - 10^9$ Вт/см²). Характерно, що автори, аналізуючи свої результати, звертаються до робіт по морфології поверхні матеріалів після лазерного впливу. Таким чином, можна стверджувати, що при будь-яких типах концентрованих потоків енергії при досягненні густини потоку, достатньої для виникнення

ударних хвиль, утворюються зміни рельєфа, що пов'язані із капілярними силами.

Зміна морфології поверхні свідчить про зміну ролі механізмів абляції при переході в іншу область густин потоків лазерного випромінювання. Пояснити особливості морфології поверхні можна виникненням капілярних хвиль, що викликані різними нестійкостями опромінюваної поверхні при її нагріванні, плавленні, випаровуванні. Вони залежать від густини потоку енергії лазера та середовища, в якому здійснюється опромінювання, і характеру розподілу густини потоку енергії в зоні лазерного впливу [6-9]. По мірі наростання із часом густини потоку енергії лазерного імпульсу і відповідно енергії, поглинутої поверхнею зразка, механізми утворення періодичних структур при опромінюванні в ПКС змінюються. Як «затравочний» фактор, що впливає на зміни рельєфу поверхні, можуть розглядатись термокапілярні сили. Вони в основному впливають при відносно низьких інтенсивностях і величинах поглинутої енергії. При збільшенні інтенсивності починає помітніше впливати тиск віддачі. Це забезпечує додаткову розкачку капілярних хвиль і появу нових частот в спектрі коливань розплавленого шару поверхні. При досягненні максимального значення густини енергії на рух поверхневого розплавленого шару суттєво впливає імпульс віддачі, викликаний відльотом парів та крапель суміші метал-ПКС.

Приповерхневий шар речовини не тільки виноситься внаслідок абляції, але і розтікається по поверхні. Розтікання відбувається по-різному в залежності від умов опромінювання. Кількість винесеної маси при абляції в досліджуваному нами інтервалі густин потоку, коли мова іде про опромінювання на повітрі, зменшується при збільшенні густини потоку.

Збільшення густини потоку лазерної енергії веде до того, що зростає частина енергії, яка йде на нагрівання плазми. При цьому, як відомо, зростає швидкість розльоту, але зменшується маса випаровуваної речовини [10, 11]. Саме це і спостерігається в наших експериментах при опромінненні на повітрі. В однопічковому та двопічковому режимах

потужність за імпульс відрізняється дуже сильно при тій самій загальній енергії імпульсу лазера. Відповідно, відрізняється і випарувана маса.

Коли мова йде про опромінення в ПКС, то на абляцію значно сильніше впливає тиск плазми на поверхню. Він продовжує діяти після закінчення імпульсу до моменту відльоту ПКС. Це викликає рух рідкого шару мішені (опромінюваного матеріалу) по поверхні зразка у вигляді хвиль. Зростання густини потоку збільшує тиск на поверхню, а значить і кількість речовини (маси), яка розтікається у вигляді термокапілярних хвиль по поверхні зразка. При опроміненні в ПКС, внаслідок затримки відльоту плазми, збільшується товщина розплавленого шару. Однак, як показали експерименти, це не викликало збільшення винесеної маси при абляції. Дія плазми призводить до двох конкуруючих факторів: винесення речовини та її розтікання по поверхні зразка, що опромінюється. Можна вважати, що саме в експериментах по зважуванню спостерігаються відмінності при абляції як для різних матеріалів, так і для різних густин потоків енергії та пічковості. Крім того, на морфологію структури та винесення маси впливають не тільки неоднорідне нагрівання зразка внаслідок неоднорідності розподілу енергії по плямі, але і неоднорідність тиску віддачі при просторово неоднорідному випаровуванні з поверхні та залежність термокапілярних сил від температури [9], що супроводжує такий розподіл енергії.

Очевидно, на морфологію поверхні, в залежності від розмірів та геометрії зразка може впливати також хвиля розвантаження, відбита від тильної поверхні зразка, яка зустрічається із тепловою хвилею, що розповсюджується вглиб матеріалу із значно меншою швидкістю.

Визначення «точки зустрічі» ударної та теплової хвиль в матеріалі при обробці лазером в режимі модульованої добротності

При лазерній ударно-хвильовій обробці в матеріалі одночасно існують акустична (ударна) і теплова хвилі. При «зустрічі» цих двох хвиль в матеріалі можна чекати появи точкових дефектів та дислокацій [12, 6, 8].

Внаслідок різної швидкості розповсюдження теплової хвилі її зустріч з відбитою від тильної поверхні зразка ударною відбувається в приповерхневому шарі матеріалу.

При наявності прозорого конденсованого середовища проходження теплової хвилі пов'язане з екрануванням відлітаючою плазмою поверхні зразка та перерозподілом енергії за рахунок затримки відлітання плазми. Час дії теплової хвилі за рахунок ПКС залежить від товщини шару та роду матеріалу ПКС, а ударної хвилі – від товщини та роду матеріалу зразка. В більшості випадків за однаковий проміжок часу відстань, пройдена тепловою хвилею, набагато менша від пройденої ударною хвилею. Тому точка «зустрічі» теплової і ударної хвилі визначається координатою «зустрічі» хвилі температурного розподілу в матеріалі після опромінення в обраний нами момент часу та фронту ударної хвилі після її відбивання від тильної поверхні зразка.

Нехай тепла хвиля рухається по зразку із швидкістю

$$g = \sqrt{\frac{a}{\tau}} \quad (1)$$

де a – температуропровідність матеріалу, τ – тривалість імпульсу, а ударна хвиля з швидкістю c , тоді за час на протязі якого температурна хвиля розповсюдиться на глибину x (відповідний температурний розподіл буде $T(x)$), ударна хвиля пройде до тильної поверхні зразка, відіб'ється, і її фронт буде в даній точці. Маючи діаграму стану матеріалу та залежність $T(x)$, можна оцінювати особливості речовини в момент підходу відбитої ударної хвилі до точки з координатою x . Тобто точка зустрічі — це характерна точка, зафіксована на залежності $T(x,t)$. Характерними точками можуть бути точки, в яких відбуваються фазові перетворення 1-го чи 2-го роду, точки, що відповідають стадіям відпалу або рекристалізації тощо.

За допомогою комп'ютерного моделювання встановлено, що при опроміненні зразка з сталі товщиною 4 мм лазерним імпульсом тривалістю 50 нс в ПКС температура матеріалу більше 100°C досягається на глибинах порядку 15 мкм. За час досягнення такої температури на вказаній глибині в матеріалі поширюється ударна хвиля, після відбивання

від тильної поверхні зразка вертається до цієї глибини, викликаючи комплексний термомеханічний ефект у вигляді дифузійно-деформаційних та рекомбінаційно-деформаційних нестійкостей.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання показав, що зустріч теплової хвилі (амплітудне значення температури до 100°C) та ударної хвилі відбувається в приповерхневому шарі товщиною 20 мкм. На більших глибинах амплітудне значення температури менше 50 °С.

Це означає, що при опроміненні в ПКС зразка сталі на глибинах, більших від 20 мкм, пояснити зміни властивостей можна тільки впливом ударно-хвильового фактора лазерної дії. Експерименти, проведені в роботах [13, 9] підтвердили правильність наших розрахунків. Так, при дослідженні корозійної стійкості сталі 15Х13МФ в рідкому кислотному середовищі підвищення корозійної стійкості спостерігалось на глибині більше 50 мкм. Швидкість корозії залежала від глибини і поділялась на 3 характерних ділянки: підйом, спад, підйом. В області 5 – 20 мкм вона спадала [13]. Ця область відповідає точці зустрічі теплової і ударної хвиль. Про спільну дію теплової і ударної хвиль свідчать і результати роботи [14], де вивчався розподіл дефектів в армко-залізі по глибині методом електрон-позитронної анігіляції. Зразки опромінювались лазером ГОС-1001 з LiF затвором в режимі модульованої добротності. За межами зони чисто термічного впливу визначався розподіл дефектів методом електрон-позитронної анігіляції. Він виявився нелінійним по глибині для всіх зразків і залежав від товщини зразків. Останнє відповідає залежності точки зустрічі теплової і ударної хвиль (глибини) і часу проходження ударної хвилі в матеріалі.

Результати експериментів підтверджують також наявність додаткового впливу неоднорідності розподілу енергії лазерного імпульсу в режимі модульованої добротності на рельєф поверхні зразків у випадку роботи із Li-F модулятором добротності, що має дефекти.

Проведені експерименти свідчать, що опромінення лазером з модульованою добротністю забезпечує додаткові можливості для

створення періодичних структур на поверхні матеріалів. При цьому можна змінювати форму періодичних структур, змінюючи вид ПКС.

Розглянемо можливості застосування результатів лазерної ударно-хвильової обробки досліджуваних матеріалів, наприклад, у світлотехнічній промисловості, де такі матеріали як мідь, сталь, алюміній широко використовуються для виготовлення складових частин різноманітних виробів.

Дослідження мікротвердості показали, що ударно-хвильовий режим лазерного впливу сильно змінює структуру приповерхневого шару зразків теплостійкої сталі та чистого алюмінію, не змінюючи її у міді. Типові результати змін мікротвердості для густини потоку випромінювання $Q = 24 \text{ Дж/см}^2$ [15] представлені в таблиці. Вимірювання мікротвердості здійснювались мікротвердоміром ПМТ-3.

Для сталі мікротвердість після опромінення в ПКС зросла в 2 рази, а для алюмінію – в 1,5 рази. Мікротвердість мідних зразків (електротехнічна мідь) практично не змінюється в межах похибки експерименту, хоча в деяких випадках спостерігалось зменшення мікротвердості міді після опромінення в ПКС (епоксидна смола).

Таблиця 1.

Мікротвердість опромінених матеріалів

Матеріал	Мікротвердість (МПа)		
	До опромінення	Після опромінення	
		ПКС	Повітря
Мідь	1350	1330	1320
Сталь	2200	4300	4500
Алюміній	460	720	705

Водночас корозійна стійкість досліджених мідних, сталевих і алюмінієвих зразків підвищується, що спостерігається і для інших матеріалів. Так, про підвищення корозійної стійкості сталей, титана, алюмінієвих сплавів та інших матеріалів після дії на них лазерних ударних хвиль повідомлялось також в роботах [16, 17].

Крім спеціальних експериментів, проведених в кислотних або лужних середовищах, це проявилось і в значному сповільненні окислення поверхні зразків, опромінених в ПКС, які зберігаються на повітрі за кімнатної температури.

У згаданих вище експериментах по лазерній ударно-хвильовій обробці сталі X18H10T-ВД опромінені зразки, наприклад, залишаються без видимих корозійних змін поверхні на протязі декількох років, в той час, як контрольні (неопромінені зразки) – помітно окислюються.

Аналіз морфології поверхні свідчить, що рельєф поверхні опроміненого матеріалу піддається також структурним змінам. Це означає, що коефіцієнт дифузного відбивання матеріалів при лазерній ударно-хвильовій обробці може змінюватись з двох причин: внаслідок зміни геометрії поверхні та зміни її структури. Саме тому аналіз відмінностей у видаленні речовини є важливим при дослідженнях коефіцієнта відбивання, як однієї з оптичних характеристик поверхні матеріалів, опромінених в різних режимах. Для даного дослідження було виготовлено і опромінено спеціальні зразки. Зміни коефіцієнта відбивання опроміненої частини зразка порівнювались з коефіцієнтом відбивання неопроміненої частини.

Таблиця 2.

Оптичні властивості опромінених матеріалів

Матеріал	Режим опромінення	Середовище опромінення	Коефіцієнт відбивання
Мідь	Неопроміненний		0,68
	Модульована добротність	повітря	0,59
		ПКС	0,61
	Вільна генерація	повітря	0,68
Сталь	Неопроміненний		0,65
	Модульована добротність	ПКС	0,60
		повітря	0,58
Алюміній	Неопроміненний		0,61
Алюміній толуол нанотрубками ³	Модульована добротність	ПКС	0,53

Як видно із результатів, представлених в табл. 2, при опроміненні міді та сталі коефіцієнт зменшується, при чому якщо опромінювати у ПКС, то коефіцієнт відбивання більший, ніж при опроміненні на повітрі.

Зокрема, при опроміненні міді в ПКС коефіцієнт відбивання зменшується на 15% в порівнянні із його величиною для неопроміненого матеріалу, в той час, як при опроміненні на повітрі ця зміна становить 13%.

При опроміненні сталі в ПКС коефіцієнт відбивання зменшується на 7% від його величини для неопроміненого матеріалу, а при опроміненні на повітрі – на 11%.

Слід відмітити, що для алюмінію, опроміненого в режимі модульованої добротності в толуолі з розчиненими нанотрубками, коефіцієнт відбивання різко зменшується при наявності впроваджених нанотрубок. Як видно з табл. 2, коефіцієнт відбивання зменшується на 0,08, що на 13% менше ніж коефіцієнт відбивання неопроміненого алюмінію.

Відмітимо важливий на нашу думку факт. Оскільки при лазерній ударно-хвильовій обробці в ПКС у досліджуваних оптично непрозорих матеріалах збільшується мікротвердість та корозійна стійкість, а коефіцієнт відбивання зменшується лише на 7 – 11 %, то великогабаритні вироби, виготовлені з такого типу сталі та міді, в місцях їх кріплення доцільно обробляти потужними лазерними імпульсами в режимі генерації ударних хвиль.

Література

1. Нищенко М.М., Ковалюк Б.П., Никифоров Ю.Н. Влияние ударных волн, генерируемых при воздействии наносекундных лазерных импульсов на фазовые превращения в стали X18H10T // Металлофиз. новейшие технол. –2004. – Т.26, № 9. – С. 1227-1240.

2. Peyre P., Carboni C., Forget P. et al. Enhancing corrosion resistance of stainless steel 304, using laser surface treatment // J. KEM. – vol. 384. – p. 157-183, 2007.

3. Ковалюк Б.П., Никифоров Ю.Н., Гладько В.Б., Марущак П.О. Изменение ударной вязкости разрушения сталей после обработки мощными импульсами лазера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: III Международная научно-техническая конференция (Минск, 15-17 октября 2008 г.): сб. материалов в 4 книгах. Книга 2. Высокоэнергетические технологии получения и упрочнения материалов и деталей машин. – Минск: ФТИ НАН Белоруси. – 2008. – С. 280-285.

4. Ясній П.В., Марущак П.О. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – С. 231.

5. Ковивчак В.С., Панова Т.В., Михайлов К.А. Изв.вузов 1/2, с.344-347, 2011.

6. Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А. Лазерное управление процессами в твердом теле // Успехи физ. Наук. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 3.

7. Ахманов С.А. Гусев В.А. Лазерное возбуждение сверхкоротких акустических импульсов: новые возможности в спектроскопии твердого тела, диагностике быстропротекающих процессов и нелинейной акустике // Успехи физических наук – 1992. – Т.162, № 3. – С. 3-87.

8. Емельянов В.И., Каримов К.М. Дефектно-деформационная модель образования поверхностных шероховатостей при лазерном облучении полупроводников и металлов // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, вып.6. – С. 84-88.

9. Никифоров Ю.Н., Ковалюк Б.П., Гладько В.Б., Марущак П.О., Мочарский В.С. Влияние наносекундного лазерного облучения, сопровождающегося генерацией ударных волн на сталь 15Х13МФ. – Материалы 7-й международной конференции „Взаимодействие излучений с твердым телом”. – Минск, Беларусь, 2007. – С.211-213.

10. Рэди Дж. Промышленное применение лазеров / Рэди Дж. — М.: Мир, 1981.— 638 с.

11. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1971. – 272 с.

12. Иванов Л.И. Эффект изменения электропроводности полупроводниковых кристаллов при прохождении ударной волны от импульса излучения ОКГ / Иванов Л.И., Никифоров Ю.Н., Янушкевич В.А. // ЖЭТФ. – 1974. – Т.67, № 7. – С. 147-149.

13. Янушкевич В.А. Эффект повышения коррозионной стойкости стали 15Х13МФ при облучении лазером в режиме генерации ударных волн / В.А. Янушкевич, Ю.Н. Никифоров, М.М. Нищенко, Б.П. Ковалюк, В.Б. Гладь, В.С. Мочарский // Перспективные материалы. – 2012. – №6. – С. 60-65.

14. Ковалюк Б.П., Лихторович С.П., Никифоров Ю.Н., Нищенко М.М. Распределение дефектов в армко-Fe по глубине при воздействии ударных волн, вызванных лазерным облучением / Б.П.Ковалюк, С.П.Лихторович, Ю.Н.Никифоров, М.М.Нищенко // Металлофизика. — 1992. — Т.14, №12. — С.43-49.

15. Маньовська О. Рельєф поверхні зразків, опромінених лазером в прозорому конденсованому середовищі / О. Маньовська, В. Мочарський, Ю. Нікіфоров // Матеріали II науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» ТНТУ ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 25 квітня 2012). – Тернопіль, ТНТУ, 2012 – С. 61.

16. Trdan U., Ocana J.I., Grum J. Surface evaluation of laser shock processed aluminium alloy after pitting corrosion attack with 3d metrology method // The 10th Intern. Conf. of the Slovenian Soc. for Non-Destructive Testing, Sept. 1-3, 2009, P.251-257

17. Yanushkevich V.A. Effect of improvement of corrosion resistance of 15Kh13MF steel irradiated by laser in shock wave generation mode // V.A. Yanushkevich, Yu.N. Nikiforov, M.M. Nishchenko, B.P. Kovalyuk, V.B. Glad'o, V.S. Mocharskii // Inorganic Materials: Applied Research – Vol. 4, Issue 2. – 2013. – P.160-164.

Yuriy Nikiforov, Mykhaylo Nishchenko, Bohdan Kovalyuk
INFLUENCE OF LASER IRRADIATION IN THE MODULATED
QUALITY FACTOR REGIME ON THE SURFACE MORFOLOGY:
ANALYSIS AND SOME PRACTICAL RECOMMENDATIONS

In the paper the influence of laser irradiation on the surface morphology at shock wave generation is discussed. Factors determining a point of shock and heat waves collision are analysed, results of surface morphology, microhardness and reflection coefficient studies for materials used in light engineering are presented.

Keywords: *laser shock waves, surface morfology.*

Михайло Петрик, Жак Фрессар, Дмитро Михалик

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЕТИТИВНОЇ ДИФУЗІЇ ГАЗІВ У ТВЕРДИХ ПОРИСТИХ ТІЛАХ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЗУЛЬТАТІВ NMR-АНАЛІЗУ

В роботі представлено результати ідентифікації коефіцієнтів дифузії для двох компонент (бензолу та гексану) як в міжчастинковому просторі так і в порах частинок, отримані з використанням високоефективного градієнтного методу ідентифікації, запропонованих моделей компетитивної та однокомпонентної дифузії а також експериментальних значень адсорбованих мас кожної з компонентів пористим цеолітним середовищем. Розподіли коефіцієнтів дифузії отримано як функції від часу для різних шарів мікропористого середовища.

Ключові слова: мікропористе середовище, коефіцієнти дифузії, компетитивна дифузія, математична модель

На сьогоднішній день неоднорідні нанопористі середовища широко використовуються в різних галузях індустрії: медицина, нафтохімія, каталіз, поділ рідин і газів та інші. Особливістю є те, що такі середовища складаються з тонких шарів частинок розгалуженої пористої структури, що володіють різними фізико-хімічними, в тому числі дифузійними властивостями. Кожен шар являє собою багаторівневу систему пор, з яких можна виділити дві підсистеми або простори: систему мікропор, що володіє високим ступенем адсорбційної місткості та низьким рівнем дифузійного проникнення (простір пористих частинок) і систему макропор і порожнин між частинками, що володіє низьким рівнем місткості і високою швидкістю проникнення (міжчастинковий простір)[1].

Численні дослідження, проведені цій області, стосувалися, як правило, молекулярного транспорту окремих речовин в пористої середовищі, де в основному розглядався масопереносу на макрорівні без істотного впливу ефектів і особливостей мікро- і нанопереносу в частинках, що є лімітуючим і визначальним чинником загальної кінетики. При цьому, найважливіші проблеми міжмолекулярної взаємодії, виходячи з принципу Ленгмюра- Хіншенвуда [2], що мають місце в реальних системах компетитивної дифузії двох і більше речовин, практично не досліджені. Тому дуже суттєвим є уточнення механізмів і визначення чинників кінетики таких систем та їх ідентифікація для кожної з взаємодіючих компонент.

Для ідентифікації кінетичних параметрів використовується математична модель, в якій процес компетитивної дифузії розглядається як система масопереносу двох дифундуючих між собою компонентів в неоднорідному середовищі частинок пористий структури, що викликає два види масопереносу: дифузія в просторі макропор, завдяки простору між частинками і дифузія в системі мікро- і нанопор внутрічастинкового простору. Неоднорідна каталітична область переносу складається з великого числа n тонких шарів, нанопоруватих частинок, розташованих перпендикулярно до напрямку вхідних потоків і пов'язаних між собою. Це є визначальним для неоднорідних тонких пористих зразків, особливо у випадку дифузії газу перед станом адсорбційної рівноваги з урахуванням системи багатоінтерфейсних взаємодій.

Математична модель системи компетитивного масопереносу в неоднорідному пористому середовищі з урахуванням зазначених фізичних факторів описується системою диференціальних рівнянь вигляду [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} U_{1_m}(t, z) \\ U_{2_m}(t, z) \end{bmatrix} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\begin{bmatrix} D_{\text{inter}_{1_m}} & D_{\text{inter}_{2_m}} \\ D_{\text{inter}_{2_m}} & D_{\text{inter}_{1_m}} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} U_{1_m} \\ U_{2_m} \end{bmatrix} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial r} \left(\begin{bmatrix} D_{\text{intra}_{1_m}} & D_{\text{intra}_{2_m}} \\ D_{\text{intra}_{2_m}} & D_{\text{intra}_{1_m}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{1_m}(t, r, z) \\ q_{2_m}(t, r, z) \end{bmatrix} \right) \Bigg|_{r=R}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} q_{1_m}(t, r, z) \\ q_{2_m}(t, r, z) \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\begin{bmatrix} D_{\text{intra}_{1_m}} & D_{\text{intra}_{2_m}} \\ D_{\text{intra}_{2_m}} & D_{\text{intra}_{1_m}} \end{bmatrix} r^2 \frac{\partial}{\partial r} \begin{bmatrix} q_{1_m} \\ q_{2_m} \end{bmatrix} \right), \quad m = \overline{1, n+1}, \quad (2)$$

в області $\Omega_m = \{(t, r, z) : t > 0, 0 < r < R, z \in (l_{m-1}, l_m)\}$,

з початковими умовами:

$$\begin{bmatrix} U_{1_m}(t, z) \\ U_{2_m}(t, z) \end{bmatrix}_{t=0} = 0; \quad \begin{bmatrix} q_{1_m}(t, r, z) \\ q_{2_m}(t, r, z) \end{bmatrix}_{t=0} = 0; \quad (3)$$

крайовими умовами:

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} q_{1_m}(t, r, z) \\ q_{2_m}(t, r, z) \end{bmatrix}_{r=0} = 0; \quad \begin{bmatrix} q_{1_m}(t, r, z) \\ q_{2_m}(t, r, z) \end{bmatrix}_{r=R} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{1_m}(t, z) \\ U_{2_m}(t, z) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \begin{bmatrix} U_{1_m}(t, z) \\ U_{2_m}(t, z) \end{bmatrix}_{z=0} = 0; \quad \begin{bmatrix} U_{1_m}(t, z) \\ U_{2_m}(t, z) \end{bmatrix}_{z=l} = \begin{bmatrix} U_{l_1}(t) \\ U_{l_2}(t) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

і умовами контакту по змінній z

$$\begin{bmatrix} U_{s_m}(t, z) - U_{s_{m+1}}(t, z) \\ \frac{\partial}{\partial z} U_{s_m}(t, z) - \frac{\partial}{\partial z} U_{s_{m+1}}(t, z) \end{bmatrix}_{z=l_m} = 0, \quad s=1, 2; \quad (6)$$

Система (1) – (2) складається з двох взаємопов'язаних підсистем. Підсистема (1) описує двокомпонентний масоперенос в мічастинковому просторі з поточними концентраціями U_1, U_2 . Підсистема (2) описує масоперенос в частинках з поточними концентраціями q_1, q_2 . Зв'язок між концентраціями U_1, U_2 і q_1, q_2 визначається правою частиною системи (1) і крайовими умовами (4), що описують адсорбційні рівноваги на поверхнях частинок

Розв'язок задачі (1)-(6) отримуємо з використанням операційного числення Хевісайда в зображеннях за Лапласом для функцій $U^*(t, z) \equiv L[U_i] = \int_0^\infty U(t, z) e^{-pt} dt$ та $q^*(p, r, z) \equiv L[q_i] = \int_0^\infty q(t, r, z) e^{-pt} dt$. [3].

$$U_{sm}(t, Z) = \left(I + \frac{2\pi R^2 D_{inter_{sm}}}{\Delta L D_{intra_{sm}} \Delta L^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{D_{intra_{sm}} \beta_{kn_m}^2}{R^2} t\right) \frac{n \left(\theta_{sm} \sin\left[\frac{n\pi}{\Delta L}(Z - L_{m-1})\right] + \theta_{s_{m-1}} \sin\left[\frac{n\pi}{\Delta L}(L_m - Z)\right] \right)}{(-1)^n \beta_{kn_m}^2 \left(\frac{3}{e_{inter_m}} \left(\frac{1}{\sin^2(\beta_{kn_m})} - \frac{ctg(\beta_{kn_m})}{\beta_{kn_m}} \right) + 2 \right)} \right) \quad (7)$$

$$q_{sm}(t, X, Z) = \left(\begin{aligned} & \left(1 + \frac{2\pi R^2 D_{inter_{sm}}}{\Delta L D_{intra_{sm}} \Delta L^2} \times \right. \\ & \left. \times \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{D_{intra_{sm}} \beta_{kn_m}^2}{R^2} t\right) \frac{n \cdot \sin(\beta_{kn_m} X) \left(\theta_{sm} \sin\left[\frac{n\pi}{\Delta L}(Z - L_{m-1})\right] + \theta_{s_{m-1}} \sin\left[\frac{n\pi}{\Delta L}(L_m - Z)\right] \right)}{(-1)^n \beta_{kn_m}^2 \sin(\beta_{kn_m}) \left(\frac{3}{e_{inter_m}} \left(\frac{1}{\sin^2(\beta_{kn_m})} - \frac{\cot(\beta_{kn_m})}{\beta_{kn_m}} \right) + 2 \right)} \right) \end{aligned} \right),$$

$$m = \overline{1, n+1}, \quad s = \overline{1, 2}, \quad (8)$$

де β_{kn_m} – корені трансцендентного рівняння:

$$\varphi_{s1}^2(\beta) \equiv \frac{3}{e_{inter_1}} \frac{\Delta L^2}{R^2} \frac{D_{intra_{s1}}}{D_{inter_{s1}}} \left(\frac{e_{inter_1}}{3} \frac{R^2}{D_{intra_{s1}}} \beta^2 - \beta \cot \beta + 1 \right) = \frac{2n-1}{2\Delta L} \pi, \quad n, k = \overline{1, \infty}. \quad (9)$$

Вважаючи, що коефіцієнти дифузії D_{inter_m}, D_{intra_m} задачі (1)-(6) невідомі, але на поверхнях D відомі сліди розв’язків (концентрацій).

$$U_{s_m}(t, z)_{\gamma_m} = f_{s_m}(t, z), \quad \bar{q}_{s_m}(t, z)_{\gamma_m} = g_{s_m}(t, z); \quad s = \overline{1, 2}, \quad (10)$$

де $\bar{q}_{s_m}(t, z) = \frac{1}{R} \int_0^R q_{s_m}(t, r, z) dr$ – усереднене значення концентрації дифундовоаної компоненти в мікропорах частинки, зосереджене в її центрі $r = 0$.

Таким чином, отримуємо задачу (1)-(5), (10), що полягає в знаходженні функцій $D_{intra} \in D, D_{inter} \in D$, де $D = \{v(t, z): v|_z \in U(z), v > 0\}$.

Функціонал-нев’язки, що визначає величину відхилення шуканого розв’язку від слідів розв’язку на поверхні D запишеться у вигляді [6]:

$$J_s(D_{inter_{sp}}, D_{intra_{sp}}) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{n+1} \int_0^T \rho_m(\tau) \left\| U_{s_m}(\tau, z, D_{inter_{sp,m}}, D_{intra_{sp,m}}) + \bar{q}_{s_m}(\tau, z, D_{inter_{sp,m}}, D_{intra_{sp,m}}) - (f_{jm} + g_{jm}) \right\|_{L^2(\gamma_m)}^2 d\tau, \quad (11)$$

де $\|\varphi\|_{L^2(\gamma_m)}^2 = \int_{\gamma_m} \varphi^2 d\gamma_m$ – квадрат норми. В даному випадку $\|\varphi\|_{L^2(D)} = \|\varphi(t, z)|_{z=D}$.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалася магнітного резонансу (NMR), техніка реалізації якої приведені належить Leclerc S., Trausch G., Cordier B., Grandclaude D., Retournard A., Fraissard J. та Sanet D. [2]. Запропонована методика досліджень базується на покроковому вертикальному NMR – скануванні вибраної області неоднорідного каталітичного середовища в процесі адсорбції ним речовини. Фактична досліджувана область обмежується дуже тонким

шаром. Тому можна одержати залежність концентрації газу, поглинутого на кожному шарі, як функцію часу.

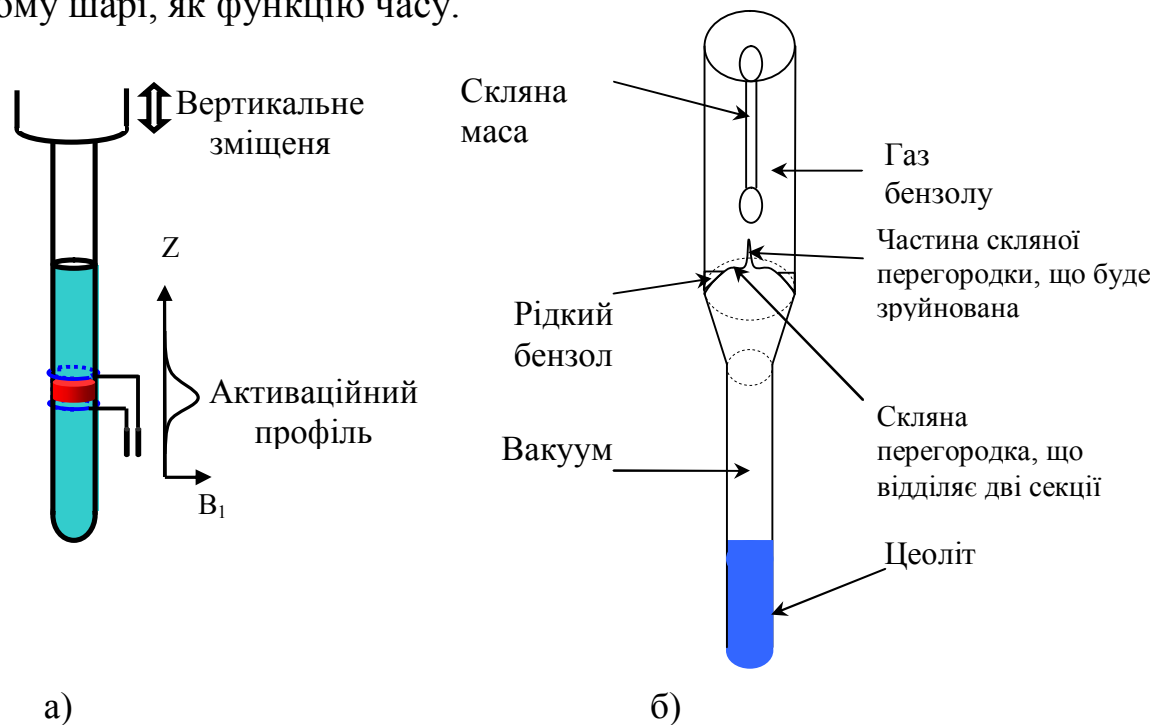


Рисунок 1. Принцип експерименту

а) схема проведення експерименту; б) будова експериментальної ампули

Проведення експерименту базується на виборі масиву з декількох секцій в різних частинах досліджуваного зразка вздовж координати Z (рис. 1а) і отримання для кожної такої секції неоднорідного середовища спектру, який відповідає складу зразка в цьому місці. Такий підхід є досить цікавим для випадку неоднорідних зразків і особливо для випадку дифузії газу при досягненні адсорбційної рівноваги.

Дана система дозволяє одержати необхідне зміщення зразка для проведення таких експериментальних досліджень. В експерименті використовується значення кроку рівне 50 або 100 мкм, що значно менше, ніж значення розміру секції, яке складає 0,5 - 2 мм. Тому, одержаний спектр відповідає перекриванню 10 – 20 елементарних секцій (під елементарною секцією розуміється секція, товщина якої дорівнює кроку). В [2] розроблений алгоритм, який дозволяє реконструювати спектр для кожної елементарної секції зі спектра виміряного для кожної позиції досліджуваного зразка. Після випробувань цього методу з допомогою різних випробувальних зразків на багат шарових неоднорідних

матеріалах, цей метод був застосований для дослідження кінетики адсорбції газоподібних бензену та гексану в неоднорідних нанопористих цеолітних каталізаторах [3].

В результаті проведення серії експериментальних досліджень, отримано NMR зображення системи внутрікристалітної компетитивної дифузії при нерівномірному розподілі компонент в неоднорідному нанопористому каталітичному середовищі та виконано їх обробку для представлення у вигляді числових та графічних розподілів інтегрального значення поглинутої маси адсорбтиву. Вимірювання проводилося для 14 різних положень в неоднорідному цеолітному середовищі, що дозволяє прослідкувати зміну інтегральних показників при русі вглиб пористого пласту.

На рисунку 2 наведено експериментальні дані адсорбції.

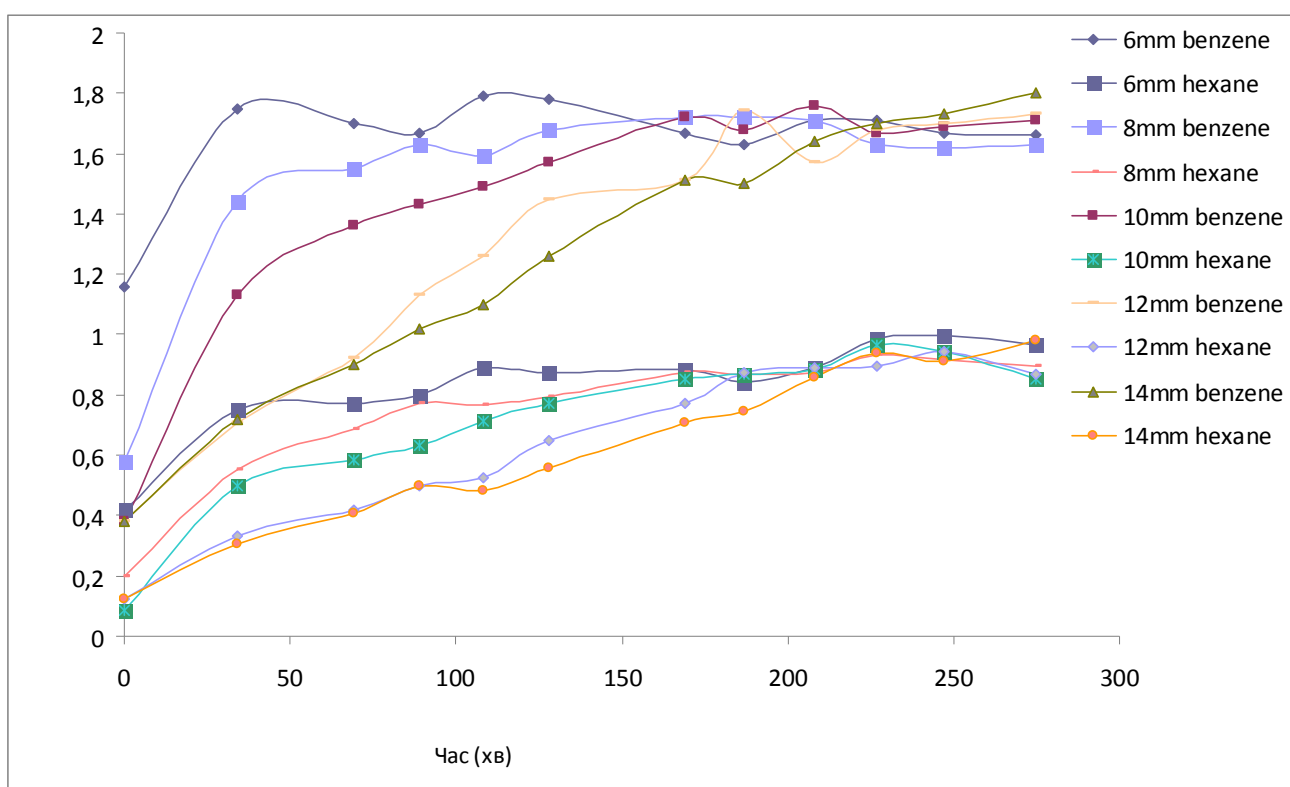


Рисунок 2. Результати NMR-аналізу процесу дифузії газів бензол та гексан

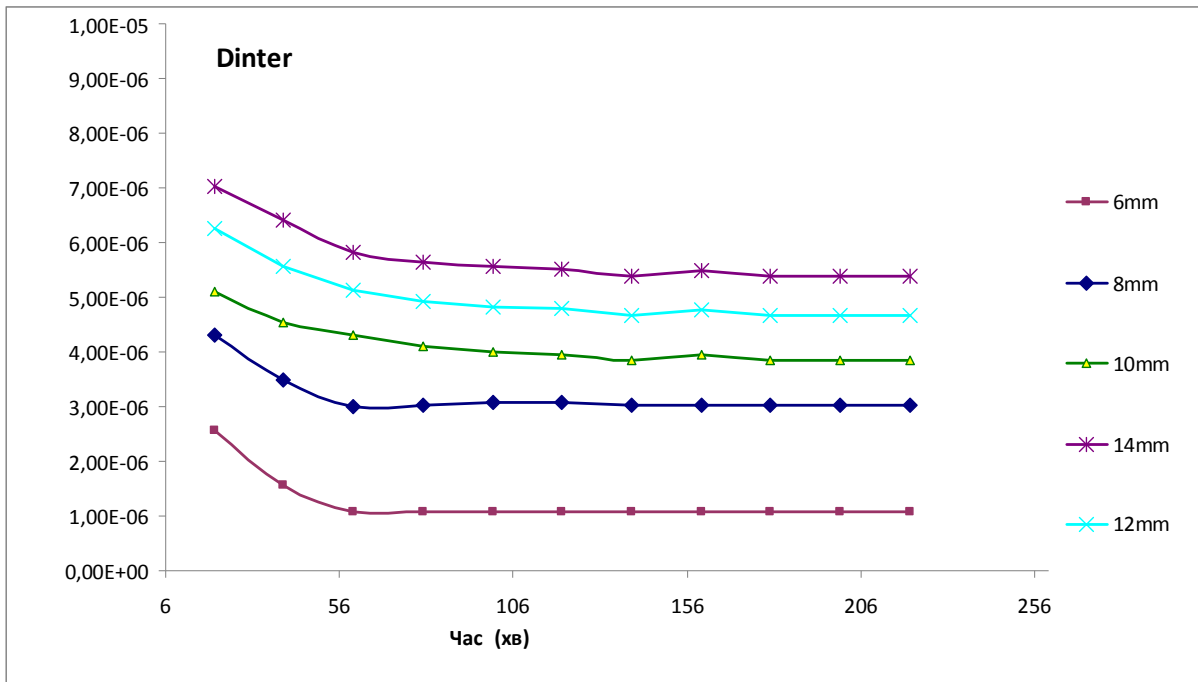


Рисунок 3. Розподіл коефіцієнтів дифузії $D_{inter,k}$ в міжчастинковому просторі для процесу дифузії бензолу

Відновлені розподіли коефіцієнтів дифузії $D_{intra,s,k}$ та $D_{inter,s,k}$ представлено на рисунках 3–6 як функції від часу для п'яти різних положень адсорбційного шару в пористому середовищі, що відповідають 6, 8, 10, 12, 14 мм. З отриманих результатів видно, що розподіли коефіцієнтів дифузії в частинках мають псевдо-експоненціальний характер та змінюються в межах від $8e-12$ до $1e-11$. Коли процес дифузії досягає часової відмітки в 140-170 хв, спостерігається відносно випрямлення профілів, що пояснюється наближенням до стану рівноваги в шарі пористого середовища.

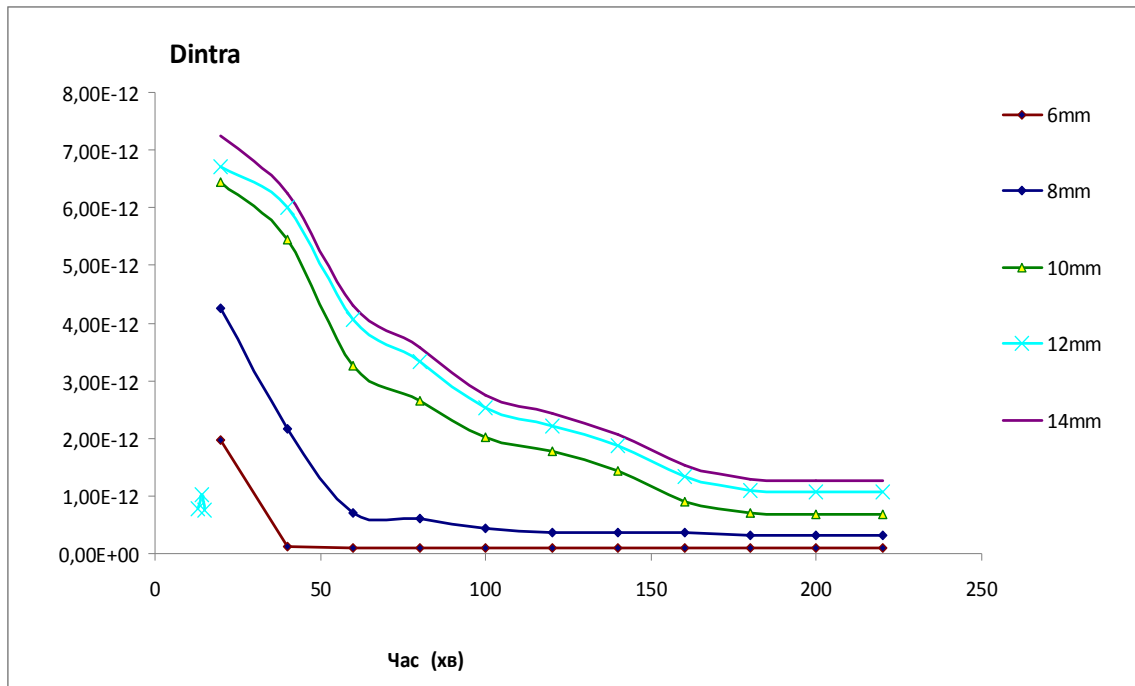


Рисунок 4. Розподіл коефіцієнтів дифузії $D_{intra_{1,k}}$ в порах частинок для процесу дифузії бензолу

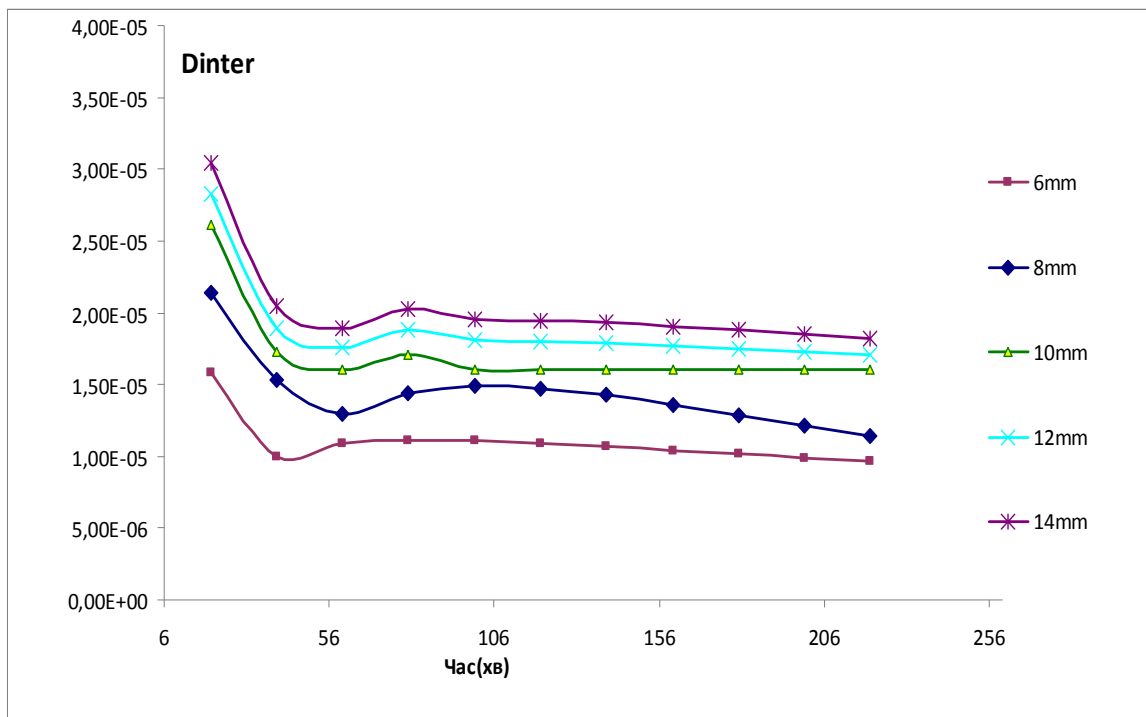


Рисунок 5. Розподіл коефіцієнтів дифузії $D_{inter_{2,k}}$ в міжчастинковому просторі для процесу дифузії гексану

Розподіли коефіцієнтів дифузії для міжчастинкового простору мають більш пологі профілі, а значення коефіцієнтів лежать в межах від $1e-6$ до $3e-5$. Профілі стають лінійними при досягненні часу дифузії в 70-100 хв, що є меншим за час насичення пор частинок і вказує на меншу ємність міжчастинкового простору в порівнянні з порами частинок.

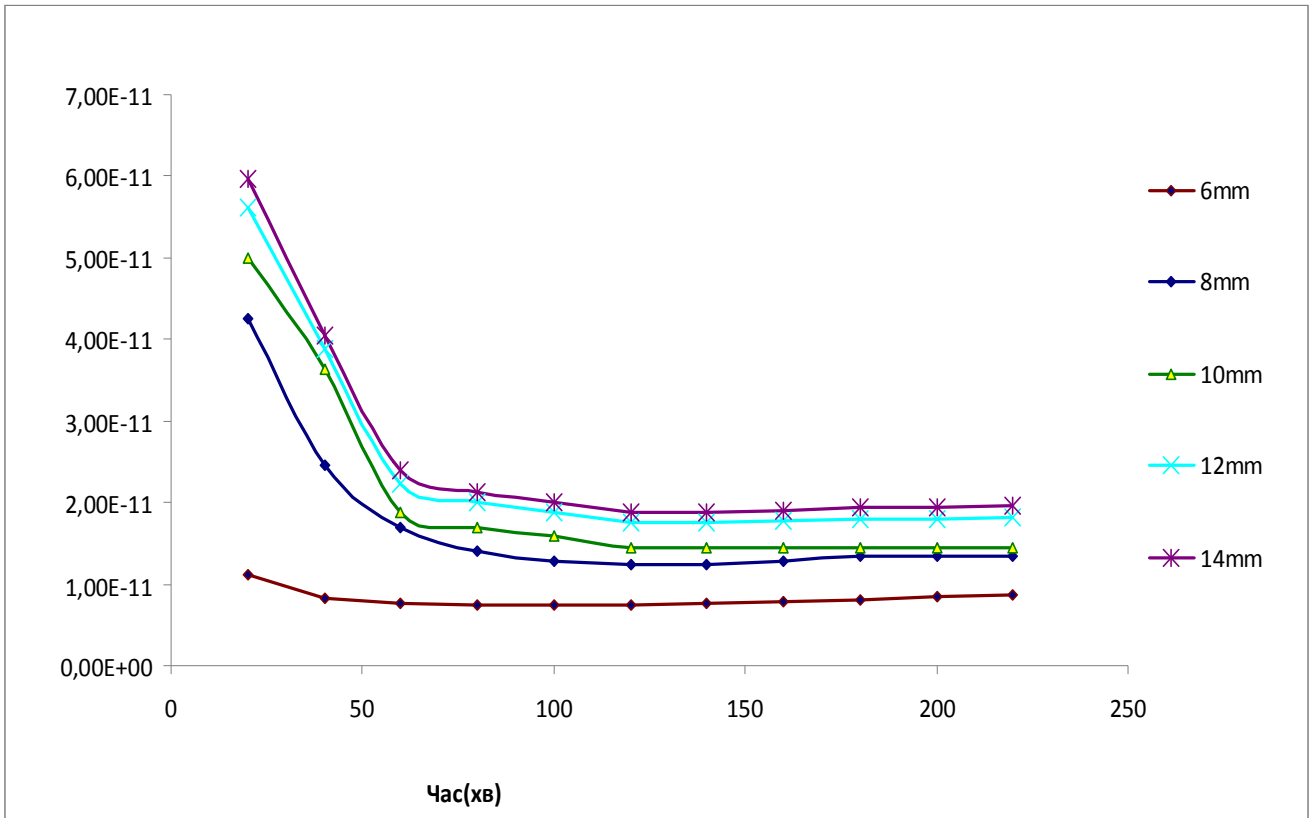


Рисунок 6. Розподіл коефіцієнтів дифузії $D_{intra2,k}$ в порах частинок для процесу дифузії гексану

Порівнюючи отримані розподіли коефіцієнтів для бензолу (рис. 3-4) та гексану (рис. 5-6) варто зауважити більші абсолютні значення коефіцієнтів дифузії для гексану, що визначає більшу швидкість адсорбції, в порівнянні з бензолом, а також швидше досягнення стану насичення в порах частинок.

Література

1. Kärger J. Diffusion and Adsorption in Porous Solids // Handbook of Porous Solids // Kärger J. Ruthven D. Ed. by F. Shuth, K.W. Sing and

J.Weitkamp. Wiley-VCH Weinheim (Germany). – 2002. – P. 2089-2173.

2. M. Petryk, S. Leclerc, D. Canet, J. Fraissard. Mathematical modeling and visualization of gas transport in a zeolite bed using a slice selection procedure. *Diffusion Fundamentals*. – Volume 4. – P. 11.1-11.23 (2007)

3. S.Leclerc, M.Petryk, D.Canet, J.Fraissard Competitive Diffusion of Gases in a Zeolite Using Proton NMR and Slice Selection Procedure. *Catalysis Today*, Elsevier B.V.. – Volume 187, Issue 1. – P. 104-107 (2012).

4. S. Leclerc, G. Trausch, B. Cordier, D. Grandclaude, A. Retournard, J. Fraissard, D. Canet. Chemical shift imaging (CSI) by precise object displacement. *Magn. Reson. Chem.* 44, 311 (2006).

5. M. Petryk, S. Leclerc, D. Canet, J. Fraissard Modeling of gas transport in a microporous solid using a slice selection procedure: Application to the diffusion of benzene in ZSM5. *Catalysis Today*, Elsevier B.V., – Volume 139, Issue 3. – P. 234-240 (2008).

6. V. S. Deineka, M. R. Petryk, J. Fraissard. Identifying kinetic parameters of mass transfer in components of multicomponent heterogeneous nanoporous media of a competitive diffusion system. *Cybernetics and Systems Analysis*; 47(5). (2011).

7. Sergienko I.V., Deineka V.S. *Optimal Control of Distributed Systems with Conjugation Conditions*. New York: Kluwer Academic Publishers. 400 p. (2005).

Mykhaylo Petryk, Jacques Fraissard, Dmytro Mykhalyk

**IDENTIFICATION OF COMPETITIVE DIFFUSION KINETIC
PARAMETERS OF GAZES IN POROUS SOLIDS WITH USE OF NMR
IMAGING RESULTS**

The results of diffusion coefficients identification procedure for both diffused components (benzene and hexane) in intra- and inter crystallites spaces were presented, using of high efficient gradient methods and proposed diffusion mathematical models for competitive diffusion and mono diffusion and NMR imaging of the adsorbed masses distribution for each component in the zeolite crystallite bed. Distributions of diffusion coefficients were obtained as a function of time for different positions along the micropores medium.

Keywords: *microporous medium, diffusion coefficients, competitive diffusion, mathematical model*

УДК 519.63

Ігор Баран

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ У ДВОШАРОВОМУ ЦИЛІНДРИЧНОМУ ТІЛІ З ТОНКИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

У роботі розглянуто задачі, що описуються еліптичним рівнянням в полярній системі координат з умовами спряження неідеального контакту. На основі методу скінчених елементів (МСЕ) побудовані обчислювальні алгоритми підвищеного порядку точності їх дискретизації. Наведено результати розв'язку модельних прикладів

Ключові слова: *неідеальний контакт, тонке включення, умови спряження, МСЕ*

Реальні технічні системи є, як правило, багатокомпонентними конструкціями. Складові частини контактують між собою через тонкі включення, які мають інші, по відношенню до основних складових, фізико-механічні властивості. Враховуючи складність розглядуваних конструкцій та режимів зовнішнього впливу, якісне дослідження різноманітних фізико-механічних процесів в таких системах зустрічає значні труднощі та на сьогодні можливе лише за допомогою сучасних обчислювальних методів і засобів математичного моделювання. На даний час одним із найкращих методів для розв'язування задач такого класу є МСЕ.

Підземне сховище для зберігання промислових відходів можна моделювати двома аксіальними анізотропними циліндрами, з'єднаними між собою тонкими включенням. При цьому виникають задачі стаціонарної дифузії тепла для складених кільцевих циліндрів. Задачі такого типу зводяться до розв'язування еліптичного рівняння з умовами спряження неідеального контакту.

Постановка та схема розв'язування задачі. Розглянемо випадок, коли розв'язок не залежить від осьової координати z . Тоді на області $G = G_1 \cup G_2$ в полярній системі координат рівняння набуде вигляду

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \left(\bar{k}_{11} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{12}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \right\} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\bar{k}_{21} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) = f, \quad (r, \varphi) \in G, \quad (1)$$

де $\bar{k}_{ij} = \bar{k}_{ji}(r, \varphi)$ - неперервні на кожній із областей \bar{G}_l , мають неперервні обмежені перші часткові похідні на G_l ($i, j, l = 1, 2$); $f|_{G_l} = f(r, \varphi)|_{G_l} \in C(G_l)$,

$|f| < \infty$; $\bar{G}_1 = \{(r, \varphi) : 0 < l_1 \leq r \leq l_0, l_2 \leq \varphi \leq L_2\}$, $\bar{G}_2 = \{(r, \varphi) : l_0 \leq r \leq L_1, l_2 \leq \varphi \leq L_2\}$, $\bar{G} = \bar{G}_1 \cup \bar{G}_2$, $L_2 - l_2 \leq 2\pi$. Області \bar{G} в прямокутній декартовій системі

координат ($x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$) відповідає складене кільце при $L_2 - l_2 = 2\pi$ або складений кільцевий сектор при $L_2 - l_2 < 2\pi$. Кільцевому відрізку γ в полярній системі координат відповідає прямолінійний відрізок $\gamma_0 = \{(r, \varphi) :$

$r = l_0, l_2 \leq \varphi \leq L_2\}$. Для складеного кільця \bar{G} його границя $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$

складається з двох кіл $\Gamma_1 = \{(r, \varphi) : r = l_1, l_2 \leq \varphi \leq L_2 = l_2 + 2\pi\}$ і

$\Gamma_2 = \{(r, \varphi) : r = L_1, l_2 \leq \varphi \leq L_2 = l_2 + 2\pi\}$, а для складеного кільцевого сектора

\bar{G} - $\Gamma = \bigcup_{i=1}^4 \Gamma_i$ ($\Gamma_1 = \{(r, \varphi) : r = l_1, l_2 \leq \varphi \leq L_2\}$,

$\Gamma_2 = \{(r, \varphi) : r = L_1, l_2 \leq \varphi \leq L_2\}$, $\Gamma_3 = \{(r, \varphi) : 0 < l_1 \leq r \leq L_1, \varphi = l_2\}$,

$\Gamma_4 = \{(r, \varphi) : 0 < l_1 \leq r \leq L_1, \varphi = L_2\}$), $L_2 - l_2 < 2\pi$.

На включенні γ_0 області \bar{G} задані неоднорідні умови спряження неідеального контакту у вигляді:

$$R_1 \left\{ \bar{k}_{11} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{12}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right\}^- + R_2 \left\{ \bar{k}_{11} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{12}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right\}^+ = [u] + \delta, \quad (r, \varphi) \in \gamma_0, \quad (2)$$

$$\left[\bar{k}_{11} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{12}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right] = \beta_1 (\nu u^+ + \chi u^-) + \alpha_1, \quad (r, \varphi) \in \gamma_0, \quad (3)$$

де $[u] = u^+ - u^-$, $u^+ = \{u\}^+ = u(r, \varphi)$ при $(r, \varphi) \in \gamma_0 \cap \partial G_2$, $u^- = \{u\}^- = u(r, \varphi)$

при $(r, \varphi) \in \gamma_0 \cap \partial G_1$, $\gamma_0 = \partial G_1 \cap \partial G_2$, $R_1, R_2, \beta_1, \nu, \chi = const \geq 0$, $R_1 + R_2 > 0$,

$\nu + \chi = 1$, $\alpha_1, \delta \in C(\gamma_0)$. При R_1, R_2 , одночасно нерівних нулю, приймемо

$\nu = R_1 / (R_1 + R_2)$, $\chi = R_2 / (R_1 + R_2)$.

Крайові умови на ділянках Γ_1, Γ_2 задамо у вигляді:

$$u = g_1(r, \varphi), \quad (r, \varphi) \in \Gamma_1, \quad (4)$$

$$\bar{k}_{11} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{12}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = -\bar{\alpha}_1 u + \bar{\beta}_1, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_2, \quad (5)$$

де $\bar{\alpha}_1 = const > 0, \bar{\beta}_1 \in L_2(\Gamma_2)$.

Розглядаючи задачу на складеному кільці ($l_2 = 0, L_2 = 2\pi$), будемо шукати 2π - періодичний розв'язок $u_1(r, \varphi)$, що задовольняє співвідношення (1)-(5) і умови

$$u(r, 0) = u(r, 2\pi), \quad r \in [l_1, L_1], \quad (6)$$

$$\left\{ \bar{k}_{21} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right\} \Big|_{\varphi=0} = \left\{ \bar{k}_{21} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right\} \Big|_{\varphi=2\pi}, \quad r \in [l_1, L_1]. \quad (7)$$

Якщо розглядається задача на складеному сегменті ($L_2 - l_2 < 2\pi$), то на ділянках Γ_3, Γ_4 задамо наступні крайові умови:

$$u = g_2(r, \varphi), \quad (r, \varphi) \in \Gamma_3, \quad (8)$$

$$\bar{k}_{21} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = -\bar{\alpha}_2 u + \bar{\beta}_2, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_4, \quad (9)$$

де $\bar{\alpha}_2 = const > 0, \bar{\beta}_2 \in L_2(\Gamma_2)$.

Таким чином, незалежний від координати z дифузійний процес у складеному кільцевому циліндрі описується крайовою задачею (1)-(9) (задача 1), а у складеному кільцевому секторі – крайовою задачею (1)-(5), (8), (9) (задача 2) для еліптичного рівняння, записаного в полярній системі координат з умовами спряження неідеального контакту.

Використовуючи методику, викладену в роботі [1], та результати, отримані автором в роботі [2], для задачі 1 будемо відповідну їй варіаційну задачу, яка полягає у відшуканні функції $u_1(r, \varphi) \in H_1$, що надає мінімум функціоналу енергії

$$\Phi_1(v) = \iint_G \left\{ r \bar{k}_{11} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \bar{k}_{12} \frac{\partial v}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} \right)^2 \right\} dr d\varphi +$$

$$+ \frac{l_0}{R_1 + R_2} \int_0^{2\pi} \left([v] \Big|_{r=l_0} \right)^2 d\varphi + \beta_1 \int_0^{2\pi} l_0 (v v^+ + \chi v^-)^2 d\varphi + \int_0^{2\pi} \bar{\alpha}_1 L_1 (v \Big|_{r=L_1})^2 d\varphi -$$

$$\begin{aligned}
& -2 \iint_G r f v d r d \varphi - 2 \int_0^{2\pi} \frac{R_2 \alpha_1 - \delta}{R_1 + R_2} l_0 [v] d \varphi + 2 \int_0^{2\pi} l_0 \alpha_1 v^+ d \varphi - \\
& - 2 \int_0^{2\pi} \bar{\beta}_1 L_1 v|_{r=L_1} d \varphi, \quad \forall v(r, \varphi) \in H_1, \tag{10}
\end{aligned}$$

де $H_1 = \{v(r, \varphi)|_{G_l} \in W_2^1(G_l) : l=1, 2; v|_{\Gamma_1} = g_1(r, \varphi), v(r, 0) = v(r, 2\pi), r \in [l_1, L_1]\}$. Тут $W_2^1(G_l)$ - простір функцій С.Л.Соболева, визначених на областях G_l [1].

Задача в слабкій постановці полягає у відшуканні функції $u_1(r, \varphi) \in H_1$, що задовольняє $\forall v(r, \varphi) \in H_{10}$ рівняння

$$\begin{aligned}
& \iint_G \left\{ r \bar{k}_{11} \frac{\partial u_1}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial r} + \bar{k}_{12} \left(\frac{\partial u_1}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right\} d r d \varphi + \\
& + \int_0^{2\pi} \frac{l_0 [u_1][v]|_{r=l_0}}{R_1 + R_2} d \varphi + \beta_1 l_0 \int_0^{2\pi} (v u_1^+ + \chi u_1^-)(v v^+ + \chi v^-) d \varphi + \int_0^{2\pi} \bar{\alpha}_1 L_1 u_1 v|_{r=L_1} d \varphi = \\
& = \iint_G r f v d r d \varphi + \int_0^{2\pi} \frac{R_2 \alpha_1 - \delta}{R_1 + R_2} l_0 [v]|_{r=l_0} d \varphi - \int_0^{2\pi} l_0 \alpha_1 v^+ d \varphi + \int_0^{2\pi} \bar{\beta}_1 L_1 v|_{r=L_1} d \varphi, \tag{11}
\end{aligned}$$

де $H_{10} = \{v(r, \varphi)|_{G_l} \in W_2^1(G_l) : l=1, 2; v|_{\Gamma_1} = 0, v(r, 0) = v(r, 2\pi), r \in [l_1, L_1]\}$.

Аналогічно, для крайової задачі 2 варіаційна задача полягає у відшуканні функції $u_2(r, \varphi) \in H_2$ яка $\forall v(r, \varphi) \in H_2$ надає мінімум функціоналу енергії

$$\begin{aligned}
\Phi_2(v) & = \iint_G \left\{ r \bar{k}_{11} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \bar{k}_{12} \frac{\partial v}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \varphi} \right)^2 \right\} d r d \varphi + \\
& + \frac{l_0}{R_1 + R_2} \int_{l_2}^{L_2} ([v]|_{r=l_0})^2 d \varphi + \beta_1 \int_{l_2}^{L_2} l_0 (v v^+ + \chi v^-)^2 d \varphi + \int_{l_2}^{L_2} \bar{\alpha}_1 L_1 (v|_{r=L_1})^2 d \varphi + \\
& + \int_{l_1}^{L_1} \bar{\alpha}_2 (v|_{\varphi=L_2})^2 d r - 2 \iint_G r f v d r d \varphi - 2 \int_{l_2}^{L_2} \frac{R_2 \alpha_1 - \delta}{R_1 + R_2} l_0 [v] d \varphi + \\
& + 2 \int_{l_2}^{L_2} l_0 \alpha_1 v^+ d \varphi - 2 \int_{l_2}^{L_2} \bar{\beta}_1 L_1 v|_{r=L_1} d \varphi - 2 \int_{l_1}^{L_1} \bar{\beta}_2 v|_{\varphi=L_2} d r, \quad \forall v(r, \varphi) \in H_2, \tag{12}
\end{aligned}$$

де $H_2 = \{v(r, \varphi)|_{G_l} \in W_2^1(G_l) : l=1, 2; v|_{\Gamma_1} = g_1(r, \varphi), v|_{\Gamma_3} = g_2(r, \varphi)\}$.

Задача в слабкій постановці полягає у відшуванні функції $u_2(r, \varphi) \in H_2$, ЩО задовольняє

$\forall v(r, \varphi) \in H_{20} = \{v(r, \varphi)|_{G_l} \in W_2^1(G_l) : l=1,2; v|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_3} = 0\}$ рівняння

$$\begin{aligned} & \iint_G \left\{ r \bar{k}_{11} \frac{\partial u_2}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial r} + \bar{k}_{12} \left(\frac{\partial u_2}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right\} dr d\varphi + \\ & + \frac{l_0}{R_1 + R_2} \int_{l_2}^{L_2} ([v]|_{r=l_0})^2 d\varphi + \beta_2 l_0 \int_{l_2}^{L_2} (v u_2^+ + \chi u_2^-)(v v^+ + \chi v^-) d\varphi + \\ & + \int_{l_2}^{L_2} \bar{\alpha}_1 L_1 u_2 v|_{r=L_1} d\varphi + \int_{l_2}^{L_2} \bar{\alpha}_2 u_2 v|_{\varphi=L_2} dr = \iint_G r f v dr d\varphi + \int_{l_2}^{L_2} \frac{R_2 \alpha_1 - \delta}{R_1 + R_2} l_0 [v]|_{r=l_0} d\varphi - \\ & - \int_{l_2}^{L_2} l_0 \alpha_1 v^+ d\varphi + \int_{l_2}^{L_2} \bar{\beta}_1 L_1 v|_{r=L_1} d\varphi + \int_{l_1}^{L_1} \bar{\beta}_2 v|_{\varphi=L_2} dr. \end{aligned} \quad (13)$$

Використовуючи результати, наведені в роботі [1], легко встановити справедливність наступних тверджень.

Лема. Задачі (10), (11) ((12), (13)) еквівалентні і мають єдиний в H_1 (H_2) розв'язок.

Визначення. Розв'язки $u_1(r, \varphi) \in H_1$ та $u_2(r, \varphi) \in H_2$ відповідно задач (10), (11) та (12), (13) називаються узагальненими розв'язками, а самі ці задачі – узагальненими задачами крайових задач 1 та 2.

Теорема. Крайова задача m має єдиний узагальнений розв'язок $u_m(r, \varphi) \in H_m$. Якщо $u_m(r, \varphi)|_{\bar{G}_l} \in C^1(\bar{G}_l) \cap C^2(G_l)$ ($l, m=1,2$), то $u_m(r, \varphi) \in$ класичним розв'язком задачі m .

Розглядувані крайові задачі зручно розв'язувати за допомогою МСЕ. Для цього розіб'ємо області \bar{G}_j на N_j скінчених трикутних елементів \bar{e}_i^j ($i = \overline{1, N_j}; j = 1, 2$). Для знаходження наближеного узагальненого розв'язку задачі m використаємо простори $H_{mk}^N \subset H_m$ ($m = 1, 2$) скінчено-елементних функцій $v_k^N(r, \varphi)$. Позначимо \bar{H}_k^N простір неперервних на областях \bar{G}_1, \bar{G}_2 функцій $v_k^N(r, \varphi)$, що є повними поліномами степеня k змінних r, φ на кожному із \bar{e}_i^j . Тоді наближений узагальнений розв'язок $u_{km}^N(r, \varphi)$ крайової задачі m будемо шукати в підмножині $H_{mk}^N \subset H_m$. Тут

$$H_{1k}^N = \{v_k^N(r, \varphi) \in \bar{H}_k^N : v_k^N|_{\Gamma_1} = g_1(r, \varphi), v_k^N(r, 0) = v_k^N(r, 2\pi), r \in [l_1, L_1]\},$$

$$H_{2k}^N = \{v_k^N(r, \varphi) \in \bar{H}_k^N : v_k^N|_{\Gamma_1} = g_1(r, \varphi), v_k^N|_{\Gamma_3} = g_2(r, \varphi)\}.$$

Виходячи із варіаційної задачі (10) або (12) (аналогічно із задачі у слабкій постановці (11) або (13)), числовий наближений узагальнений розв'язок отримуємо як розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь із симетричною додатно визначеною розрідженою матрицею [1, 2].

Справджується твердження: Нехай класичний розв'язок u_m задачі m має на областях G_l ($l=1,2$) обмежені неперервні часткові похідні до $(k+1)$ -го порядку включно. Тоді для наближеного узагальненого розв'язку $u_{mk}^N \in H_{mk}^N$ цієї задачі справедлива оцінка [1]

$$\|u_m - u_{mk}^N\|_{W_2^1} \leq \frac{c_m h^k}{f(\theta)}, \quad (14)$$

де $c_m = \text{const} > 0$, h - довжина найбільшої сторони всіх \bar{e}_i^j , k - степінь поліномів МСЕ; при $k=1$ $f(\theta) = \cos(\theta)$, θ - половина величини найбільшого кута; при $k=2,3$ $f(\theta) = \sin(\theta)$, θ - величина найменшого кута всіх \bar{e}_i^j ,

$$\|\psi\|_{W_2^1}^2 = \iint_G \left\{ \psi^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial \varphi}\right)^2 \right\} dr d\varphi.$$

Результати розв'язання модельних прикладів.

В області $G = G_1 \cup G_2$ (рис. 1, а) визначена крайова задача 1, де

$$\bar{k}_{11} = \begin{cases} 0,5, & (r, \varphi) \in \bar{G}_1, \\ 0,75, & (r, \varphi) \in \bar{G}_2, \end{cases} \quad \bar{k}_{12} = \bar{k}_{21} = \begin{cases} 0,75, & (r, \varphi) \in \bar{G}_1, \\ 1,25, & (r, \varphi) \in \bar{G}_2, \end{cases} \quad \bar{k}_{22} = \begin{cases} 1,5, & (r, \varphi) \in \bar{G}_1, \\ 2,25, & (r, \varphi) \in \bar{G}_2, \end{cases}$$

$$f(r, \varphi) = \begin{cases} (1,5 \sin \varphi - 0,5r) / r^2, & (r, \varphi) \in G_1, \\ (2,25 \sin \varphi - 1,5r) / r^2, & (r, \varphi) \in G_2. \end{cases}$$

Параметри умов спряження (2), (3) такі: $R_1 = 1$; $R_2 = 0,5$;
 $\omega = 0,25 \cos \varphi + 1$; $\delta = 0,6875 \cos \varphi - 0,75$.

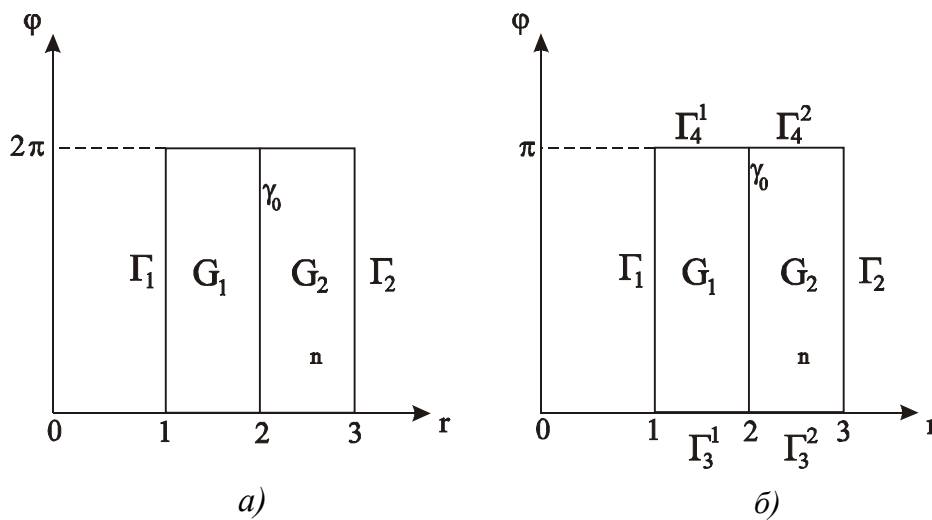


Рисунок 1. Модельна область \bar{G} з включенням γ_0
 а) складене кільце; б) складений кільцевий сектор

Параметри крайових умов (4), (5) наступні: $g_1 = \sin \varphi + 1$; $\bar{\alpha}_1 = 1$;
 $\bar{\beta}_1 = \sin \varphi + 7,5 + 5 \cos \varphi / 12$.

За цих даних класичний розв’язок модельного прикладу має вигляд:

$$u(r, \varphi) = \begin{cases} r + \sin \varphi, & (r, \varphi) \in G_1, \\ 2r + \sin \varphi, & (r, \varphi) \in G_2. \end{cases}$$

Задачі розв’язано за допомогою системи DIFUS [2]. Розглядувана область розбивалася на елементи з трьома та шістьма вузловими точками з подвійною нумерацією вузлів на включенні, тобто для апроксимації використовувалися кусково-лінійні та кусково-квадратичні функції МСЕ. Використання для апроксимації різних видів функцій МСЕ для однакової кількості вузлів розбиття дає розв’язки однакового порядку точності. При використанні кусково-квадратичних функцій область \bar{G} з розрізом γ_0 розбивалась на 96 трикутних елементів. Порядок матриці МСЕ $n=250$. Півширина стрічки ненульових елементів матриці після перенумерації вузлів $m=27$. Відносна похибка $\Delta = |(u - u_k^N) / u| \cdot 100\%$ отриманого наближеного числового розв’язку знаходилась в наступних межах: $8,79 \cdot 10^{-8} < \Delta < 8,04 \cdot 10^{-2}$ – для $v_2^N \in H_2^N$. В табл.1 наведено деякі результати розрахунку.

Результати розрахунку крайової задачі 1.

Номер вузла	r -координата вузла	φ -координата вузла	Точний розв'язок	Наближений розв'язок	Відносна похибка
19	2	0	4	4	$8,79 \cdot 10^{-8}$
116	2	$5\pi/6$	4,5	4,4997696	$5,12 \cdot 10^{-3}$
117	2	$5\pi/6$	2,5	2,4998398	$6,41 \cdot 10^{-3}$
191	1,5	$4\pi/3$	0,6339746	0,6334959	$7,55 \cdot 10^{-2}$
218	2	$5\pi/3$	3,1339746	3,1314549	$8,04 \cdot 10^{-2}$
220	2	$5\pi/3$	1,1339746	1,1339618	$1,13 \cdot 10^{-3}$
242	1,5	$11\pi/6$	1	1,0000431	$4,31 \cdot 10^{-3}$

В області $G = G_1 \cup G_2$ (рис. 1, б) визначена крайова задача 2, де

$$\bar{k}_{11} = \begin{cases} 2, & (r, \varphi) \in \bar{G}_1, \\ 1,5, & (r, \varphi) \in \bar{G}_2, \end{cases} \quad \bar{k}_{12} = \bar{k}_{21} = \begin{cases} 1, & (r, \varphi) \in \bar{G}_1, \\ 0,75, & (r, \varphi) \in \bar{G}_2, \end{cases} \quad \bar{k}_{22} = \begin{cases} 0,75, & (r, \varphi) \in \bar{G}_1, \\ 0,5, & (r, \varphi) \in \bar{G}_2, \end{cases}$$

$$f(r, \varphi) = \begin{cases} -(8r + 2\varphi + 2)/r, & (r, \varphi) \in G_1, \\ -(12r + 3\varphi + 3)/r, & (r, \varphi) \in G_2. \end{cases}$$

Змішані крайові умови мають вигляд

$$u = 1 + \varphi, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_1, \quad \bar{k}_{11} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{12}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = -\bar{\alpha}_1 u + \bar{\beta}_1, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_2,$$

$$u = r^2, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_3^1, \quad u = 2r^2, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_3^2,$$

$$\bar{k}_{21} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\bar{k}_{22}}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} = -\bar{\alpha}_2 u + \bar{\beta}_2, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_4^1, \quad u = 2r^2 + 2\pi r, \quad (r, \varphi) \in \Gamma_4^2,$$

де $\bar{\alpha}_1 = 1$; $\bar{\beta}_1 = 37,5 + 9\varphi$; $\bar{\alpha}_2 = 70$; $\bar{\beta}_2 = 70r^2 + 2r + 70\pi r + 0,75 + \pi$.

Параметри умов спряження (2), (3) наступні: $R_1 = 0,5$; $R_2 = 1$;
 $\omega = 4,5 + \varphi$; $\delta = 14 + 2\varphi$.

За цих даних класичний розв'язок модельного прикладу має вигляд:

$$u(r, \varphi) = \begin{cases} r^2 + r\varphi, & (r, \varphi) \in G_1, \\ 2r^2 + 2r\varphi, & (r, \varphi) \in G_2. \end{cases}$$

При використанні кусково-квадратичних функцій область \bar{G} з розрізом γ_0 розбивалась на 216 трикутних елементів з $n=518$ вузлами розбиття, $m=18$. Межі відносної похибки: $8,93 \cdot 10^{-7} < \Delta < 5,34 \cdot 10^{-2}$ - для $v_2^N \in H_2^N$. В табл. 2 наведено деякі результати розрахунку.

Результати розрахунку крайової задачі 2

Номер вузла	r -координата вузла	φ -координата вузла	Точний розв'язок	Наближений розв'язок	Відносна похибка
16	1,0278	$\pi/6$	1,5944704	1,5944615	$5,58 \cdot 10^{-4}$
204	1,8333	π	9,1206981	9,1158276	$5,34 \cdot 10^{-2}$
247	2	$5\pi/6$	9,2359877	9,2358348	$1,66 \cdot 10^{-3}$
247	2	$5\pi/6$	18,471975	18,471803	$9,29 \cdot 10^{-4}$
268	2	$\pi/6$	5,0471976	5,0470426	$3,07 \cdot 10^{-3}$
272	2	$\pi/6$	10,094395	10,094179	$2,13 \cdot 10^{-3}$
309	2,1111	0	8,9135807	8,9135808	$8,93 \cdot 10^{-7}$
497	2,9444	$2\pi/3$	29,673166	29,671133	$6,85 \cdot 10^{-3}$

Висновки. Для розв'язування задач, що описуються еліптичним рівнянням в полярній системі координат з умовами спряження неідеального контакту, зручно використовувати високоточні обчислювальні алгоритми, побудовані на основі МСЕ. З використанням розробленого на основі цих алгоритмів програмного забезпечення розв'язано модельні приклади. Теоретичні результати підтверджені експериментальними даними.

Література.

1. Дейнека В.С., Сергиенко И.В. Модели и методы решения задач в неоднородных средах. – Киев: Наукова думка, 2001. – 606 с. – ISBN 966-00-0701-9
2. Баран І.О. Високоточні обчислювальні алгоритми та система автоматизованого розрахунку дифузійних процесів в багатокомпонентних середовищах: Дис... канд. техн. наук: 01.05.02. Тернопіль, ТДТУ, 2003.

Ihor Baran

MATHEMATICAL MODELING OF TEMPERATURE FIELD IN TWO-LAYER CYLINDRICAL BODY WITH A THIN INCLUSION

The problems for the elliptical equation in polar coordinates with conjugate conditions are considered. Computing algorithms of the increased accuracy order of sampling for the problems under considerations basing on the finite elements method are constructed. The solutions of the model examples are presented.

Keywords: *nonideal contact, thin inclusion, conjugate conditions, FEM*

УДК 537.9, 538.956

Олександр Крамар, Юрій Скоренький, Юрій Довгоп'ятий**ПЕРЕХІД МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК У МОДЕЛІ ДВОКРАТНО
ОРБІТАЛЬНО ВИРОДЖЕНОЇ ЗОНИ ПРИ ВРАХУВАННІ
ОСОБЛИВОСТЕЙ НЕЗБУРЕНОЇ ГУСТИНИ ЕЛЕКТРОННИХ
СТАНІВ**

В роботі досліджено вузьку начверть заповнену (концентрація електронів на вузол $n=1$) двократно орбітально вироджену зону у випадку сильної кулонівської кореляції та сильного гундівського зв'язку. З використанням методів числового розрахунку для випадку різних незбурених густин електронних станів отримано концентрацію полярних станів (діркових та двійкових) при різних значеннях енергетичних параметрів моделі та температурах. Показано, що зміна форми густини станів дещо модифікує значення критичного параметра, при якому відбувається перехід з металічної фази у діелектричну при фіксованій температурі.

Ключові слова: модель Габбарда, орбітальне виродження, перехід метал-діелектрик, концентрація полярних станів, енергетична щілина

Орбітально вироджена модель Габбарда [1-3], яку, зокрема, необхідно застосовувати для реалістичного теоретичного опису електричних та магнітних властивостей сульфідів та селенідів 3d-металів – матеріалів з сильними електронними кореляціями [4], в минулому активно досліджувалась з використанням методу допоміжних бозонів [5-7], варіаційного методу [8], в границі нескінченної розмірності простору [9], у формалізмі Х-операторів [10]. Результати цих робіт вказують на можливість переходу метал-діелектрик у двократно виродженій моделі Габбарда. Разом з тим, отримані в цих роботах умови переходу дещо різняться. Нещодавно в підході динамічного середнього поля було досліджено орбітально-селективний перехід Мотта-Габбарда [11], зокрема, у випадку трикратного орбітального виродження при концентрації $n=2$ в рамках теорії динамічного середнього поля застосовано напівеліптичну ГС для дослідження переходу метал-

діелектрик. Також орбітальне та феромагнітне впорядкування і перехід метал-діелектрик у випадку виродженої зони досліджувалося в роботі [12]. У роботах [13-16] було показано, що форма незбуреної густини електронних станів (ГС) визначає критичну концентрацію, при якій виникає спонтанне феромагнітне впорядкування. Таким чином об'єктивно існує необхідність розширити такий підхід для опису умов переходу метал-діелектрик, оскільки особливості ГС прямо впливатимуть на поведінку хімічного потенціалу та концентрації полярних станів.

У попередніх роботах авторів [17,18] з використанням варіанту узагальненого наближення Гартрі-Фока в границі сильної кулонівської кореляції $U \gg t$ та сильної обмінної взаємодії $U \gg (U - J_H)$ (ці умови дозволяють знехтувати станами вузлів із заповненням, більшими за двійкові, та так-званими негундівськими двійковими станами) було знайдено одноелектронну запізнюючу функцію Гріна $G_{ij}^{\gamma\sigma}(E) = \langle \langle a_{i\gamma\sigma} | a_{j\gamma\sigma}^+ \rangle \rangle$ та енергетичний спектр системи. Енергетичний спектр у парамагнітному стані при концентрації електронів на вузол $n = 1$ має вигляд:

$$E_{1,2} = -\mu + \frac{(U - J_H)}{2} + 3t(\bar{k}) \left(d - \frac{1}{4} \right) \mp \frac{1}{2} \sqrt{\left[(U - J_H) - \frac{t(\bar{k})}{2} \right]^2 + 32d^2 t(\bar{k})^2}, \quad (1)$$

тут μ – хімічний потенціал, $t(\bar{k})$ – фур'є-образ інтегралу переносу t_{ij} електронів з вузла i на вузол j , U – величина кулонівського відштовхування двох електронів на різних орбіталях вузла, J_H – енергія внутрішньоатомної (гундівської) обмінної взаємодії, d – концентрація подвійно зайнятих вузлів (двійок). Критерієм переходу діелектрик-метал виступає енергетична щілина, визначена як різниця енергій між нижнім краєм верхньої зони та верхнім краєм нижньої, яка визначається виразом:

$$\Delta E = 3w \left(2d - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left[(U - J_H) + \frac{w}{2} \right]^2 + 32d^2 w^2} + \frac{1}{2} \sqrt{\left[(U - J_H) - \frac{w}{2} \right]^2 + 32d^2 w^2}, \quad (2)$$

Відзначимо, що енергетична щілина (2) залежить від ширини w квазічастинкових підзон (аналогів габбардівських підзон), інтегралу переносу $t(\bar{k})$ та концентрації полярних станів, яка визначається формою ГС. При заданих U та $t(\bar{k})$ (постійний зовнішній тиск) залежність ΔE від концентрації двійкових станів дозволяє вивчати перехід метал-діелектрик під дією зовнішніх впливів (температури, освітлення, магнітного поля тощо) в сполуках перехідних металів, для яких характерне орбітальне

виродження зони провідності. Для прикладу, перехід зі стану металічного парамагнетика до стану мотт-габбардівського парамагнітного діелектрика відбувається у сполуках NiS_2 та в $NiS_{2-x}Se_x$ [19,20,4].

Важливою особливістю виразу для енергетичної щільності (2) є його залежність від концентрацій полярних станів. Концентрація двократно зайнятих електронами вузлів ґратки (двійок) визначається співвідношенням:

$$d = \frac{1}{8} \int_{-w}^w \rho(\varepsilon) \left\{ \frac{1 + A(\varepsilon)}{\exp\left(-\frac{E_1(\varepsilon)}{kT}\right) + 1} + \frac{1 - A(\varepsilon)}{\exp\left(-\frac{E_2(\varepsilon)}{kT}\right) + 1} \right\} d\varepsilon \quad (3)$$

$$A(\varepsilon) = \frac{U - J_H - \frac{\varepsilon}{2}}{\sqrt{(U - J_H)^2 - (U - J_H)\varepsilon + \varepsilon^2 \left(32d^2 + \frac{1}{4}\right)}} \quad (4)$$

де $\rho(\varepsilon)$ - незбурена густина електронних станів, k - стала Больцмана, T - абсолютна температура, $E_1(\varepsilon), E_2(\varepsilon)$ отримуються заміною $t(\vec{k}) \rightarrow \varepsilon$, де $\varepsilon \in [-w, w]$.

Хімічний потенціал знаходився шляхом розв'язування рівняння $c=2d$, де концентрація діркових станів c визначається з рівняння:

$$c = \left(\frac{c}{2} + \frac{1}{8}\right) \int_{-w}^w \rho(\varepsilon) \left\{ \frac{1 - A(\varepsilon)}{\exp\left(\frac{E_1(\varepsilon)}{kT}\right) + 1} + \frac{1 + A(\varepsilon)}{\exp\left(\frac{E_2(\varepsilon)}{kT}\right) + 1} \right\} d\varepsilon \quad (5)$$

Розрахунки проводилися для простих форм незбуреної густини електронних станів: часто застосовуваних - прямокутної

$\rho(\varepsilon) = \theta(w^2 - \varepsilon^2)/(2w)$ та напівеліптичної $\rho(\varepsilon) = \frac{2}{\pi w} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{w}\right)^2}$ (суцільна крива

на рис. 1), а також для деяких реалістичних густини станів. Зокрема розглядалася густина станів з асиметрією [21] (див. рис. 1)

$$\rho(\varepsilon) = c \frac{\sqrt{w^2 - \varepsilon^2}}{w + a\varepsilon}, \quad (6)$$

з вільним параметром $c = (1 + \sqrt{1 - a^2})/(w\pi)$. Змінюючи параметр асиметрії a , можна плавно змінювати форму розподілу густини станів від симетричної

напівеліптичної густини станів ґратки Бете ($a=0$) до густини станів, що розходиться на краю нижньої зони як обернений корінь квадратний.

Також розглядалася ГС, що відповідає простій кубічній (див. рис. 2) ґратці [22]:

$$\rho(\varepsilon) = A\sqrt{9 - \varepsilon^2} - C(1 - \varepsilon^2), \quad |\varepsilon| < 1 \tag{7}$$

$$= A\sqrt{9 - \varepsilon^2} - B\sqrt{1 - (|\varepsilon| - 2)^2}, \quad 1 \leq |\varepsilon| \leq 3,$$

де $A=0,10108$; $B=0,12807$; $C=0,02$.

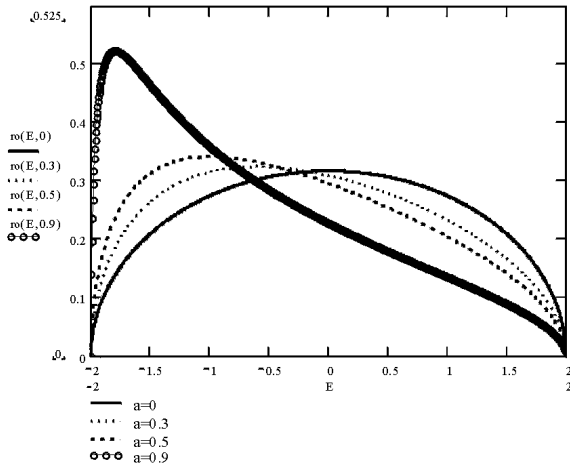


Рисунок 1. ГС з асиметрією на краю зони.

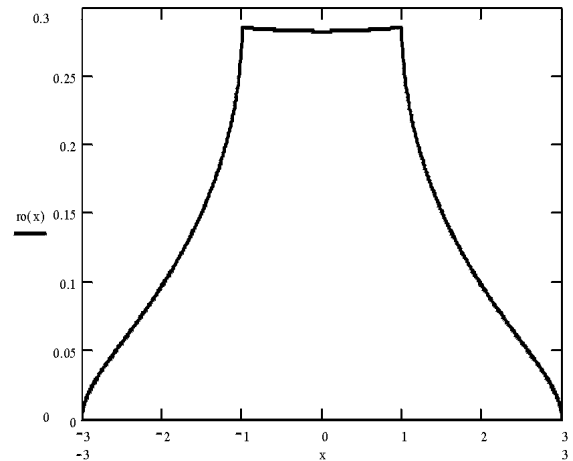


Рисунок 2. ГС простої кубічної (sc) ґратки

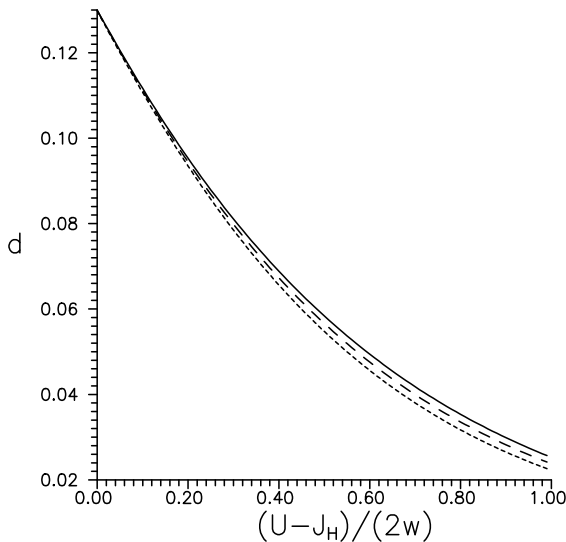


Рисунок 3. Залежність концентрації двійкових станів від енергетичного параметра $(U - J_H) / 2w$ для різних ГС при температурі $k_B T / 2w = 0,2$: прямокутна ГС – суцільна крива, напівеліптична ГС – крива з довгим штрихом, ГС простої кубічної ґратки – крива з коротким штрихом.

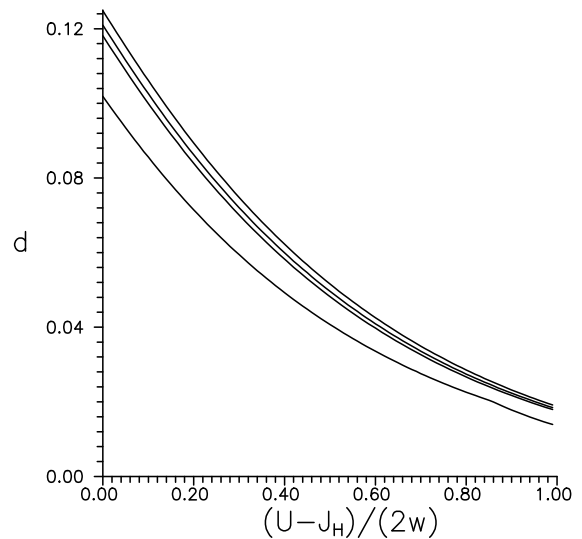
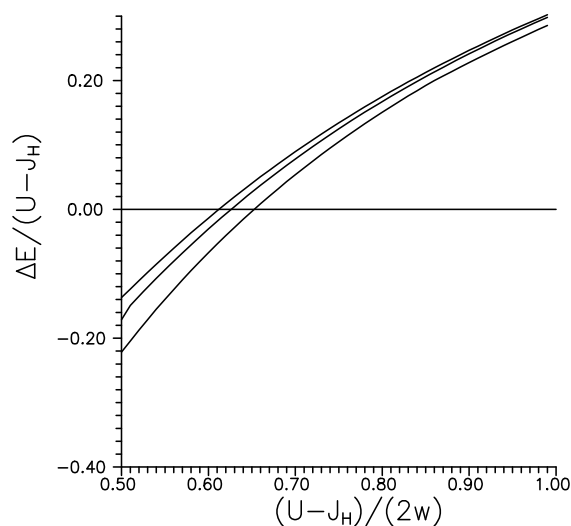


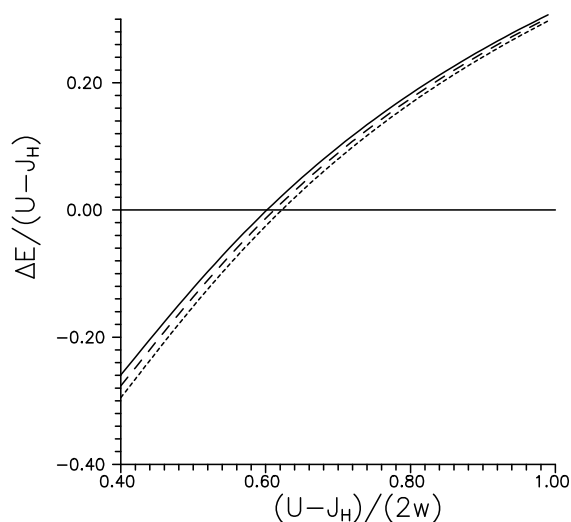
Рисунок 4. Залежність концентрації двійкових станів при температурі $k_B T / 2w = 0,2$ від енергетичного параметра $(U - J_H) / 2w$ для ГС з асиметрією на краю зони при різних значення параметра асиметрії a – криві зверху вниз – $a=0, 0,3, 0,5$ та $0,99$ відповідно.

З використанням методів чисельного розрахунку на основі взаємоузгодженого розв'язування рівнянь (3) та (5) отримано концентрації двійок d при різних значеннях енергетичних параметрів моделі та температурах для випадку різних незбурених густин електронних станів. З рис. 3 видно, що форма ГС дещо модифікує число двійок, причому сильніше цей ефект проявляється при значній кулонівській взаємодії електронів на вузлі. Наявність в ГС асиметрії на краю зони суттєво впливає (див. рис. 4) на кількість двійкових станів при фіксованій температурі.

Відзначимо також, що лише при низьких температурах критерій переходу (зокрема, $(U - J_H) / 2w = 0,75$ при $T=0$) у двократно орбітально виродженій моделі Габбарда слабо залежить від форми ГС, тоді як при високих температурах вплив форми незбуреної густини електронних станів (залежної від типу ґраткової структури) вже є помітним (див. рис. 5), а у випадку асиметричної ГС – досить значним (рис. 6).



РРисунок 5. Залежність нормованої ширини енергетичної щілини від енергетичного параметра $(U - J_H) / 2w$ для різних ГС при температурі $k_B T / 2w = 0,2$: прямокутна ГС – суцільна крива, напівеліптична ГС – крива з довгим штрихом, ГС простої кубічної ґратки - крива з коротким штрихом.



РРисунок 6. Залежність нормованої ширини енергетичної щілини при температурі $k_B T / 2w = 0,2$ від енергетичного параметра $(U - J_H) / 2w$ для ГС з асиметрією на краю зони при різних значення параметра асиметрії a – криві зверху вниз – $a=0, 0,5$ та $0,99$ відповідно.

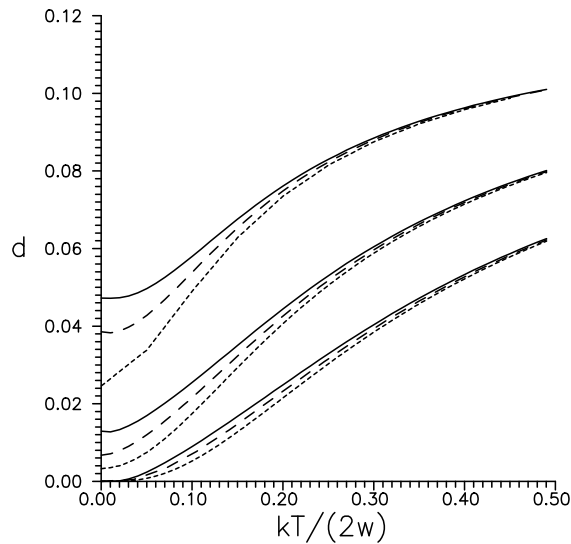


Рисунок 7. Залежність концентрації двійкових станів від температури при фіксованих значеннях енергетичного параметра $(U - J_H)/2w$, що становлять 0,3 (верхнє сімейство графіків), 0,6 (середнє сімейство графіків) та 0,9 (нижнє сімейство графіків) для різних ГС: прямокутна ГС – суцільна крива, напівеліптична ГС – крива з довгим штрихом, ГС простої кубічної ґратки – крива з коротким штрихом.

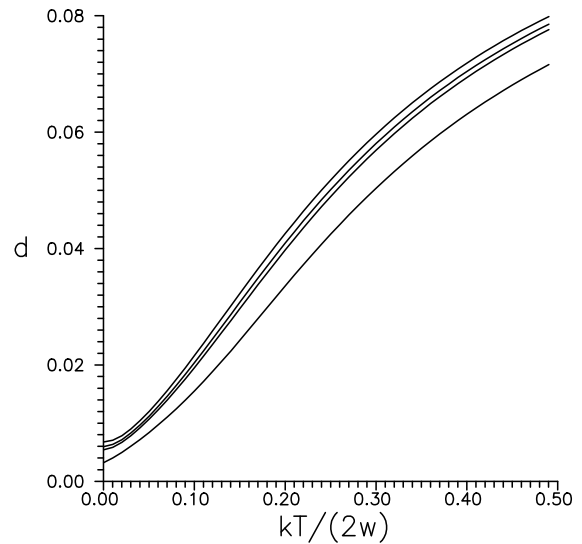


Рисунок 8. Залежність концентрації двійкових станів від температури при $(U - J_H)/2w = 0,6$ для ГС з асиметрією на краю зони при різних значеннях параметра асиметрії a – криві зверху вниз – $a=0, 0,3, 0,5$ та $0,99$ відповідно.

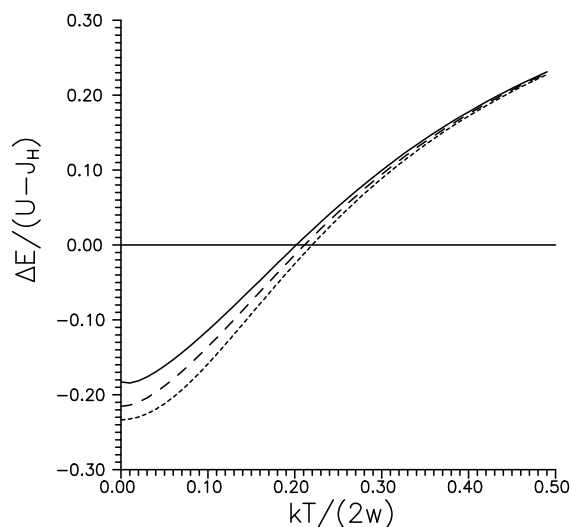


Рисунок 9. Залежність нормованої ширини енергетичної щілини від температури при $(U - J_H)/2w = 0,6$ для різних ГС: прямокутна ГС – суцільна крива, напівеліптична ГС – крива з довгим штрихом, ГС простої кубічної ґратки – крива з коротким штрихом.

В даній роботі також здійснено чисельний розрахунок температурної залежності кількості двійок при фіксованих енергетичних параметрах електронної системи (див. рис. 7 та 8), який доводить важливість врахування форми ГС. Отримана для типових ГС на рис. 9 залежність ширини енергетичної щілини від нормованої температури дозволяє більш послідовно вивчати температурно-індукований перехід з металічного у діелектричний стан вузькозонних систем з двократним орбітальним виродженням (типу дихалькогенідів перехідних металів).

Література.

1. Roth L.M. Simple narrow-band model of ferromagnetism due to intraatomic exchange / L.M. Roth // Phys. Rev.— 1966. — vol. 149, № 1.— pp. 306-308.
2. Кугель К.И. Кристаллическая структура и магнитные свойства веществ с орбитальным вырождением / К.И. Кугель, Д.И. Хомский // Журн. эксп. и теор. физ.— 1973.— Т.64, № 4.— С. 1429-1439.
3. Lyon-Caen C. High-temperature expansion in the degenerate Hubbard model / C. Lyon-Caen, M. Cyrot // J. Phys. C.— 1975.— V. 8.— P.2091-2094.
4. Изюмов Ю.А. Модель Хаббарда в режиме сильных корреляций / Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев // Успехи физ. наук.- 2008.- Т. 178, № 1.- С. 25-60.
5. Kiejnberg A. Simple treatment of the metal-insulator transition: effects of degeneracy, temperature and applied magnetic field / A. Kiejnberg, J. Spalek // Phys. Rev. B.— 1998.— V. 57, No. 19.— P.12041-12055.
6. Hasegawa H. Slave-boson functional-integral approach to the Hubbard model with orbital degeneracy / H. Hasegawa // Phys. Rev. B.— 1997.— V. 56, No. — P. 1391-1397; Hasegawa H. The metal-insulator transition in the doubly degenerate Hubbard model / H. Hasegawa // J. Phys. Soc. Jap.— 1997.— V. 66, No. 5.— P. 3522-3527.
7. Fresard R. Interplay of Mott transition and ferromagnetism in the orbitally degenerate Hubbard model / R. Fresard, G. Kotliar // Phys. Rev. B.— 1997.— V. 56, No. 20.— P. 12909-12915.
8. Bunemann J. Generalization Gutzwiller method in $n \geq 2$ correlated bands. First order metal-insulator transition / J. Bunemann, W. Weber // Phys. Rev. B. —1997. — V. 55, No. 7.— P. R4011-R4014.

9. Rozenberg M. Integer filling metal-insulator transition in degenerate Hubbard model / M. Rozenberg // *Phys. Rev. B.*– 1997.– V. 55, No. 8.– P. R4855-R4858.

10. Ivanov V.A. Band structure, insulator-metal transition and superconducting characteristics of two-dimensional BEDT-TTF-based systems / V.A. Ivanov, M.Ye. Zhuravlev, E.A. Ugolkova // *Physica B.*– 1999.– V. 265.– P. 170-175.

11. Kita T. Mott transitions in three-orbital Hubbard model at fractional band filling / T. Kita, T. Ohashi, N. Kawakami // *Journal of Physics: Conference Series.*– 2012.– Vol. 391.– P. 012157.

12. Peters R. Orbital order, metal insulator transition, and magnetoresistance-effect in the two-orbital Hubbard model / R. Peters, N. Kawakami, T. Pruschke // *Phys. Rev. B.* – 2011. – vol. 83.– P. 125110-125117.

13. Wahle J. Microscopic conditions favoring itinerant ferromagnetism / J. Wahle, N.Blumer, J. Schlipf, K. Held, and D. Vollhardt // *Phys. Rev. B.* – 1998. – vol. 58, No. 19 , P. 12749-12757.

14. Meyer D. Influence of spin-flip scattering on the stability of ferromagnetism in a two-band Hubbard model / D. Meyer, W. Nolting // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1999. – vol. 11. – P. 5811-5828.

15. Didukh L. Metallic ferromagnetism in the systems with strongly correlated electrons / L. Didukh, O. Kramar // *Condens. Matter Phys.* – 2005. – vol. 8, No. 3 (43). – P. 547-564.

16. Didukh L. Metallic ferromagnetism in an orbitally degenerate system of strongly correlated electrons / L. Didukh, O. Kramar and Yu. Skorenky // *Physica B: Condensed Matter.* – 2005. – vol. 359-361. – P. 681-683.

17. Didukh L. Energy spectrum in the doubly degenerate Hubbard model with strong intra-atomic exchange interaction / L. Didukh, Yu. Dovhopyaty, Yu. Skorenky // *Український Фізичний Журнал.* – 2000. – Т. 45, No. 10. – С. 1207-1210.

18. Didukh L. Energy spectrum of a doubly orbitally degenerate model with non-equivalent subbands / L. Didukh, Yu. Skorenky, Yu. Dovhopyaty // *Condens. Matter Phys.* – 2001. – vol. 4, No. 3 (27). – P. 491-498.

19. Wilson J.A. *The Metallic and Nonmetallic States of Matter.* – London: Taylor & Francis, 1985.

20. Honig J.M. Electronic properties of $\text{NiS}_{2-x}\text{Se}_x$ single crystals: from magnetic Mott-Hubbard insulator to normal metals / J.M. Honig // Chem. Mater. – 1998. – vol. 10, № 10. – P. 2910-2929.

21. Vollhardt D. Non-perturbative approaches to magnetism in strongly correlated electron systems / D. Vollhardt, N. Blümer, K. Held, M. Kollar, J. Schlipf, M. Ulmke // Z. Phys. B. – 1997. – vol. 103. – P. 283–292.

22. Tonegava T. An Application of the Coherent Potential Approximation to Substitutionally Disordered Heisenberg Antiferromagnets / T. Tonegava // Progr. Theor. Phys. – 1974. – vol. 56, №. 5. – P. 1293–1311.

Oleksandr Kramar, Yuriy Skorenkyy, Yuriy Dovichyaty

METAL-INSULATOR TRANSITION IN THE DOUBLY ORBITALLY DEGENERATED BAND WITH THE DENSITY OF STATES PECULIARITIES

In the present paper we investigate a quarter-filled (at site electron concentration $n=1$) doubly orbitally degenerate narrow band in the case of strong intra-atomic Coulomb interaction and the strong Hund's coupling. At various forms of non-perturbed density of states of electrons by numerical calculations the concentration of polar states (holes and doublons) as a function of model energy parameters and temperature has been obtained. It has been shown that changing the form of the density of states slightly modifies the critical parameter at which the phase transition from metallic to insulating ones at a fixed temperature occurs.

Key words: *Hubbard model, orbital degeneracy, metal-insulator transition, concentration of polar states, energy gap*

Роман Ткачук, Божена Робулова, Василь Кузь

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ
УЛЬТРАФІОЛЕТОМ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ЛІКУВАННІ
ПСОРІАЗУ**

Стаття присвячена побудові удосконалених технічних засобів (СВД-матриці) для фотомедичних технологій при лікуванні захворювань шкіри (псоріазу, екзем) шляхом імпульсного опромінення ультрафіолетом пошкодженої поверхні із безперервним контролем процесу та регулюванням параметрів у інтерактивному та автоматичному режимах. Запропонований підхід забезпечує використовувати вибрані критерії для оперативного контролю параметрів процесу та підвищення ефективності технічних засобів на основі оптико-електронних пристроїв.

Ключові слова: *опромінення, СВД-матриця, ультрафіолет, шкіра.*

Вступ. Серед поширених хвороб шкіри людини, які важко піддаються лікуванню відносять дерматози (псоріаз, екземи), що характеризується запальним, хронічним, рецидивним характером захворювання. В світі декілька десятків мільйонів людей страждають від цієї хвороби [1]. Відомі методи лікування (фармакологічні, кріотерапія, плазмафорез, народна медицина тощо) не завжди є ефективними, тому потребують додаткових досліджень та їх удосконалень, особливо мало дослідженими є неінвазивні методи на основі опромінення шкіри пацієнта ультрафіолетом (УФ). Ультрафіолетова терапія набуває широкого застосування у випадках, коли існують проблеми індивідуальної непереносимості ліків та алергії на їх застосування. Перспективним напрямом лікування псоріазу є метод, який передбачає контрольований вплив на окремі ділянки біооб'єкту (БО) з використанням світлового потоку УФ-А з довжиною хвиль в діапазоні 320-420 нм [2]. Він має

перевагу при комплексному застосуванні у випадках алергії на окремі суспензії, медикаменти. При неконтрольованій дії ультрафіолету можливе пошкодження білків, ліпідів та нуклеїнових кислот через підвищену чутливість організму до УФ і внаслідок фотохімічного руйнування компонентів, тому це потребує оперативного оцінювання стану поверхні шкіри і підшкірних змін та регулювання цих процесів [2, 3].

Відомі до застосування пристрої при опроміненнях шкіри (на базі ртутних ламп) не передбачають керування та регулювання потоку ультрафіолету, тому не враховуються індивідуальні особливості пацієнта із-за відсутнього зворотнього зв'язку, а дія УФ контролюється практично тривалістю процесу. Виникає необхідність враховувати зміну оптичних характеристик БО в процесі дії опромінення для забезпечення контролю і регулювання інтенсивності опромінення [4]. Саме тому існує потреба у розробці нових удосконалених приладів, які би вирішували цю задачу.

Постановка задачі дослідження та шляхи вирішення проблеми.

Для динамічного опромінення УФ та регулювання процесу з контролем стану шкіри потрібне створення технічної системи, яка б відповідала наступним вимогам. Вона повинна забезпечувати оперативне керування процесом при зміні динаміки стану шкіри під час проведення процедур опромінення. Формування просторового і спектрального розподілу випромінення при проведенні процедури з використанням світлодіодних (СВД) матриць потребує розроблення моделі та конструкції системи динамічного опромінення об'єкту. Такі матриці мають ряд переваг у порівнянні з ртутними лампами. Енергоефективність світлодіодів у п'ять разів вища, ніж в ртутно-кварцових лампах та істотно збільшений корисний термін служби, забезпечується стабільність колірної температури та характеристик і параметрів. Світлодіодні пристрої є малоінерційними, а керування роботою може здійснюватися за допомогою цифрового мікроконтролера, який оперативно забезпечує необхідні зміни режимів згідно розробленого алгоритму.

Розглянемо процес опромінення БО із регулюванням енергії в імпульсному режимі з допомогою СВД-матриці, що розташована в площині випромінювання із заданими координатами. Схема опромінення шкіри на основі СВД-матриці з контролем відбитої енергії від епідермісу, що знаходиться на віддалі h від елементів матриці, наведена на рис. 1.

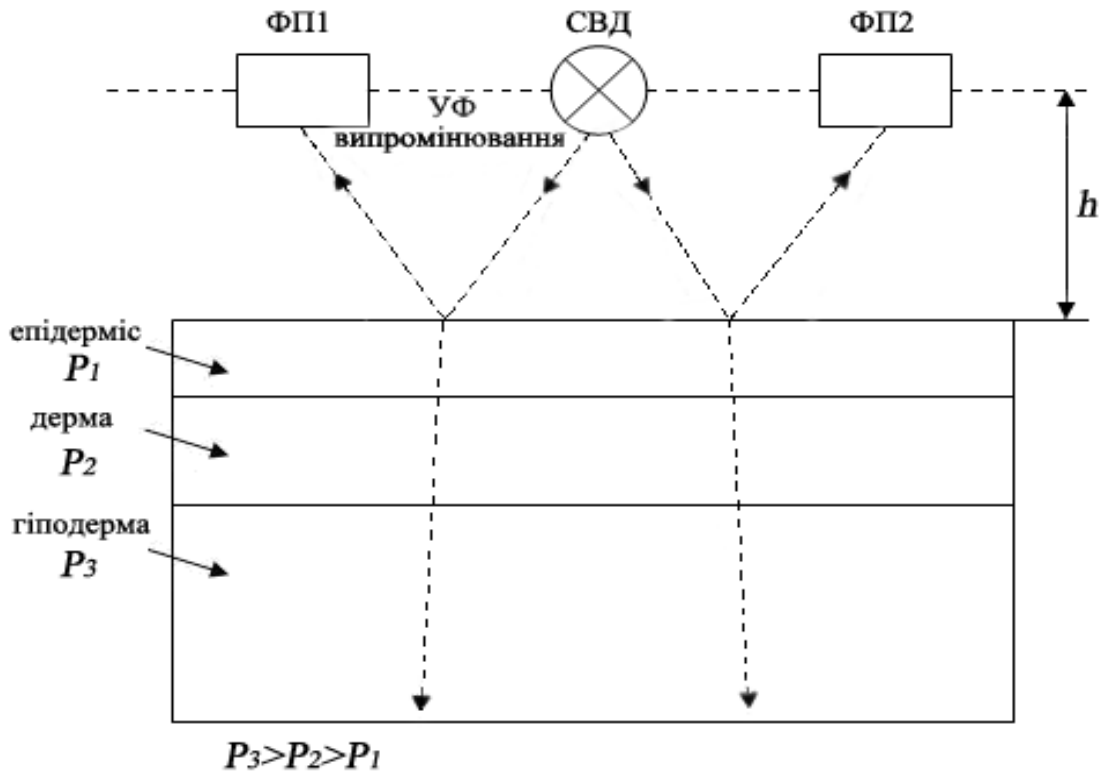


Рисунок 1. Схема опромінення шкіри ультрафіолетом з контролем процесу

В залежності від стану епідермісу, дерми і гіподерми та ураженої поверхні шкіри, змінюються коефіцієнти поглинання опроміненої поверхні та відбитої енергії, що потрапляє на розташовані в площині матриці фотоприймачі ФП1 та ФП2, а зміна величини струму служить для вироблення керуючих команд регулювання енергії випромінювання СВД. Для представлення усіх взаємозв'язків технічної системи динамічного опромінення з можливістю подальшого керування, контролю і корекції параметрів опромінення ультрафіолетом на рис. 2 наведено її блок-схему. Фотоприймачі ФП1, ФП2 являють собою фотодіоди УФ діапазону, принцип дії яких ґрунтується на зміні струму через р-n-перехід при потраплянні світла з довжиною хвилі, що відповідає області власного поглинання напівпровідникового матеріалу. Для технічної системи застосовано фотодіоди німецької компанії “SGlux” типу SG01M-18ISO90, зі спектральною чутливістю в діапазоні до 367 нм [6], а світлодіоди типу UVTOP 335-TO39HS компанії “Sensor Electronic Tehnology” (довжина хвилі 340 нм) [5,6]. Блок керування змінює режими СВД-матриці з врахуванням стану шкіри.

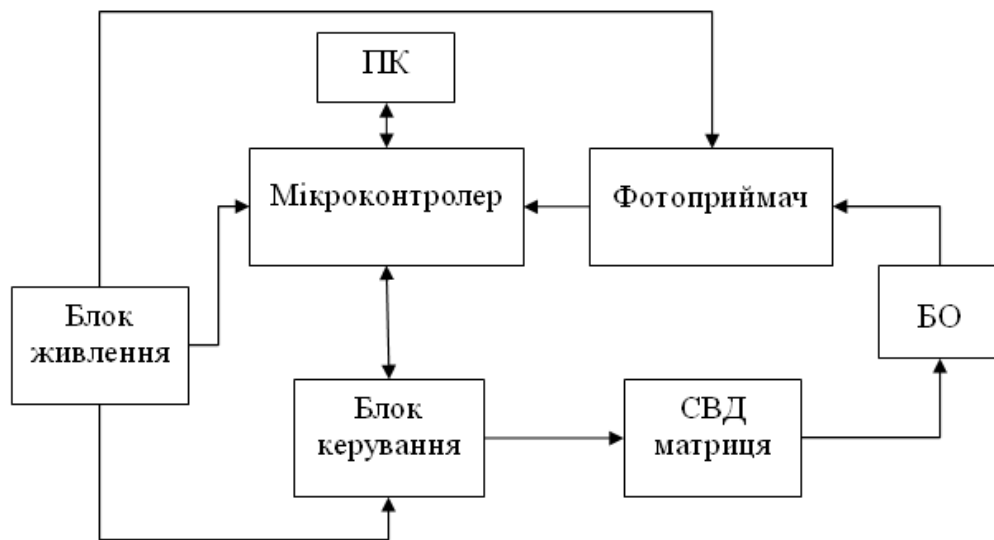


Рисунок 2. Блок-схема системи динамічного опромінення ультрафіолетом

Для функціонування системи необхідна розробка алгоритму роботи мікроконтролера, що забезпечує оперативну зміну режимів опромінення шкіри, в залежності від величини відбитої енергії, яка реєструється ФП. Інформація про величину цієї енергії постійно передається на мікроконтролер, що стає підґрунтям для прийняття рішення щодо початку внесення змін в регулювання та підтримування потрібного режиму роботи.

Визначення енергії, яка поглинається шкірою людини при випромінюванні СВД в заданому діапазоні довжин хвиль (згідно формули Планка для розподілу енергії в залежності від довжини хвилі), розраховуються коефіцієнти поглинання для монохроматичного випромінювання, або знаходять їх у виді залежних функцій для всього діапазону випромінювання [4]. Для потоку, який випромінюється і проходить через шари товщиною x неоднорідного середовища (для захворювань шкіри: пухирці, відшарування епідермісу, зміна параметрів дерми, гіподерми), відбувається ослаблення інтенсивності, внаслідок зміни параметрів середовища в процесі лікування. Інтенсивність потоку визначається для кожного шару наступним чином:

$$I_{\lambda,x} = I_{\lambda,x=0} e^{-k_{\lambda}x}, \quad (1)$$

де $I_{\lambda,x=0}$ – інтенсивність потоку, що випромінюється СВД на поверхні епідермісу; k_{λ} – коефіцієнт ослаблення інтенсивності потоку в шарах біологічного середовища із змінними параметрами (коефіцієнтів

поглинання і розсіювання, нерівномірності щільності дерми і гіподерми, впливу анізотропії тощо).

Конструктивна рамка СВД-матриці, в якій розміщено дев'ять світлодіодів (рис.3), обмежує кути випромінювання у кожному зі світлодіодних каналів і захищає від небажаного розсіювання. Корпус рамки виконано з електроізоляційного, непрозорого, міцного та нетоксичного матеріалу, який забезпечує надійне кріплення всіх елементів матриці. Незначним внесенням затінення та відбиття УФ-А при випромінюванні та формуванні світлового потоку для цієї конструкції рамки будемо нехтувати.

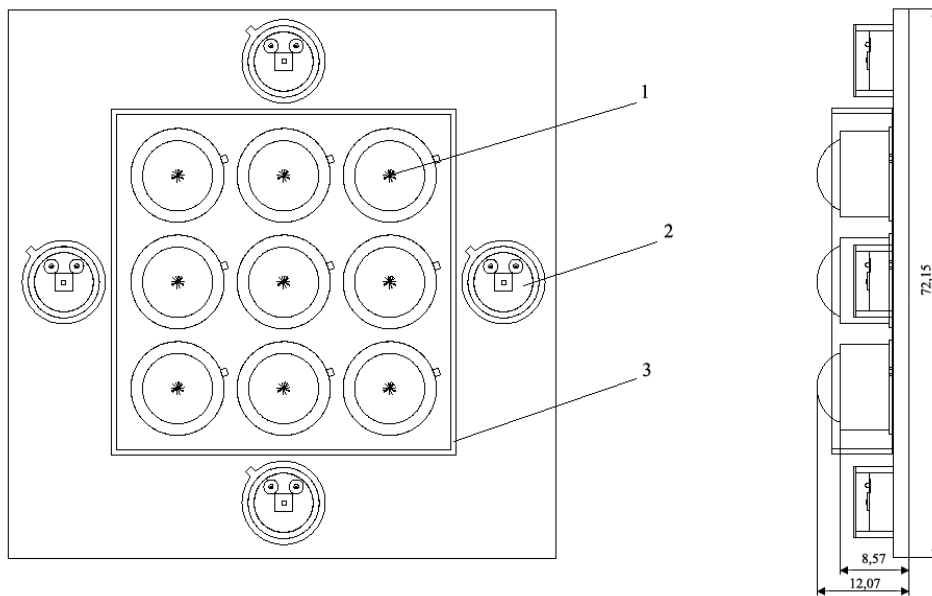


Рисунок 3. Конструкція СВД-матриці: 1 – УФ-світлодіод; 2 – фотодіод; 3 – обмежуюча рамка

Перевірка функціонування окремих блоків потребує імітаційного моделювання. Для розробки віртуальної 3D-моделі-симулятора ультрафіолетом та створеної СВД-матриці, використано метод моделювання в програмному середовищі Trace Pro 6. Проведення імітаційного моделювання дозволяє провести верифікацію моделі. Для цього необхідно розрахувати і уточнити параметри, що максимально наближені до реальних характеристик біологічного об'єкту, де забезпечено необхідне керування СВД-матриці світловими потоками (діапазон довжин хвиль 320-400 нм).

Для кожного окремого шару шкіри визначаються параметри за формулою (2) їх межі змін, які згодом вносяться в підпрограми Bulk Scatter, та Material програмного середовища Trace Pro 6 [7, 8]:

$$SDF = p(\theta) \frac{1 - g^2}{4\pi(1 + g^2 - 2g \cos\theta)^{3/2}}, \quad (2)$$

де p – щільність шару тканини; θ – коефіцієнт розсіювання; g – коефіцієнт анізотропії.

В режимі повного випромінювання (включені усі СВД матриці) сумарна потужність становить 6,94 мВт/мм². Для автоматичного керування випромінювання ультрафіолету СВД-матриці необхідний перехід та зміна наступного режиму, а тому встановлюється поріг величини потужності відбитого УФ, який для здорової шкіри становить 0,76 мВт/мм². Перевірка проводилась в 5-ти режимах, при яких поступово змінювали кількість випромінюючих УФ СВД. При виключенні кожного послідовного світлодіода СВД-матриці, цей поріг буде зменшуватися на 0.084 мВт/мм². У режимі повного випромінювання УФ (наведений на рис. 4) встановлюється рівномірний розподіл світлового поля на віддалі 10-20 мм від поверхні випромінювання.

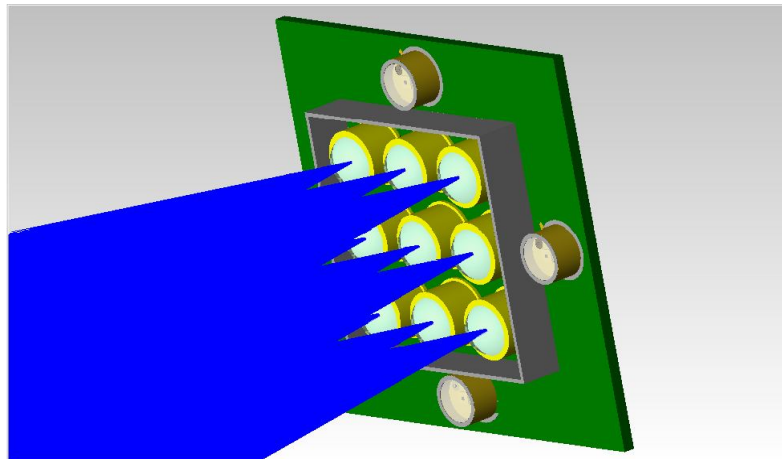


Рисунок 4. Режим повного випромінювання УФ СВД-матрицею

Потужність відбитого УФ при постійній енергії випромінювання СВД-матриці залежить від стану поверхні пошкодженого епідермісу. Наведені на рис. 5 діаграми розподілу потужності відбитого та величини поглинутого шарами шкіри ультрафіолету в програмному середовищі Trace Pro 6 підтвердили правильність підходу до створення технічної

системи динамічного опромінення із можливістю подальшого керування, контролю і корекції параметрів опромінення.

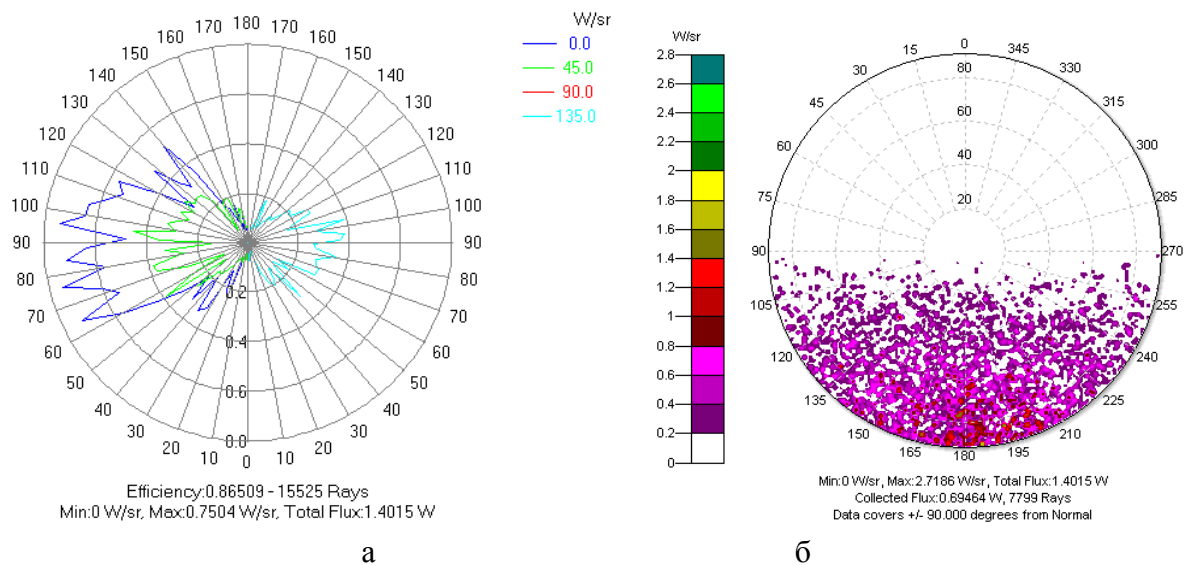


Рисунок 5. Діаграми розподілу: а – розподіл потужності відбитого УФ при повному випромінюванні СВД-матриці; б – розподіл величини поглинутого шарами шкіри УФ

Отримані результати досліджень на змодельованій системі, що складається з СВД-матриці на базі світлодіодів типу UVTOP335-TO39NS (довжина хвилі 340 нм) та контролю відбитого потоку енергії від опроміненої поверхні, дозволяють стверджувати, що моделювання процесів динамічного опромінення шкіри ультрафіолетом при псоріазі є значним кроком в комплексному лікуванні цієї хвороби. Удосконалення технічної системи на базі проведених досліджень дозволить ширше застосовувати фотомедичні технології опромінення УФ при захворюваннях псоріазу внаслідок автоматизованого контролю параметрів процесу та його ефективного керування, скорочення часу та кількості процедур.

Висновок. Для забезпечення необхідної динаміки просторового і спектрального розподілу опромінення в процесі фотомедичних технологій вирішена задача моделювання динамічного опромінення з використанням світлодіодних пристроїв у виді матриці. Для її вирішення було вибрано метод моделювання системи та здійснено розробку блок-схеми системи динамічного опромінення ультрафіолетом для лікування псоріазу. Описано основні блоки та взаємозв'язки між ними. Проведено

моделювання пристрою опромінення (СВД-матриці) при зміні режимів за допомогою програмного середовища Trace Pro 6.

Література

1. <http://uk.wikipedia.org/wiki/Псоріаз>. [Електронний ресурс]. – 2014.
2. Круковская Л.П. Ультрафиолетовое излучение – его биологическое воздействие, приемники: Методическое пособие / Л.П. Круковская // СПб: СПбТПУ, 2009. – 26 с.
3. Vjorm L. J. Photobiology: The science of life and light. – 2010. – 695 р.
4. Ткачук Р.А. Моделювання динамічного опромінення для фотомедичних технологій при неперервності контролю параметрів процесу / Ткачук Р.А., Івах М.С., Кузь В.І. // Вісник СумДУ. – 2013. – №2. – С.98-105.
5. UVTOP335 datasheet, Set, inc. <http://www.s-et.com/uvtop.html>. [Електронний ресурс].
6. SG01S–18 datasheet, «SGlux». <http://www.scitec.uk.com/uvphotodiodes/datasheets/sg01s-18.pdf>. [Електронний ресурс].
7. S.R. Mordon. Mathematical modeling of laser lipolysis. / S.R. Mordon, B.Wassmer, J.Pascal. OSYRIS Lasers et Applications 121 Rue Chanzy, 59260 Hellemmes, France. doi:10.1186/1475-925X-7-10.
8. Trace Pro 6.0 Lambda Research Corporation. [Електронний ресурс].

Roman Tkachuk, Bozhena Robulova, Vasyl Kuz

MODELING OF DYNAMIC IRRADIATION WITH ULTRAVIOLET LIGHT TREATMENT FOR PSORIASIS

The article is devoted to the construction of advanced technical equipment for photomedic technology in the treatment of psoriasis and ekzema by pulsed irradiation damaged skin with continuous supervision and control of the process parameters in an interactive and automatic modes. The proposed approach provides the use of selected criteria for operational control of process parameters and improve the efficiency of optoelectronic devices.

Keywords: *radiation, LED-matrix, ultraviolet, skin.*

УДК 621.314.213.08

Богдан Оробчук, Віктор Лісняк

АВТОМАТИЗОВАНА ЕНЕРГООЩАДНА СИСТЕМА ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

В статті розглядається будова та принцип функціонування фокукуючого сонячного колектора для опалення та підігріву води індивідуального житлового будинку з системою, яка відслідковує рух Сонця.

Ключові слова: *фокукуючий сонячний колектор, нетрадиційні джерела енергії, автоматизована система.*

Потреби людства в споживанні енергії постійно збільшуються. З року в рік спостерігаємо тенденції щодо збільшення видобутку природних ресурсів і зростання їх ціни, пришвидшення пошуку нових джерел цих ресурсів. В кінцевому результаті це призведе до виснаження цих ресурсів та пошуку і заміни їх на альтернативні джерела енергії. Альтернативна енергетика – це крок в майбутнє, і чим скоріш ми це зрозуміємо, тим менш болючою буде перехід на альтернативні джерела енергії.

Зрозуміло, що технологічні процеси, які в даний час є базовими в сучасній енергетиці, неможливо раптово перевести з традиційних джерел на нетрадиційні або альтернативні. Але, на нашу думку, настає слушний момент, який дозволяє розпочати інвестування в цю енергетику, і той, хто перший зробить крок в цьому напрямку, рано чи пізно буде у виграші.

Різновидів альтернативної енергетики є достатня кількість, починаючи з вітрових електростанцій і закінчуючи в майбутньому супутниками з сонячними панелями на орбіті. В цій роботі ми хочемо представити один з різновидів альтернативної енергетики, який в процесі використання піддається модернізації і може збільшувати свою ефективність.

В якості інноваційного проекту ми пропонуємо комплексну енергозберігаючу систему забезпечення опалення та гарячого водопостачання індивідуального житлового будинку на базі розробленого фокусуєчого сонячного колектора. На рис. 1 показано загальний вигляд фокусуєчого сонячного колектора, розміщеного на даху будинку, а на рис. 2 – його конструкція та функціональна схема.

Принцип дії системи на базі фокусуєчого сонячного колектора

Система складається з таких елементів (рис. 2):

1 – захисне скло з високою пропускнуою спроможністю та малим кутом заломлення;

2 – теплоізолятор (в якості теплоізолятора може бути використана скловата або інший матеріал, який витримує високі температури);

3 – фокусуєчі дзеркала (виконані у вигляді конусної форми з кутом 135 градусів для забезпечення відбивання променя перпендикулярно до колектора);

4 – колектор з високим коефіцієнтом поглинання тепла;

5 – мідні труби, які забезпечують циркуляцію теплоносія в системі теплопостачання житлового будинку;

6 – гнучкі утеплені труби (підбираємо такий тип труб, щоб колектор міг обертатися на 360 градусів і повертатися у початкове положення без їх пошкодження);

7 – система керування колектором (слідкує за положенням Сонця на небосхилі, виконує направляючу функцію).

Особливість роботи системи полягає у використанні системи керування фокусуєчим сонячним колектором, яка буде слідкувати за Сонцем, тим самим збільшуючи час максимальної ефективності системи у порівнянні з стаціонарним нерухомим колектором. Запропонована система дозволяє суттєво збільшити час корисної роботи протягом сонячного дня, але водночас збільшуються втрати енергії для керування колектором (роботою крокового двигуна) та транспортування теплоносія в систему теплопостачання будинку.

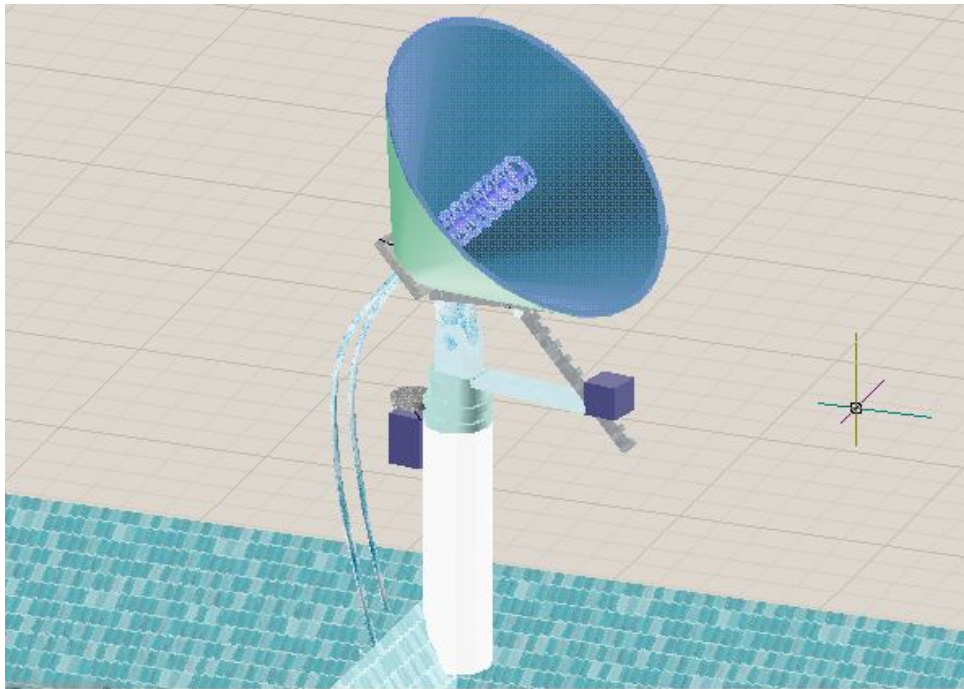


Рисунок 1. Загальний вигляд фокуруючого сонячного колектора

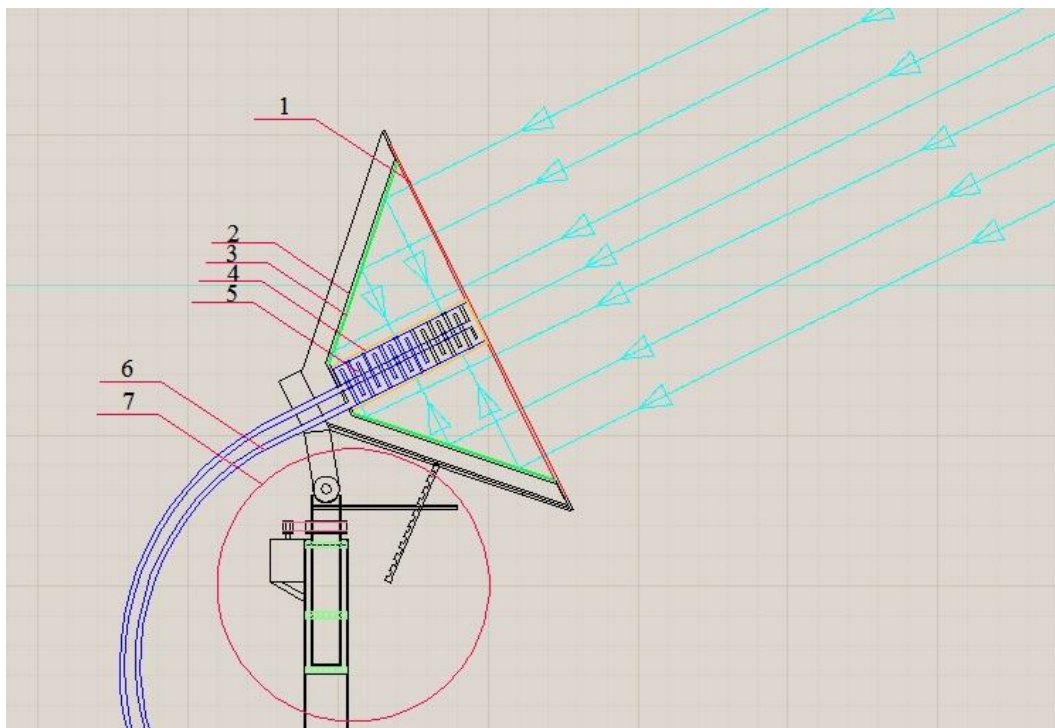


Рисунок 2. Будова фокуруючого сонячного колектора

Запропонована конструкція сонячного колектора суттєво відрізняється від існуючих на даний час конструкцій сонячних колекторів. Сама конструкція розробленого сонячного колектора нагадує сонячну піч для приготування їжі (робоча температура в літні сонячні дні може становити вище 400 °С), це і є її головною перевагою: простота

виконання, недорогі та доступні матеріали, а також нескладна експлуатація цієї системи.

Принцип роботи запропонованої системи наступний: сонячне проміння попадає на поверхню площі скла, проходить через неї і попадає на фокусуюче дзеркало, яке відбиває промені на поверхню нагрівального елемента з високим коефіцієнтом поглинання. Температура нагрівального елемента збільшується у десятки разів, адже всі дзеркала фокусують свої промені в цю точку. Таким чином, потрібно тільки подати по мідних трубах теплоносії (наприклад, фреон) в систему тепlopостачання і отримати теплову енергію. В запропонованій конструкції використовується герметична утеплена оболонка, яка зменшує втрати теплоти, а також стимулює утворення парникового ефекту всередині сонячного колектора, тим самим збільшуючи температуру середовища оболонки. До переваг розробленого фокусуючого сонячного колектора можна віднести наявність захисного скла, яке легко чистити при експлуатації, суттєве зменшення використання міді в системі теплоносія, ваги колектора, а також можна збільшувати площу поглинання сонячного випромінювання, не збільшуючи при цьому площу самого колектора.

Висновки. Розроблена нами система може бути альтернативою традиційним системам опалення або ж може працювати з ними в паралельному режимі. Крім цього вона не потребує ніяких енергоносіїв в процесі опалення, але для збільшення ефективності потребує живлення електроенергією крокового двигуна, живлення помпи для перекачування теплоносія в системі тепlopостачання та системи відслідковування за Сонцем. Варто відмітити, що такий крок є виправданим, адже у порівнянні з отриманою енергією витрати електроенергії є мізерними.

Крім цього, система дешева у виготовленні та проста в експлуатації, має легку конструкцію, а також може виконуватись будь-яких розмірів. Ще однією перевагою розробленого сонячного колектора є те, що при збільшенні площі сонячного випромінювання площа самого колектора суттєво не змінюється.

Література

1. Інформація по плануванню систем сонячних колекторів. – Представництво «Vaillant» в Україні, 2007.
2. Інформація по плануванню. Теплові насоси. – Представництво «Vaillant» в Україні, 2007.
3. Тепловий насос системи опалення. Програма семінару навчання. – Представництво «Vaillant» в Україні, 2007.
4. Програма державної підтримки розвитку нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії та малої гідро- і теплоенергетики.
5. Рабинович М., Ферт А. Використання сонячної енергії для теплопостачання на Україні. // Поновлювана енергія, № 3, 1998.
6. Шурчков А. та ін. Ресурсна база нетрадиційної теплоенергетики України. М+Т, 6/2001.
7. Галимова Л.В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. Учеб. пособие для спец. «Техника и физика низких температур»/Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 1997. – 226 с.
8. Редянин В.Я., Утемесов М.А., Федин Л.Н., Горбунов Д.Л. Исследование режимов совместной работы теплового насоса с вертикальным грунтовым теплообменником // Теплоэнергетика № 4, 1997.
9. Дадькин Ю.Д. Нетрадиционные источники энергии и перспективы их освоения / Международный симпозиум “Топливоэнергетические ресурсы России и др. стран СНГ”. Санкт-Петербург, 1995.

Bohdan Orobchuk, Viktor Lisnyak

**AUTOMATED ENERGY SAVING SYSTEM FOR INDIVIDUAL
RESIDENTIAL BUILDINGS**

In the article the structure and operation principle of focusing solar collector for heating and hot water supply of individual residential building with tracking the movement of the solar system is discussed.

Key words: *focusing solar collector, alternative energy, automated system.*

Михайло Паламар, Ігор Осов'як

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИНХРОНІЗАЦІЇ АБОНЕНТІВ У СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕНАЛАШТУВАННЯМ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ

У статті розглянуто метод синхронізації абонентів у системі цифрового радіозв'язку з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти на основі комбінації методів сканування та очікування з використанням принципу плинної зміни частот входження в синхронізм, що дозволяє підвищити надійність синхронізації. Метод використано у розробці цифрової УКХ радіостанції з ППРЧ для ТРЗ "Оріон". Приведено результати випробувань, які підтвердили його ефективність за критеріями підвищення надійності синхронізації.

Ключові слова: *псевдовипадкове переналаштування робочої частоти, синхронізація, інтервал виклику, синхропосилка.*

Вступ. Бурхливий розвиток телекомунікаційних систем в останні десятиліття створює певні труднощі при побудові нових інформаційних мереж з радіодоступом. Електромагнітна обстановка в радіоканалах всіх частотних діапазонів, аж до міліметрового, безперервно ускладнюється і новим радіозасобам доводиться працювати в умовах масованого впливу зовнішніх випадкових, а в певних випадках спеціально створених завад. Зниження достовірності прийнятої інформації внаслідок впливу цих факторів стає суттєвою перешкодою для забезпечення якісного зв'язку. Особливо гостро питання стоїть для радіосистем, призначених для передачі важливої, або таємної інформації, які часто працюють в безпосередній близькості з великою кількістю діючих радіозасобів

різноманітного призначення. Прикладами таких радіосистем можуть бути перш за все військові системи радіозв'язку, радіостанції диспетчерського зв'язку на транспорті, банківські радіомережі передачі інформації, устаткування локальних мереж медичного призначення, системи радіооповіщення населення Міністерства надзвичайних ситуацій і багато інших.

Для забезпечення прийнятної достовірності при передачі інформації в таких системах доводиться застосовувати спеціальні все складніші і дорожчі методи і засоби, як наприклад: збільшувати потужність передавачів, використовувати методи рознесення частот передачі, застосовувати складні завадостійкі види модуляції, використовувати перемішування інформації (скремблювання), впроваджувати в інформаційний потік надлишкову інформацію і застосовувати завадостійке кодування з виправленням помилок і т.п.

В загальному синтез архітектури радіозасобів, вибір способів опрацювання сигналу для абонентського інформаційного обміну, методи найкращого доступу до абонента, оперативність передачі інформації, надійний захист інформації від несанкціонованого доступу і все це в умовах інтенсивного впливу завад для задач надійного захищеного зв'язку вирішені недостатньо ефективно і вимагають додаткових досліджень.

Аналіз та постановка задачі.

Одним із засобів підняття завадостійкості цифрових засобів зв'язку в умовах організованих завад є метод розширення спектру сигналу в ефірі шляхом псевдовипадкового переналаштування робочої частоти (ППРЧ, FHSS). Робоча частота декілька сотень раз в секунду стрибкоподібно змінюється в межах виділеного частотного діапазону відповідно до псевдовипадкової послідовності (ПВП) відомої передавачу та приймачу. Якщо забезпечити комплекс технічних та організаційних заходів, які з певною достовірністю гарантуватимуть невідомість для третьої сторони відповідної ПВП, то ППРЧ можна також розглядати як метод захисту інформації а також як спосіб приховування самого факту зв'язку.

На сьогоднішній день найбільш ефективними з точки зору співвідношення вартості системи та величини досягнутого ефекту є системи повільного ППРЧ [1]. Особливістю повільного ППРЧ є те, що протягом роботи на одній частоті передається декілька бітів інформації.

В літературі [1, 2, 3] описано типові структурні схеми систем ППРЧ. В усіх них наявні синтезатори частоти, в яких частота задається генераторами ПВП. Загальною особливістю усіх цих систем є необхідність забезпечення синхронної роботи синтезаторів в частотно-часовій області. Для передачі цифрового потоку необхідне досягнення також бітового та кадрового синхронізму. Метод забезпечення початкової синхронізації є фактором, що визначає особливості тієї чи іншої структурної схеми системи з ППРЧ. Існуючі методи та схемно-алгоритмічні засоби синхронізації можна узагальнено звести до наступних трьох видів [1]:

- Системи з паралельним методом пошуку сигналу передавача. По суті являють собою багатоканальний приймач. На основі аналізу часово-частотного розподілу сигналу передавача приймач отримує інформацію, необхідну і достатню для досягнення синхронізму.
- Системи з послідовним пошуком. До настання синхронізму одноканальний приймач сканує область частот в якій найбільш ймовірна робота передавача в даний момент часу.
- Системи, приймач яких до моменту настання синхронізму очікує сигнал передавача на одній частоті. Після досягнення початкового синхронізму робоча частота приймача змінюється синхронно до зміни робочої частоти передавача [4].

В більшості випадків ці методи ґрунтуються на визначені кореляції між прийнятим сигналом та сигнатурою, яка передається передавачем, як правило, на початку сеансу зв'язку. Проте усі згадані вище методи синхронізації мають певні недоліки. Насамперед це необхідність зовнішніх засобів часової корекції, складних високоточних тактових генераторів. Також вони характеризуються великим значенням часу входження в синхронізм та низькою ймовірністю успішного входження

при заданому значенні початкової максимальної розбіжності в системних годинниках передавача та приймача [1]. Тому пошук ефективних методів і алгоритмів синхронізації залишається актуальним.

Метою роботи є розроблення і дослідження програмно-апаратного алгоритму установки синхронізації в системі ППРЧ, який скорочує час настання синхронізації та стійкий до певної неузгодженості системного часу між абонентами.

Метод підвищення швидкості синхронізації без зовнішніх джерел точного часу в частотно-часовій області.

Запропонований нами метод синхронізації систем радіозв'язку з повільним ППРЧ є комбінацією методу сканування та методу очікування з одночасним використанням принципу плинної зміни частот входження в синхронізм [5]. В ньому також реалізовано спосіб відновлення бітової синхронізації з використанням одnobітних паралельних обчислень.

Час передачі інформаційного цифрового пакету розбивається на так звані інтервали виклику (ІВ), кожен з яких має свій номер. На початку ІВ генератори ПВП ініціалізуються ключами, які є функцією базового ключа та номеру ІВ.

Передавач перед початком передачі даних передає синхропосилку, яка являє собою послідовність імпульсів виклику. Імпульси виклику несуть інформацію про номер інтервалу виклику та номер імпульсу виклику з початку синхропосилки. Кожен ІВ передається на іншій частоті, причому набір частот, на яких передаються ІВ, являє собою підмножину усіх робочих частот. Цю підмножину частот називатимемо частотами виклику. Набір значень частот виклику однозначно визначаються номером ІВ та базовим ключем. Метод розрахунку частот виклику вибрано таким, що при збільшенні номеру інтервалу виклику на одиницю в множині значень частот змінюється лише один елемент. Таким чином реалізується принцип плинності частот виклику [5].

Потужність множини частот виклику становить n . Синхропосилка містить усього $n*n$ імпульсів виклику. Приймач до початку прийому даних знаходиться в режимі очікування, особливістю якого є те, що він

послідовно сканує частоти у відповідності до свого номеру інтервалу виклику. Номер інтервалу виклику приймача може відрізнятися від номеру інтервалу виклику передавача внаслідок розбіжності в системному часі передавача та приймача. Як наслідок, множина частот, по якій проводить сканування приймач в режимі очікування може відрізнятися від множини частот виклику. Цю множину надалі називатимемо множиною частот очікування.

Час перебування приймача в режимі очікування на одній частоті в n раз більша за час, протягом якого на одній частоті перебуває передавач. Як наслідок, подія зустрічі передавача та приймача на одній частоті носить уже не імовірнісний характер [1], а є гарантованою протягом часу, що не перевищує тривалість синхроросилки у випадку, якщо розбіжність між номером інтервалу виклику передавача та приймача не більша за $n-1$.

У випадку зустрічі передавача та приймача на одній частоті приймач запускаються механізм швидкого відновлення бітової синхронізації та прийому інформації про номер імпульсу виклику та інтервал виклику передавача. На основі цих даних приймач може однозначно прогнозувати момент закінчення синхроросилки та скорегувати розбіжності між своїм значенням номера інтервалу виклику та відповідним значенням передавача. Отже у приймача появляються всі необхідні передумови для синхронізації свого генератора ПВП до генератора передавача. Графічна ілюстрація процесу синхронізації приведена на рис.1. Для спрощення ілюстрування число частот виклику відображених на рисунку рівне 6, а величина розбіжності в множинах частот виклику та очікування показана рівною одиничному значенню. Також умовно зображено, що робочі частоти змінюються послідовно, хоч реально – за псевдовипадковим законом.

Інтервал часу, протягом якого передавач проходить усі значення частот з множини частот виклику називатимемо блоком виклику. Синхроросилка містить N блоків виклику. Для деякого моменту часу, коли приймач знаходиться в режимі очікування потужність перетину множини частот виклику та множини частот очікування позначимо як m .

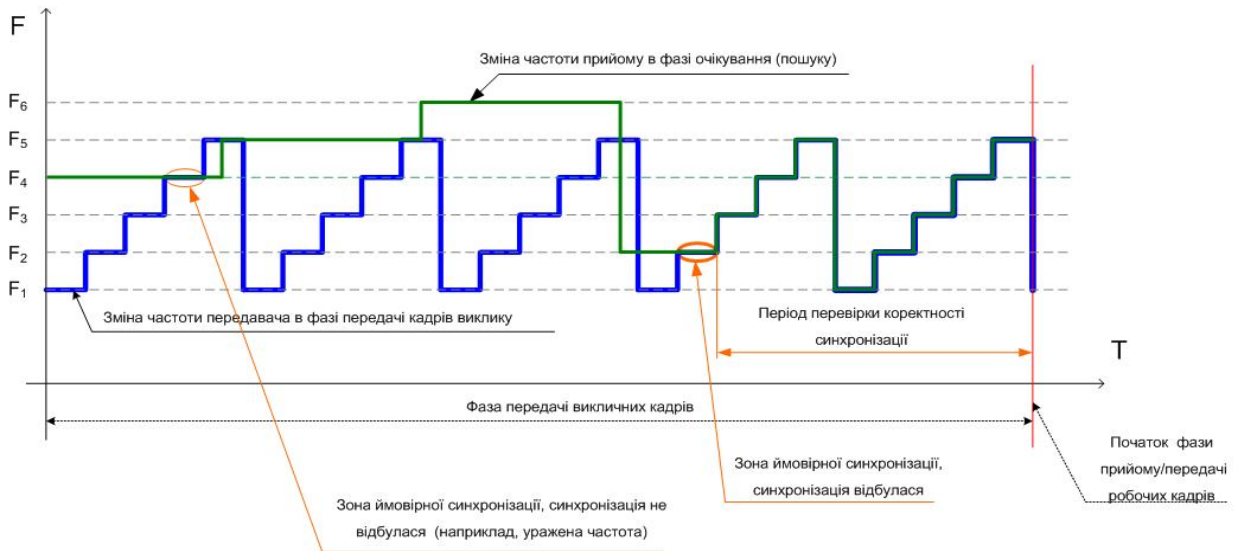


Рисунок 1. Частотно-часові діаграми в стадії початкової синхронізації.

За умови повного перекриття в часі всіх кадрів виклику під час періоду початкової синхронізації ймовірність події зустрічі передавача та приймача на одній частоті (далі – перекриття) протягом першого блоку виклику становить:

$$p(1) = \frac{m}{n} \tag{1}$$

Ймовірність перекриття протягом другого блоку виклику становить

$$p(2) = (1 - p(1))\left(\frac{m}{n-1}\right) \tag{2}$$

В загальному для і-го блоку

$$p(i) = (1 - p(1)) \dots (1 - p(i-1)) \left(\frac{m}{n-i+1}\right),$$

або

$$p(i) = m \frac{(n-m)!(n-i)!}{n!(n-m-i+1)!} \tag{3}$$

Ймовірність встановлення синхронізації на множині перших k блоків становить

$$P_{S_k} = \sum_{i=1}^k p(i) \tag{4}$$

З урахуванням враження робочих частот $Pf_i, i = 1, 2, \dots, n$ ця ймовірність становить

$$P_{S_k} = \sum_{i=1}^k (1 - Pf_i) p(i) \tag{5}$$

Після встановлення частотно-часової синхронізації ініціюється процес встановлення бітової синхронізації цифрового пакету.

Спосіб бітової синхронізації на основі паралельного кореляційного пошуку сигнатури.

По своїй суті бітова синхронізація є визначення моменту оптимального стробування виходу демодулятора. Квантування слід проводити тоді, коли сигнал на виході демодулятора максимально віддалений від зони міжсимвольних переходів. В такому випадку ймовірність бітової помилки буде найнижчою. Саме тому можна стверджувати, що варіант стробування, при якому спостерігається максимальна кореляція з еталоном сигнатури і буде моментом оптимального стробування.

При традиційних підходах до кореляційного способу відновлення синхронізації оцінка кореляції проводиться декілька разів за час, що відповідає тривалості одного символу. Це приводить до значних обчислювальних затрат, так як розмірність еталону сигнатури є добутком бітової довжини сигнатури та кількості оцінок на один біт. Крім того, обчислення слід виконувати в тій розрядності, в якій отримуємо вихідне значення демодулятора.

Суттю запропонованого методу є те, що ми обчислюємо кореляцію до еталону сигнатури в декілька паралельних потоків для вибірок, що містять однобітові значення після компаратора, який включено на виході демодулятора. Для кожного потоку стробування компаратора здійснюється з постійним зсувом. Величина зсуву рівна тривалості біту, яка розділена на кількість потоків. Це дозволяє для оцінки величини кореляції з еталоном сигнатури використати операцію побітового виключного "АБО" з наступним визначенням хемінгової ваги одержаного результату.

Одержане значення є інверсією кореляції. Момент стробування потоку, який дав максимум кореляції та перевищує певне ключове значення і є моментом оптимального стробування (рис. 2).

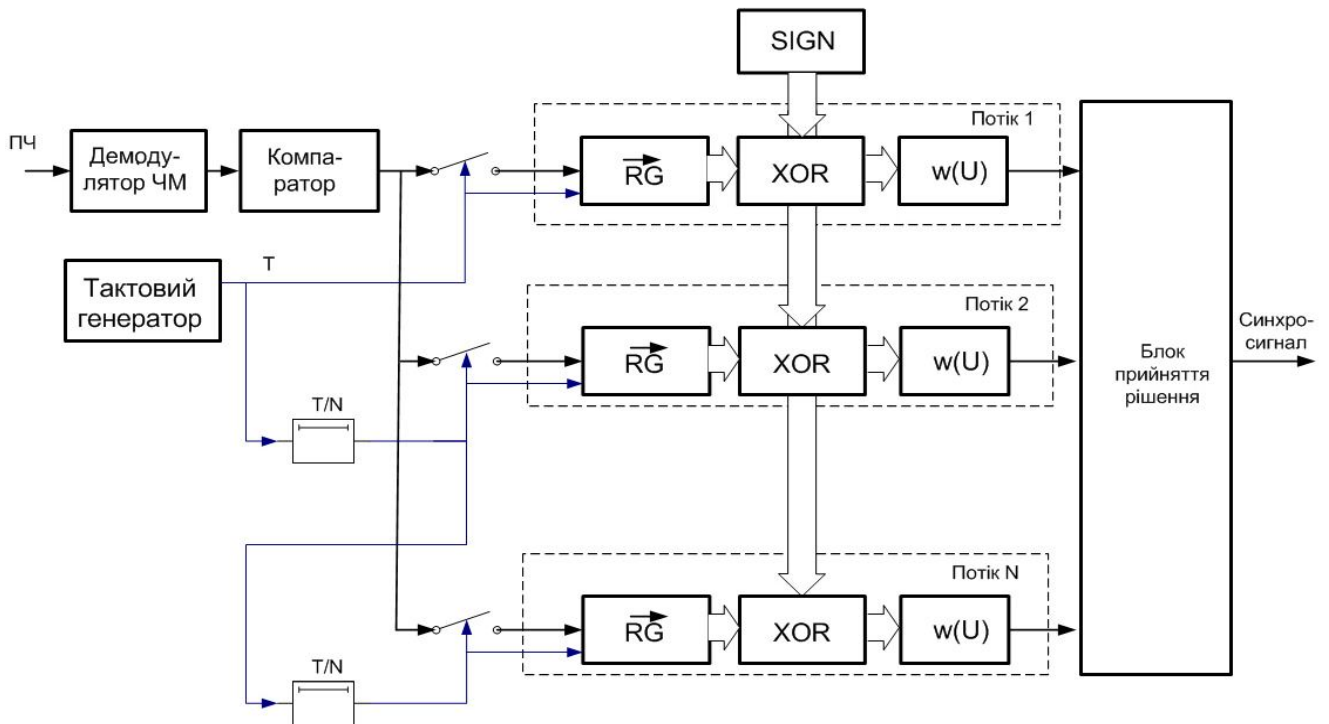


Рисунок 2. Блок-схема запропонованого способу відновлення бітової синхронізації. Тут T/N – елементи затримки, RG – регістр зсуву, $SIGN$ - еталон сигнатури, XOR – обчислювач виключного АБО, $w(U)$ - схема визначення хемінгової ваги.

Практичні результати. Висновки.

Запропонований спосіб синхронізації в частотно-часовій області забезпечує значно менший час настання синхронізму в порівнянні з типовими методами сканування та характеризується значно вищою ймовірністю встановлення синхронізації в порівнянні з системами, які досягають синхронізму методом очікування. Перехід до паралельних обчислень з використанням однобітної математики для кореляційних способів бітової синхронізації дає вииграш в продуктивності системи.

Запропонований спосіб синхронізації реалізовано у цифровій УКХ радіостанції з ППРЧ, що розробляється у ПАТ Тернопільський радіозавод “Оріон”. На рис. 3 приведена функціональна схема блока керування і цифрової обробки сигналів радіостанції з ППРЧ.

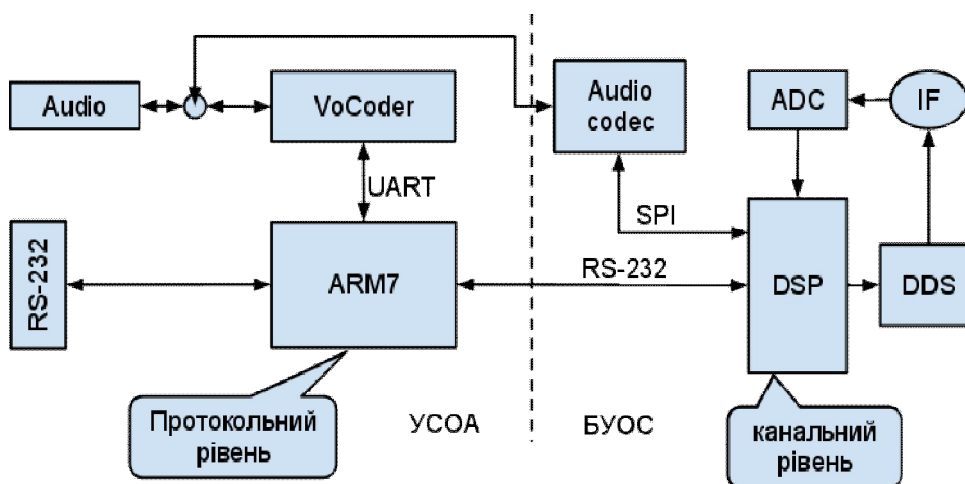


Рисунок 3. Функціональна схема блока керування і цифрової обробки сигналів радіостанції з ППРЧ.

Вигляд модуля блока керування і цифрової обробки сигналів та радіостанції з ППРЧ показані на рис. 4.

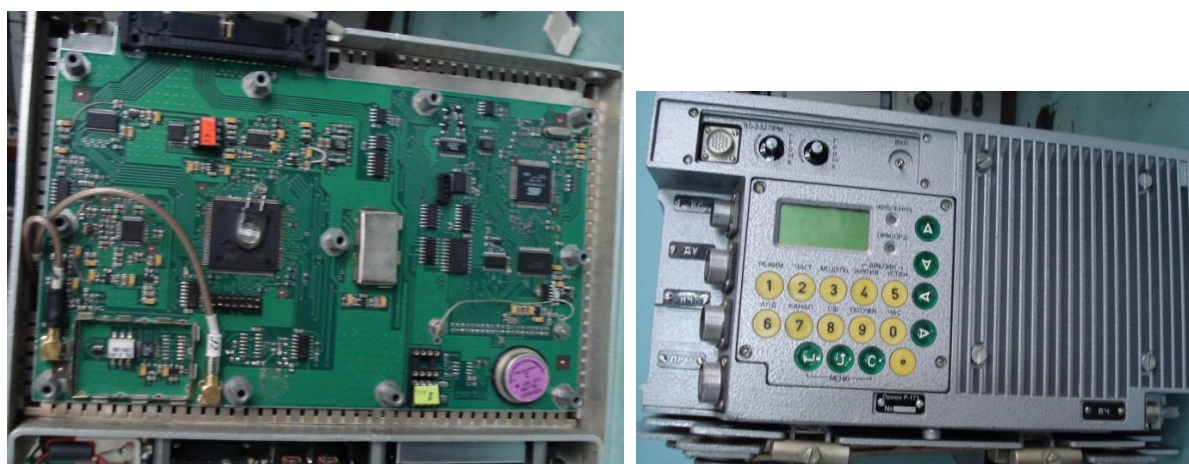


Рисунок 4. Модуль блока керування і цифрової обробки сигналів та вигляд радіостанції з ППРЧ.

Для швидкості переключення ППРЧ в 400 стрибків за секунду з часом передачі синхропосилки протягом 240 мілісекунд на початку сеансу зв'язку настання синхронізації досягається при початкових розузгодженнях системного часу передавача та приймача до 8 хвилин для лабораторних умов, та 4 хвилин для випадку роботи в умовах реального радіо ефіру.

Завдяки запропонованому методу досягнуто часу відновлення бітової та кадрової синхронізації 600 мкс для 24-бітних сигнатур з

одночасним зменшенням орієнтовно у 8 раз потреб в обчислювальному ресурсі (для типу DSP TMS320C5502, що використовується) у порівнянні з традиційними кореляційними методами відновлення бітової та кадрової синхронізації.

Література

1. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: пер. англ. / Под ред. Журавлева. М: – Радио и связь, 2000. – 520с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104с.
3. Борисов В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М: – Радио и связь, 2000, с.218-250.
4. Umberto Mengali, D'Aldo N. Synchronization Techniques for Digital Receivers. Plenum Publishing Corporation , 1997.
5. Піскун С.Ж., Гиндич Б. А.. Принцип побудови алгоритмів синхронізації для декаметрових радіоліній з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти. // VI-й науково-практичний семінар “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, Київ, 2011, с. 163.

Mykhaylo Palamar, Ihor Osov'yak

**IMPROVEMENT OF THE ABONENTS SYNCHRONIZATION
RELIABILITY IN COMMUNICATION SYSTEM WITH
PSEUDO-RANDOM CHANGE OF THE OPERATING FREQUENCY**

The article discusses a method of the subscribers synchronization in digital radio communication system with pseudo-random changing of the operating frequency. This method is based on a combination of scanning methods and expectation methods, with the use of the principle of the shift frequency to input of synchronization. This principle enhances the reliability of synchronization. The method is used in the development of digital FM radio with FHSS mode, and it was used for Ternopil radio plant "Orion". The results of tests are presented, which confirmed its effectiveness criteria for improving of the synchronization reliability.

Keywords: *pseudo-random changing of the operating frequency, synchronization, interval call, synchronous reference*

УДК 378.1

Юрій Скоренький

ВІДКРИТІ ДИСТАНЦІЙНІ КУРСИ ПРИРОДНИЧО-МАТЕМАТИЧНОГО І ТЕХНІЧНОГО СПРЯМУВАННЯ

Подано приклади застосування інструментарію відкритих онлайн-курсів та проаналізовано перспективні шляхи використання ресурсів, які розміщені для вільного доступу, з метою вдосконалення електронних засобів дистанційного навчання вітчизняних університетів.

Ключові слова: *масові відкриті онлайн-курси, методичне забезпечення вищої технічної освіти.*

Інформаційні технології сьогодні глибоко інтегровані у всі сфери економіки та суспільного життя. Покоління, яке виросло в умовах домінування електронних засобів над іншими видами комунікації, надає перевагу віртуальному простору не лише для спілкування, але і для пошуку інформації та навчання. Просторові та економічні бар'єри зникають завдяки появі безкоштовних навчальних ресурсів, таких як Open CourseWare [1], у відкритому доступі. Відповідно, освітній простір все більше глобалізується [2] та використовує комп'ютерні технології, в тому числі для дистанційного навчання у всесвітньому масштабі. У 2008 році вперше було запропоновано термін „масовий відкритий онлайн-курс” (Massive Online Open Courses, MOOC) для позначення курсу "Connectivism and Connective Knowledge", до якого долучилися онлайн кілька тисяч студентів. Сьогодні у всьому світі є багато мільйонів учасників масових відкритих онлайн-курсів [3], що є наслідком повсюдного впровадження революційних веб-технологій та поширеності Інтернету. Тепер студент може віртуально відвідувати лекції професорів Гарварду, МІТ або Стенфорду (згадаємо тут лише кілька найбільш реномованих [4] університетів), без необхідності отримання віз чи сплати за навчання, витрат на переїзди та проживання. Без сумніву, ще ніколи освіта не була настільки ж глобальним явищем, яким вона стала завдяки відкритим

навчальним ресурсам, які безкоштовно пропонують найкращі університети світу. Для українських вищих технічних навчальних закладів це створює не лише конкурентну ситуацію, але в першу чергу надзвичайно широкі можливості вдосконалення власних навчальних матеріалів та методик, стимулювання самостійної роботи студентів.

Забезпечення якості навчання є одним з фундаментальних принципів Європейського простору вищої освіти (the European Higher Education Area, EHEA), створення якого зазвичай називають Болонським процесом [5]. Не торкаючись тут численних хибних уявлень про принципи діяльності та реформування європейських систем освіти, які, на жаль, супроводжують освітню реформу в Україні, хочемо зосередити увагу на принципах та практиці масових відкритих онлайн-курсах, які можуть докорінно змінити ринок освітніх послуг [2, 3] та стати вагомими факторами покращення національної системи вищої освіти. Найважливішою для практичних потреб української академічної спільноти є унікальна можливість поновлювати базу знань, порівнювати наші навчальні курси з світовими стандартами та покращувати наші навчальні методики, доводити собі та нашим (в тому числі іноземним) студентам, що в Україні можна отримати настільки ж якісну освіту, як і в розвинутіших країнах. Мусимо визнати, що в академічному середовищі досить поширеною є ідея, що відкриті курси загрожують існуванню традиційних університетів і традиційних освітніх програм. На нашу думку, відкритість є життєвою необхідністю як науки, так і освіти, настільки ж важливою, як і їх єдність. Звертаючи достатню увагу на дотримання авторських прав на освітні засоби, використовуючи масив матеріалів, які є у вільному доступі, ми можемо незмірно збагатити наші навчальні курси та забезпечити їх кункурентну спроможність. Заохочуючи наших студентів проходити відкриті курси за їх напрямками підготовки, ми створюємо новий тип мотивації та знищуємо бар'єр між пост-радянськими країнами і розвинутими економіками.

На даний час найбільш розвинутими платформами, що пропонують дистанційні навчальні курси університетського типу, є *Coursera* (www.coursera.org, понад 10^7 користувачів) та *edX* (www.edx.org, понад $3 \cdot 10^6$ користувачів). Навчальні матеріали, переважна більшість яких є відкритими, та накопичена статистика (кількість слухачів типового онлайн курсу становить від 10 тисяч до 100 тисяч осіб) є ресурсами,

важливість яких важко переоцінити, якщо йдеться про підвищення якості освіти шляхом впровадження нових технологій навчання. Завдяки можливості залучення значних матеріальних та людських ресурсів, використанню здобутків провідних світових університетських центрів, небачених досі можливостей для збору статистичних даних для вдосконалення навчального контенту, корекції освітніх методик та політики діючі платформи зуміли напрацювати та надати у відкритий доступ надзвичайно цінні навчальні засоби. Ці засоби, зокрема лекційні демонстрації, засоби візуалізації та симуляції, принципи взаємодії із студентами, методичні прийоми викладання, можуть бути з успіхом інтегровані [6] в існуючі електронні навчальні курси на базі платформ ATutor та Moodle, які застосовуються в українських університетах.

Наведемо кілька прикладів вдалого використання інформаційних технологій в рамках відкритих дистанційних курсів. Як правило, від студента такого курсу очікують, що він перегляне відеолекції, прочитає додатковий навчальний матеріал, виконає завдання у вигляді тестів або есе, братиме участь у форумах, де обговорюватимуться важливі питання програми. Деякі курси встановлюють чіткий календарний план виходу відеолекцій та контрольних заходів (це, зокрема, курси на платформах edx.org, coursera.org, iversity.org), відхилення від якого робить успішне завершення неможливим, інші (як p2pu.org, udacity.com, openuped.eu) дають можливість повністю самостійно встановлювати навчальний графік („learning at own pace”). Обов’язковим для онлайн-курсів є чітке визначення цілей навчання, переліку компетенцій, яких слухач набуде після успішного завершення курсу, зазначення вимог до його початкового рівня підготовки та приблизна оцінка часу, який необхідно буде затратити, щоб впоратися з завданнями. Як правило, реєстрація на курс передбачає зобов’язання не порушувати певні етичні норми („honor code”), не списувати та не поширювати розв’язків.

Вже традиційним стало використання відеолекцій та відеосемінарів (рис. 1), запис яких розміщують на серверах відкритого доступу (наприклад, youtube.com чи vimeo.com). Це дозволяє студентові переглядати пояснення викладача довільну кількість разів у зручний час, повертатися до нього, за потреби, на наступних етапах навчання.

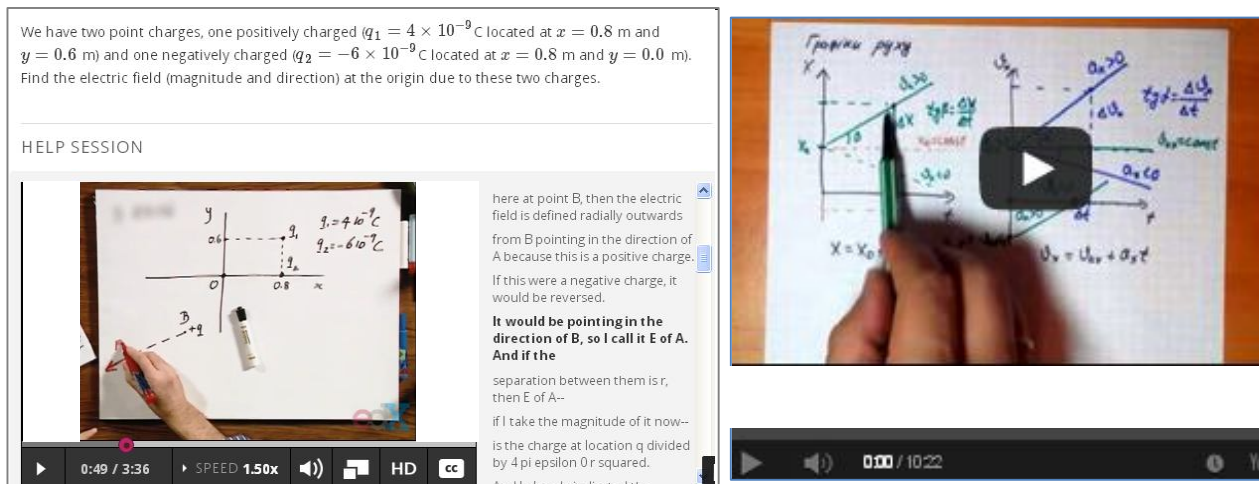


Рисунок 1. Використання відеосемінару на платформі edx.org в курсі Massachusetts Institute of Technology „8.01x Classical Mechanics” (зліва) та на платформі ATutor в курсі ТНТУ „Фізика: дистанційний підготовчий курс” (справа)

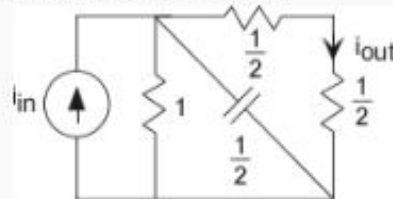
Багато курсів надають вільний доступ до навчальних матеріалів (підручників, віртуальних тренажерів, студентських версій комп'ютерних програм), доступ до яких на загальних підставах є обмеженим або платним. Це дозволяє і студентам відчувати себе на рівних зі своїми однолітками – слухачами провідних університетів, і викладачам (приєднавшись до дистанційного курсу в ролі студента) підвищити свою кваліфікацію, ознайомитися із новими науково-методичними здобутками закордонних закладів освіти.

В умовах загрозливого скорочення фактичного бюджету часу, виділеного на вивчення фундаментальних дисциплін, та катастрофічного розриву між декларованим та дійсним рівнем знань вступників використання ресурсів масових відкритих онлайн-курсів може стати дієвим елементом інформаційного забезпечення навчальних курсів. Проблема впровадження інструментів оцінювання навчальних досягнень, які є достатньо інформативними, достовірними та забезпечують коригуючу функцію, є одною з найбільш важливих [2]. У Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя системи тестового контролю (СТК) електронних навчальних курсів, які є компонентом навчально-методичного забезпечення, застосовуються вже впродовж кількох років [6]. Оптиміальне застосування СТК полягає у поєднанні їх із традиційними, добре розвиненими та

апробованими методами контролю. Як безперечні переваги електронної СТК слід відзначити оперативність обробки результатів та можливість одночасного контролю знань великої кількості студентів, звільнення викладача від монотонної роботи. Слід відзначити, що СТК масових онлайн-курсів природничо-математичного напрямку неодмінно включають набір задач різної складності з поелементною перевіркою розв'язків у формі тестів з відкритою відповіддю, яка автоматично перевіряється навіть і в аналітичній формі (див. рисунки 2, 3).

Question 5

In the following circuit, the output current $i_{out}(t)$ equals $\cos(2t)$.



Find the source, expressed as a real-valued signal.

You entered:

$\sqrt{5} \cdot \cos(2t + \text{atan}(0.5))$

Preview

Help

Your Answer

Score

$\sqrt{5} \cdot \cos(2t + \text{atan}(0.5))$



1.00

Total

1.00 / 1.00

Question Explanation

Since $\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{2}{s+4}$, when the input is $I_{in}e^{j2\pi ft}$, the output is $\frac{2I_{in}}{j2\pi f+4} e^{j2\pi ft}$.

Рисунок 2. Задача з автоматизованою перевіркою розв'язку в аналітичній формі на платформі coursera.org в курсі Rice University „Fundamentals of Electrical Engineering”

COAXIAL CABLE WITH DIELECTRIC : 14.0 POINTS

A certain coaxial cable consists of a copper wire, radius a , surrounded by a concentric copper tube of inner radius b . The space between is partially filled (from b out to c) with material of dielectric constant K . The goal of this problem is to find the capacitance per unit length of this cable. You may neglect edge effects.

Note that for technical reasons, we use the symbol ℓ for charge per unit length, rather than the more typical λ . Do not get confused, ℓ is not a length!

(a) Assume that the copper wire has uniform positive charge per unit length ℓ and the copper tube has uniform negative charge per unit length on its inner surface $-\ell$. Calculate the radial component of the electric field in the region $0 < r < a$. Express your answer in terms of a, b, c, K, ℓ, r , and ϵ_0 (enter ϵ_0 , pi for π and $\ln(x)$ for natural logarithm of x).

0 ✓

0

Calculate the radial component of the electric field in the region $a < r < b$. Express your answer in terms of a, b, c, K, ℓ, r , and ϵ_0 (enter ϵ_0 , pi for π and $\ln(x)$ for natural logarithm of x).

$\frac{K \cdot \ell \cdot \epsilon_0 \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$ ✓

Рисунок 3. Задача з автоматизованою поетапною перевіркою розв’язку в курсі Massachusetts Institute of Technology „8.02x Electricity and Magnetism” на edx.org

Неможливо переоцінити важливість впровадження в дистанційний курс засобів візуалізації (рис. 4), які дозволяють студентів, самостійно експериментуючи з явищем чи приладом, «відчути» його та розвинути

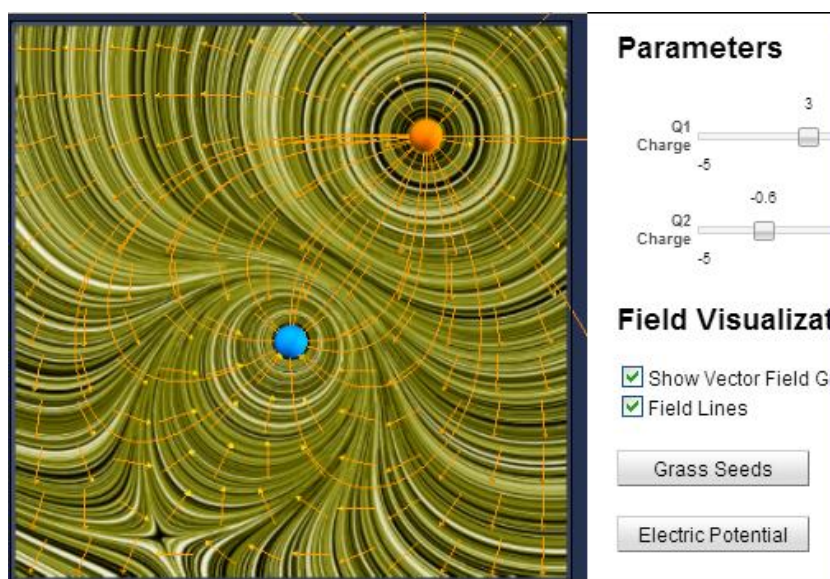


Рисунок 4. Візуалізація електричного поля диполя у курсі Massachusetts Institute of Technology „8.02x Electricity and Magnetism” на edx.org

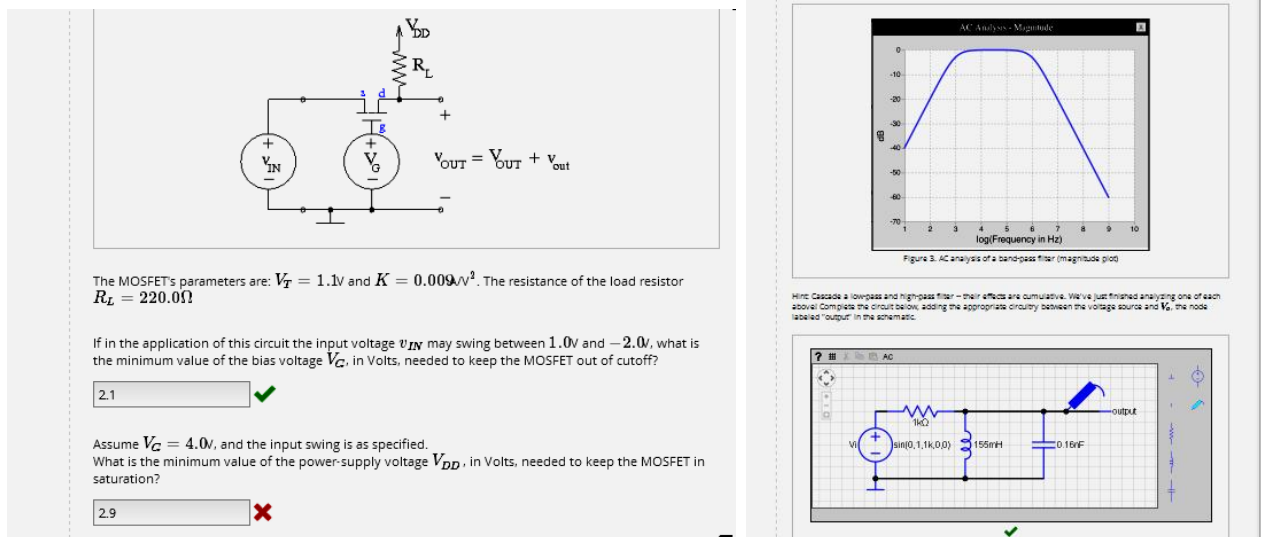


Рисунок 5. Інструменти побудови та аналізу електричних схем в курсі Massachusetts Institute of Technology „6.002x Circuits and Electronics” на edx.org

наукову інтуїцію, а також симуляторів технічних установок та електричних схем (рис. 5). Ці засоби суттєво підвищують мотивацію до самостійної роботи та глибину засвоєння матеріалу.

Як позитивні, так і негативні наслідки має використання в навчальних цілях соціальних мереж („social networking”). До негативних можна віднести небезпеку розсіяння уваги студента на сторонні речі, неможливість повністю контролювати навчальне середовище і уникнути проникнення реклами, нетолерантних та провокаційних матеріалів. До позитивних – розвиток навичок професійної співпраці, фахового обговорення, навіть формування професійної мережі (див. рис. 6).

[Forums / General Discussion](#)

[Help](#)

3D MOS Transistors?

 Matthew Hartensveld ·

Anyone have an idea how a 3D MOS transistor varies from a traditional MOS transistor we are studying and what advantages the 3D transistors have?

↑ 0 ↓ · flag

[Oriol Sanchez Garcia](#)

If you are referring to FinFet, I believe that the trick is that they actually envelope the silicon were the channel will form between Source and Drain with the Gate, making the effective surface of the Gate bigger than what you should expect at that scale with 2D transistors.

Рисунок 6. Приклад обговорення теми, що сягає за рамки програми, у форумі курсу Columbia University „MOS Transistors” на платформі coursera.org

Найбільша користь від форумів у відкритих дистанційних курсах полягає в тому, що студент може у будь-який час доби знайти підтримку та пораду або отримати додаткову мотивацію, надавши таку підтримку іншим. Останнє спонукає вивчати матеріал курсу навіть більш глибоко, ніж це передбачено програмою. З досвіду можемо стверджувати, що активна робота з дистанційним курсом дає можливість відчувати задоволення від навчання, що є потужним стимулом для самостійної роботи над своєю освітою впродовж всього життя.

Цікавим явищем, яке виникло на платформі coursera.org, є взаємне оцінювання робіт студентами („peer grading”) за критеріями, визначеними інструктором. Така практика дозволяє підняти рівень відповідальності студентів та дає їм додаткову можливість вчитися у своїх колег (рис. 7).

З огляду на необхідність постійного розвитку методів та засобів навчання, на кафедрі фізики ТНТУ вже близько року діє експеримент з використання елементів масових відкритих онлайн-курсів “Nanotechnology: the basics”, “Fundamentals of Electrical Engineering” на платформі Coursera та “Circuits and Electronics” на платформі edX як додаткових навчальних ресурсів до курсів фізики та електроніки. Оскільки про ефективність впровадження новацій в освіті слід судити лише на підставі аналізу достатньої кількості об’єктивних даних, якими є результати навчання (наприклад, статистика контролю навчальних досягнень), експеримент, що триває в ТНТУ, не може поки-що привести до конкретних висновків чи рекомендацій, на відміну від масових відкритих онлайн-курсів, для яких статистичні дані були глибоко проаналізовані [3, 7]. Однак, вже на основі перших спостережень можна стверджувати, що впровадження елементів зовнішніх онлайн-курсів підвищує мотивацію та робить дискусію в аудиторії більш жвавою та кваліфікованою, хоч і створює певну поляризацію всередині студентської групи, ще більше розділяючи активних та пасивних учасників навчальної діяльності. Як для викладача, так і для студента широкий інструментарій відкритих онлайн-курсів розширює горизонт досяжного. Зокрема, студенти, які успішно завершили кілька онлайн-курсів з комп’ютерних мереж, будуть значно краще підготованими до програм, які пропонує мережева академія CISCO при ТНТУ чи інших подібних програм професійної підготовки.

Peer Assessments / Série 12 Help

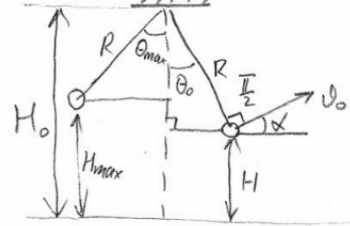
Submission Phase	Evaluation Phase	Results Phase
1. Do assignment <input checked="" type="checkbox"/>	2. Evaluate peers <input checked="" type="checkbox"/> 3. Self-evaluate <input checked="" type="checkbox"/>	4. See results <input checked="" type="checkbox"/>

Veillez répondre sur une ou plusieurs pages A4 (manuscrites ou pas), scanner (ou photographier avec votre smartphone) et "uploader".

Exercice 1

a) L'énergie potentielle maximale
 $mgH_{max} = mg(H_0 - R \cos \Theta_{max})$

L'énergie totale
 au point $\Theta_0 < \Theta_{max}$:
 $\frac{m\dot{\Theta}_0^2}{2} + mgH = \frac{m\dot{\Theta}_0^2}{2} + mg(H_0 - R \cos \Theta_0)$



serie12

Evaluation/feedback on the above work

Note: this section can only be filled out during the evaluation phase.

Voici le corrigé de la série 12. Utilisez-le pour juger du travail de vos collègues, ainsi que du vôtre.
 Insuffisant (0 pt) correspond à un travail bâclé et/ou incomplet. Suffisant (1 pt) correspond à une copie dont la qualité est juste satisfaisante. Bien (ou très bien, 1 pt) récompense un rendu soigné et complet.

En quelques mots, quelle(s) remarque(s) constructive(s) pouvez-vous faire sur le travail que vous venez de corriger?
 Vous pouvez nuancer et justifier votre note brièvement ci-dessous.

peer 1 → [This area was left blank by the evaluator.]

peer 2 → Exercice 1, revoir le calcul des amplitudes qui sont erronées Exercice 2, la dernière étape dans le calcul de E_c est fautive, il manque donc un facteur dans l'expression finale, même si le résultat est bon pour alpha.

Рисунок 7. Взаємна перевірка розв'язків студентами курсу École Polytechnique Fédérale de Lausanne „Mécanique I” на платформі coursera.org

Щоб відповідати вимогам Європейського простору вищої освіти, програми підготовки інженерних спеціальностей необхідно постійно оновлювати та вдосконалювати, враховуючи вимоги сучасного ринку

праці. Одними з найбільш розвинутих елементів онлайн-курсів є системи оцінювання знань слухачів [7]. Загально визнано, що, незважаючи на певні недоліки, засоби автоматизованого контролю знань мають переваги швидкого та неупередженого оцінювання великої кількості студентів. Неможливо не віддати належне багаторівневим тестам, які базуються на практичних задачах, в деяких курсах з розділів фізики, математики та технічних наук. Тестові засоби системи управління навчанням ATutor, яку використовує наш університет, не володіють тим ступенем гнучкості засобів оцінювання, яка властива найбільш розвинутих платформ coursera.org та edX.org. Проте, наша платформа має ту перевагу, що може бути відповідним чином модифікована на рівні університету, при підтримці працівників Інституту дистанційного навчання. Гнучкість системи контролю навчальних досягнень можна покращити [8], комбінуючи три компоненти: зовнішні пропедевтичні тести з спеціально підбраного відкритого онлайн-курсу, тестову систему локальної платформи ATutor та традиційні письмові тести (єдині, які передбачають особисте спілкування студента та викладача). В такий спосіб переваги різних підходів можуть взаємно підсилюватися. З іншого боку, скоординоване використання внутрішніх та зовнішніх навчальних засобів може розглядатися як певний шабель інтеграції [9] національної освітньої системи та глобального освітнього простору.

Варто також відзначити, що масові відкриті онлайн-курси, які пропонують університети не лише з США та Європи, але з усього світу, здатні прискорити процес культурної адаптації студентів, які навчаються чи планують навчатися за програмами подвійних дипломів, розвиваючи їх вміння пристосовуватися до нових умов та вимог і залучаючи студентів до інтенсивної міжкультурної комунікації.

Література.

1. Carson S. The unwallied garden: growth of the OpenCourseWare Consortium, 2001-2008 // Open learning: the journal of open, distance and e-learning. – 2009. – Vol. 24. – p. 23-29.

2. NMC Horizon Report: 2013 Higher Education Edition – New Media Consortium, USA, 2013. – Режим доступу: <http://www.nmc.org/publications/2013-horizon-report-higher-ed>.

3. Waldrop M. M. Online learning: Campus 2.0 // Nature. – 2013. – Vol. 495. – p. 160-163. – Режим доступу: <http://www.nature.com/news/online-learning-campus-2-0-1.12590>.

4. The Times Higher Education World Reputation Rankings 2014 – Thomson Reuters, 2014. – Режим доступу: <http://www.timeshighereducation.co.uk/world-university-rankings/2014/>

5. The European Higher Education Area in 2012: Bologna Process Implementation Report – Brussels: Eurydice, 2012. – Режим доступу: [http://www.ehea.info/Uploads/%281%29/Bologna Process Implementation Report.pdf](http://www.ehea.info/Uploads/%281%29/Bologna%20Process%20Implementation%20Report.pdf)

6. Скоренький Ю.Л. Інформаційні засоби забезпечення курсу фізики у ТНТУ // Матеріали II науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології». – Тернопіль ТНТУ, 2012 – С. 57. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1621>.

7. Sandeen C. Assessment's Place in the New MOOC World // Research & Practice in Assessment, 8(1), 5-12 (2013). – Режим доступу: <http://www.rpajournal.com/dev/wp-content/uploads/2013/05/SF1.pdf>

8. Скоренький Ю.Л. Масові дистанційні online-курси: способи ефективного використання [Електронний ресурс] // Семінар „Практичні аспекти використання елементів дистанційного навчання в рамках впровадження кредитно-модульної системи“. – Тернопіль, 2013. – 4 квітня. Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1959>; http://taltek.info/atutor_seminar2013-04_9.html.

9. Edelstein R. J., Douglass J.A. Comprehending International Initiatives of Universities // Research & Occasional Paper Series CSHE 19.12. University of California, Berkeley, 2012. – Режим доступу: <http://cshe.berkeley.edu/sites/default/files/shared/publications/docs/ROPS.Edelstein&Douglass.IntHEdTaxonomy.12.12.12.pdf>

Yuriy Skorenkyu

OPEN ONLINE COURSES IN SCIENCE AND ENGINEERING

Examples of open online courses educational tools are presented and prospects of open resources incorporation into distance education at Ukrainian universities are analyzed.

Keywords: *massive online open courses, methodology of higher technical education.*

**МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
«ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ», ПРИСВЯЧЕНА 55-РІЧЧЮ ЗАСНУВАННЯ ТНТУ
ТА 170-РІЧЧЮ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ ВИДАТНОГО
УКРАЇНСЬКОГО ВЧЕНОГО ІВАНА ПУЛЮЯ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя запрошує Вас до участі у Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», присвяченій 55-річчю заснування ТНТУ та 170-річчю з дня народження Івана Пулюя, яка відбудеться навесні 2015 року (детальніша інформація буде розміщена на сайті ТНТУ <http://tntu.edu.ua>).

Напрямки роботи конференції

- фізико-технічні основи розвитку нових технологій;
- нові матеріали, міцність і довговічність елементів конструкцій;
- сучасні технології в машино- та приладобудуванні;
- комп'ютерно-інформаційні технології та системи зв'язку;
- електротехніка та енергозбереження;
- фундаментальні проблеми харчових, біо- та нанотехнологій;
- економічні та соціальні аспекти нових технологій.

Робочі мови конференції: українська, англійська, російська, польська.

Голова програмного комітету конференції – П.В.Ясній

Голова організаційного комітету конференції – Р.М. Рогатинський

Науковий секретар – В.О. Дзюра

Для участі в конференції необхідно надіслати до Оргкомітету матеріали доповідей. Вимоги до оформлення рукописів будуть вказані у другому інформаційному повідомленні. Доповіді, подані учасниками, за рекомендацією оргкомітету, будуть опубліковані у науковому фаховому виданні «Вісник ТНТУ».

**IV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
«ПОШКОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ,
МЕТОДИ ЙОГО ДІАГНОСТУВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ»
(IC-DMDP)**

Запрошуємо до участі в роботі IV Міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”, яка відбудеться 22-25 вересня 2015 року в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя

Конференція проводиться Інститутом проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Тернопільським національним технічним університетом імені І. Пулюя, Західним науковим центром НАН і МОН України, Науковою радою з проблеми “Механіка деформівного твердого тіла” при відділенні механіки НАН України, Науковою радою з проблеми “Фізико-хімічна механіка матеріалів” при відділенні фізико-технічних проблем матеріалознавства, Тернопільською обласною організацією Українського союзу науково-технічної інтелігенції.

Упродовж експлуатації матеріали елементів конструкцій зазнають пошкодження, природа якого залежить від виду навантаження та умов експлуатації (високі та низькі температури, циклічне навантаження, корозійне середовище, радіаційне опромінення і т.д.). Діагностика й описування пошкодження матеріалів важливі для розроблення методів підвищення надійності, прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій та оптимізації фізико-механічних властивостей матеріалів. Дослідження пошкоджуваності металів присвячені як розробленню фундаментальних основ описування цього явища, так і створенню методів оцінювання міцності й довговічності елементів конструкцій з урахуванням усього комплексу конструктивних та експлуатаційних факторів.

Ця конференція є одним із форумів, присвячених обговоренню результатів досліджень даної проблеми. Проведення IV Міжнародної

науково-технічної конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” дасть змогу проаналізувати й узагальнити результати нових теоретичних і експериментальних досліджень процесів накопичення пошкоджень, зародження й розвитку тріщин, діагностування з метою забезпечення міцності та надійності елементів конструкцій.

Тематика конференції:

1. Розсіяне і локалізоване пошкодження матеріалів.
2. Діагностування пошкоджень.
3. Методи опису і прогнозування пошкоджуваності матеріалів.
4. Оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій.

Робочі мови конференції: англійська, українська

Голова програмного комітету конференції – П.В.Ясній

Співголови програмного комітету – З.Т. Назарчук, В.В. Харченко

Голова організаційного комітету конференції – П.О. Марущак

Науковий секретар – І.Б. Окіпний

Адреса Оргкомітету:

Оргкомітет Міжнародної науково-технічної конференції “IC DMDP”

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,

вул. Руська, 56, Тернопіль, 46001, Україна

Тел.: +0 (352) 25 35 09

Факс: +0 (352) 25 49 83

e-mail: snt@tu.edu.te.ua; laboratory22b@gmail.com

Для участі в конференції до 1.07.2015р. необхідно надіслати до Оргкомітету матеріали доповідей. Вимоги до оформлення рукописів будуть вказані у другому інформаційному повідомленні. Доповіді, подані учасниками, за рекомендацією оргкомітету, будуть опубліковані у наукових фахових виданнях «Вісник ТНТУ» та «Проблеми прочности».

Інформацію щодо розміщення учасників конференції та про культурну програму розміщено за адресою:
<http://www.tu.edu.te.ua/dmdp/>

