

**144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА**

УДК 621.311

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321349

© Ялова А.М.<sup>1</sup>, Бондар Н.В.<sup>2</sup>**ПРОБЛЕМА ПІДВИЩЕННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ  
ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

*Мета дослідження. Підвищення експлуатаційних властивостей енергетичного обладнання, збільшення терміну служби деталей енергетичного обладнання за рахунок застосування вакуумних покриттів, що підвищують їхню зносостійкість та термостійкість. Матеріали і методи. Метод нанесення вакуумних покриттів, що підвищує зносостійкість та термостабільність машин енергетичного комплексу. Робоче колесо димососу ТЕЦ без нанесення та з нанесенням жаростійких та зміцнювальних багатоелементних та багатофазних покриттів. Під час експериментів використовувалось робоче колесо димососу, яке безпосередньо пропрацювало на ТЕЦ, яка працює на газоподібному паливі, а саме на суміщу газів природній газ+доменний газ+коковий газ. Виходячи з цього, маємо додаткову агресивність продуктів згоряння. Перед проведенням експерименту поверхня лопатки димососу проходила обробку спиртом. В експерименті було використано наступне обладнання: ультразвукова ванна з гарячим миючим розчином, вакуумна камера, створювалась заскнена мікродуга іоним розрядом. Результати. Наукова новизна полягає у розробці методики розрахунку термопружних напруг за експериментальним значенням мікротвердості при роботі в умовах високих температур та агресивних середовищ. Розроблено інноваційний метод оцінки життєвого циклу матеріалів енергетичного обладнання, які зазнають корозійних та термічних впливів. Практичне значення. На основі експериментальних та теоретичних досліджень розроблено багатошарове функціональне нанокристалічне покриття для теплоенергетичного обладнання, що працює в агресивному середовищі із заданими властивостями. Дане покриття використовують для збільшення міцності робочих поверхонь тягодуттьових машин ТЕС та ТЕЦ. Розроблені рекомендації по покращенню експлуатаційних характеристик обладнання на ТЕЦ.*

**Ключові слова:** висока температура, сталь, термоцикли, покриття, термопружна напруга, лопатки димососа, міцність.

*A. Yalova, N. Bondar. **The problem of increasing the working resource of energy equipment details.** Purpose of the study. Improving the operational properties of power equipment, increasing the service life of power equipment parts through the use of vacuum coatings that increase their wear resistance and heat resistance. Materials and methods. Method of applying vacuum coatings that increases the wear resistance and thermal stability of energy complex machines. The impeller of the CHP smoke exhauster without application and with application of heat-resistant and strengthening multi-element and multi-phase coatings. During the experiments, the impeller of the smoke exhauster was used, which directly worked at a CHP operating on gaseous fuel, namely on a gas mixture of natural gas + blast furnace gas + coke oven gas. Based on this, we have additional aggressiveness of combustion products. Before conducting the experiment, the surface of the*

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0003-0926-542X, [al.yalovaya@knu.edu.ua](mailto:al.yalovaya@knu.edu.ua)

<sup>2</sup> ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-8713-265X, [bondar\\_nv@knu.edu.ua](mailto:bondar_nv@knu.edu.ua)

*smoke exhauster blade was treated with alcohol. The following equipment was used in the experiment: an ultrasonic bath with a hot cleaning solution, a vacuum chamber, a microarc was created by an ion discharge. **Results.** The scientific novelty consists in developing a method for calculating thermoelastic stresses based on the experimental value of microhardness when operating in high temperatures and aggressive environments. An innovative method for assessing the life cycle of energy equipment materials that are subject to corrosive and thermal influences has been developed. **Practical significance.** Based on experimental and theoretical research, a multilayer functional nanocrystalline coating has been developed for heat and power equipment operating in an aggressive environment with specified properties. This coating is used to increase the strength of the working surfaces of thrust and blower machines of thermal power plants and CHPs. Recommendations have been developed to improve the operational characteristics of equipment at CHPs.*

**Keywords:** high temperature, steel, thermal cycles, coating, thermoelastic stress, smoke exhauster blades, strength.

**Постановка проблеми.** Завдання забезпечення ефективного та надійного функціонування підприємств енергетичного комплексу (ЕК) та гарантованого енергопостачання споживачів є необхідною умовою енергетичної безпеки та незалежності регіону та держави. Інтенсивне зношування деталей є однією з найгостріших проблем, з якою стикається сучасна теплоенергетична промисловість. У м. Кривий Ріг на підприємстві «АрселорМіттал Кривий Ріг» працюють три ТЕЦ. 90 років тому запрацювала найперша ТЕЦ №1, у 1974 р. почала роботу ТЕЦ №3, наймолодша з ТЕЦ заводу. Знос обладнання усіх ТЕЦ складає близько 85% з урахуванням реконструкцій, що проводиться. За умов обмежених ресурсів пошук ефективних методів боротьби зі зношуванням набуває особливої актуальності. Особливо гострою ця проблема є для галузей з інтенсивною експлуатацією техніки в складних умовах, таких як гірничодобувна, нафтогазова та енергетична. Металеві деталі основного та допоміжного обладнання ТЕС та ТЕЦ працюють в дуже важких умовах, оскільки вони піддаються впливу тиску та температури, нерівномірного розширення елементів. Про придатність конструкційних матеріалів до конкретних умов роботи судять за комплексом властивостей, отриманих в результаті дослідження зразків, а також за результатами натурних випробувань. Основна задача при експлуатації аеродинамічних трактів ТЕС та ТЕЦ полягає в забезпеченні заданого об'єму повітряного потоку з певним запасом. Для досягнення цього необхідно компенсувати втрати тиску, що виникають при русі повітря по каналах і приладах системи. Тому вентилятори, димососи та компресори відіграють роль «нагнітачів», створюючи необхідний тиск для подолання цих опорів і забезпечення безперебійної роботи системи. Придатність сталей і сплавів цього обладнання для роботи в складі теплових енергетичних установок оцінюють за комплексом характеристик, отриманих при дослідженні повзучості, довготривалої міцності та пластичності, а також релаксації напружень в інтервалі можливих робочих температур, корозійної стійкості та жаростійкості в робочих середовищах, втомі в умовах циклічних навантажень або тепломіни. Для виробництва деталей енергетичного обладнання, які в процесі експлуатації піддаються руйнівному впливу корозії при високих температурах, використовуються середньо- та високолеговані марки сталей: 15X5, 15X6CM, 40X9C2, 30X133N7C2, 12X18H10T та ін. Дані марки сталей в Україні не виробляються, більше того, енергомашинобудування в нашій країні мало розвинене. Обладнання для безперебійної роботи ТЕЦ та ТЕС, а також для модернізації станцій, наша країна змушена закуповувати за кордоном, що потім значно позначається на тарифах за тепло- та електроенергію. У зв'язку з цим проблема підвищення робочого ресурсу деталей енергетичного обладнання залишається актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У науковій літературі можна знайти кілька наукових досліджень по розгляду сучасного стану в теплоенергетиці та про модернізацію застарілого обладнання. Але при цьому розглядають більш глобальні питання та завдання енергетики, такі як модернізація та реконструкція теплових станцій, подовження терміну експлуатації атомних електростанцій, зниження рівня шкідливих викидів в атмосферу, впровадження інноваційних технологій, зменшення втрат енергії, а також розвиток малої енергетики [1], не зважаючи на економічні виклики сьогодення.

Розглядаються питання модернізації енергоблоків з контекстом на витрату палива, що дозволила знизити середні питомі витрати палива лише на 12,6 г у.п./кВт·год порівняно з немодернізованими блоками на тих самих ТЕС. При цьому чіткої залежності між обсягом інвестицій у модернізацію та отриманим ефектом економії палива не виявлено [2].

Існуючі підходи до моделювання та оптимізації роботи аеродинамічних систем мають суттєві обмеження. Хоча заміна нагнітачів на потужніші дозволяє збільшити подачу повітря та усунути «вузьке місце» у вигляді обмеженої потужності котлів, це призводить до непропорційного зростання споживання енергії нагнітачами, що суперечить прагненню до підвищення енергоефективності [3]. Кравченко О.В. у своїй науковій роботі розглядає підвищення продуктивності тягодуттьових трактів котлів на основі удосконалення моделей аеродинамічних систем. Зокрема, у роботі виявлено і проаналізовано протиріччя між потребою підвищення продуктивності тягодуттьових трактів котлів з забезпеченням вимог та енергозбереженням при експлуатації аеродинамічних систем. Удосконалення геометрії проточних частин тягодуттьового тракту димових газів з електрофільтрами енергоблоків 300МВт Криворізької ТЕС забезпечує збільшення ефективності динамічних процесів. Системний аналіз зміни параметрів роботи тракту дозволяє коректно обґрунтувати поліпшення енергетичних показників роботи аеродинамічної системи, а також окремих елементів – вхідних ділянок електрофільтрів. Однак в роботі не зазначено знос робочих органів тягодуттьових машин та вплив цього фактору на їх роботу. Також не розглянуто методи зменшення зносу лопаток димососів.

Враховуючи потребу зниження робочого ресурсу деталей енергетичного обладнання, виникає потреба у теоретичному розрахунку термопружних напружень за експериментальним значенням мікротвердості та практичному вирішенні проблеми нанесення зміцнювальних покриттів на деталі способом конденсації речовини у вакуумі з іонним бомбардуванням.

**Метою даної роботи** є підвищення експлуатаційних властивостей енергетичного обладнання.

**Виклад основного матеріалу.** Основою ТЕС та ТЕЦ є котельні агрегати з природньою циркуляцією та прямоочні агрегати, які складаються з наступних вузлів: каркас, барабани, пристрої сепарації, екрани, пароперегрівачі, економайзери, повітропідігрівачі, обмурівка, гарнітура, тягодуттьові пристрої.

Товщину стінок барабанів, колекторів та труб, розміри деталей каркасу тощо визначають залежно від величини сумарного навантаження та необхідного запасу міцності, що забезпечують тривалу працездатність деталей. Крім міцності, від металу вимагають пластичності, стійкості до корозії та хорошої зварюваності. Тому для виготовлення деталей котельних агрегатів застосовують високоякісні сорти сталі.

При виборі матеріалів для роботи в умовах високих температур та агресивних середовищ проводять комплексні дослідження, що дозволяють оцінити їхню поведінку під тривалими навантаженнями, стійкість до корозії та повзучості. Як відомо, при тривалій експлуатації в таких умовах матеріали зазнають значних змін: знижується міцність, підвищується крихкість, прискорюються корозійні процеси. Для запобігання цим змінам необхідно враховувати такі характеристики матеріалу, як довговічність, пластичність, корозійна стійкість та жаростійкість [4].

З вуглецевої сталі виготовляють економайзери, екрани та барабани котельних агрегатів, які працюють при температурі до 450°C. При температурі вище 450°C міцність вуглецевої сталі різко знижується. Тому для виготовлення деталей, що працюють при більш високих температурах, використовують спеціальну жаростійку сталь, до складу якої додають невелику кількість молібдену, хрому, нікелю та інших хімічних елементів для надання металу певних властивостей. Таку сталь називають низьколегованою.

З низьколегованої сталі марок 12ХМФ і 15ХМФ зазвичай виготовляють радіаційні поверхні нагріву прямоочних котельних агрегатів та пароперегрівачі, які працюють при температурі до 540°C.

Найвищою жаростійкістю володіє хромонікелева сталь марки 12Х18Н9Т аустенітного класу, яку також називають нержавіючою сталлю, у якої легуючі добавки нікелю та хрому досягають 30% маси металу. З цієї сталі виготовляють труби вихідної частини пароперегрівачів котельних агрегатів високого тиску, метал яких працює при температурах (570-650)°C. У складі сталі, крім хрому та нікелю, є невелика кількість титану, який стабілізує структуру сталі при

високій температурі. Основними перевагами аустенітної сталі є її висока жаростійкість та здатність протистояти корозії при високій температурі, завдяки високому вмісту хрому (18%) та нікелю (12%).

Аустенітна сталь значно дорожча за перлітну.

Для виготовлення поверхонь нагріву котельного агрегата, що працюють при температурі пари до 450°C, широко використовують вуглецеву сталь марки Ст.20 з вмістом вуглецю до 0,25%, а для виготовлення каркаса котлів – вуглецеву сталь марки Ст.3.

Повзучість металу – це явище, при якому метал під дією постійного навантаження при високій температурі деформується з часом. Особливо яскраво це проявляється при температурах вище 500°C. В результаті зовнішні розміри деталі, наприклад, труби, збільшуються і не відновлюються після зняття навантаження. Для боротьби з повзучістю в сталь додають легуючі елементи, такі як хром, молібден та ванадій. На промислових установках регулярно контролюють зміну розмірів труб, щоб запобігти аваріям. Для запобігання руйнування трубопроводів через повзучість при температурах вище 450°C проводять регулярний моніторинг їх діаметра та структури металу. Тривала дія високих температур призводить до зміни структури сталі, наприклад, до розпаду цементиту, що прискорює процес повзучості.

Масові обмеження споживання енергії свідчать про те, що існуючі моделі та методи розрахунку теплоенергетичних систем потребують перегляду. Невідповідність теоретичних розрахунків реальним результатам вказує на недосконалість наших уявлень про теплові процеси, які протікають всередині самого енергетичного обладнання та безпосередньо впливають на якість та довговічність його роботи. Зважаючи на великі експлуатаційні труднощі, довговічність теплоенергетичного обладнання зазвичай розглядають у зв'язку лише з якимось одним видом пошкодження: довготривалою міцністю, повзучістю, втомлюваністю або термічною втомлюваністю. Для оцінки пошкодження матеріалу тягодуттєвих машин при повзучості використовують такі характеристики пластичності (рис. 1).

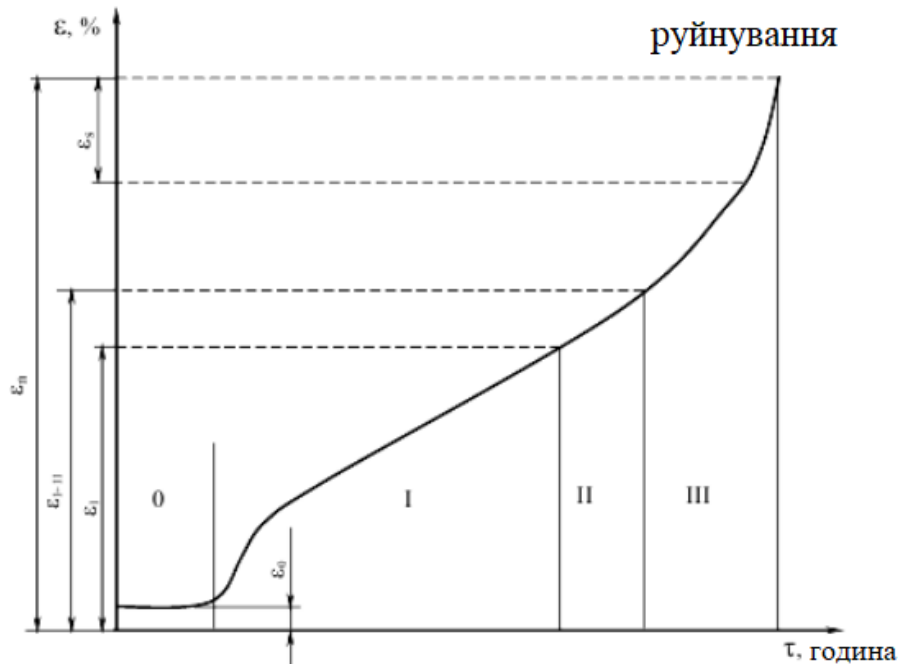


Рис. 1 – Схематична крива повзучості  $\varepsilon = \Delta l/l_0$  [4]: 0 – Ділянка напруження; I – ділянка неусталеної повзучості; II – ділянка усталеної повзучості; III – ділянка перед руйнуванням.  $\varepsilon_n - \varepsilon_0$  – деформація повзучості, накопичена перед руйнуванням;  $\varepsilon_{I-II} - \varepsilon_0$  – деформація повзучості, накопичена до стадії прискореної повзучості;  $\varepsilon_n - \varepsilon_0 - \varepsilon_s$  – деформація повзучості, накопичена перед руйнуванням за вирахуванням подовження на заключному етапі повзучості

Повторювані цикли нагрівання та охолодження (термоцикли) призводять до погіршення механічних властивостей лопаток нагнітальних машин. Це проявляється не тільки у зниженні міцності при короткочасних навантаженнях, але й у скороченні терміну служби при тривалій дії постійних навантажень (повзучість). При цьому характер руйнування матеріалу залежить від максимальної температури в циклі та його тривалості [5].

Швидкість поширення тріщини в матеріалі залежить від багатьох факторів, включаючи склад сплаву, умов експлуатації та особливості його внутрішньої будови. При аналізі причин руйнування деталей необхідно враховувати, як різні види навантаження та тривалість їх дії впливають на характер руйнування різних сталей та сплавів. Деталі турбін та енергетичного обладнання піддаються впливу агресивних середовищ, таких як продукти згоряння палива, забруднювачі з повітря та теплоносії, що значно ускладнює їх експлуатацію та вимагає ретельного аналізу причин можливих відмов.

У зв'язку з вищевикладеним, розрізняють такі види корозії:

- окислення на повітрі;
- в атмосфері топкових газів;
- у продуктах згоряння сірчистого палива;
- ванадієва корозія;
- сульфідна корозія в умовах контакту із солями морської води;
- за умов контакту з оксидами заліза;
- корозійне розтріскування.
- міжкристалітна та виразкова корозія;
- корозія за умов контакту з лужними металами.

Для проведення досліджень з метою підвищення корозійної та жаростійкості деталей, виготовлених з високолегованої сталі 2X18H10T, були обрані лопатки димососа (рисунок 2).

Руйнування робочих лопаток димососів при підведенні теплової енергії супроводжується накопиченням термпружних напруг, що призводять до підвищення щільності дислокацій, різних дефектів (дилатонів, фрустронів тощо). Більшість існуючих у природі механічних систем при вільному русі розсіюють упорядковану кінетичну енергію свого руху і перетворюють її на хаотичний тепловий рух молекул. Такі системи прийнято назвати дисипативними системами. Іноді потік енергії, що підводиться до системи, може досягти такої інтенсивності, що старий механізм дисипації вже не може впоратися з ним. Системі загрожує руйнування. Тоді вона може проводити внутрішню перебудову своїх елементів таким чином, щоб процес розсіювання енергії пішов би більш інтенсивно [6].



Рис. 2 – Лопатки димососу ТЕЦ

При формуванні покриттів для робочих коліс димососів термічні напруги розподіляються по деякому періодичному (автохвильовому) закону [5]. Експериментально це проявляється в періодичній зміні мікротвердості покриття, вимірної вздовж і впоперек зразка.

Представлено методику розрахунку термопружних напруг за експериментальним значенням мікротвердості. Для цього скористаємося рішеннями рівняння теплопровідності для нескінченної пластини (покриття), отриманими у роботі [6] для радіальної  $\mu_r$  та осьової  $\mu_z$  складових мікротвердості:

$$\mu_r = A_r \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{2 A_r T_0}{z \sqrt{\pi}} I_1 \left( \frac{2r}{R} \right), \quad (1)$$

$$\mu_z = A_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2 A_z T_0}{z \sqrt{\pi z^2}} I_0 \left( \frac{2r}{R} \right). \quad (2)$$

У цих виразах величина  $A$  є постійною при невеликих термічних напругах. У металевих тілах ефект пов'язаності поля деформації та температурного поля зазвичай мало впливає на термічне обурення та розподіл теплових напруг. У цьому випадку можна скористатися відомими рішеннями для круглої пластини постійної товщини та для компонентів напруги:

$$\sigma_r = -2G \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\sigma_z = -2G \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (4)$$

Модуль  $G$  визначається рівнянням:

$$2G = \frac{E}{1+\nu}, \quad (5)$$

де  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

Для проведення досліджень на жаростійкість було обрано наступну деталь – лопатку димососа. Вибір ґрунтувався на тому, що робочі лопатки димососу в процесі експлуатації схильні до корозійного зносу при високій температурі. Лопатки виготовлені зі сталі марки 12Х18Н10Т.

Наносимо на сталь покриття. Нанесення зміцнювальних покриттів на деталі способом конденсації речовини у вакуумі з іонним бомбардуванням проводилося на столі, що обертається, на відстані 25 сантиметрів від катодів.

Технологічний процес нанесення покриттів складався з наступних операцій:

1. Підготовка. Промивання в ультразвуковій ванні гарячим (60°C) миючим знежирювальним розчином; сушіння на спокійному повітрі (30-35 хвилин); обробка всієї поверхні спиртом.
2. Прогрівання у вакуумній камері до 70°C - 85°C протягом 15 хвилин, з метою видалення конденсату та створення вакууму.
3. Для видалення окисної плівки та вологи з поверхні лопатки – створення зникаючої мікродуги іоним розрядом (20 хвилин).
4. Іонне очищення та нагрівання.

Таблиця 1

Втрата маси покриття після термічної обробки при 550°C протягом 80 годин

Лопатка димососу з покриттям	Маса корозійного шару, мг
Лопатка без покриття ( сталь 12Х18Н10Т)	28,1
Лопатка з багатоступеневим покриттям	5,2
Лопатка з покриттям Fe-Al-Ti	11,6
Лопатка з покриттям Cr-Zn-Cu – Fe-Al-Ti	4,5
Лопатка двошарове покриття на основі ма- лолегованого сплаву хрому Cr-C	7,9

З таблиці 1 впливає, що найбільшу жаростійкість з досліджених нами покриттів має покриття Cr-Zn-Cu – Fe-Al-Ti, а найменшу – Fe-Al-Ti, але будь яке з дослідних покриттів значно збільшує жаростійкість деталей.

### Висновки

Виконано порівняльний аналіз структури корозійних та жаростійких характеристик покриттів, нанесених на лопатки димососів зі сталі 35 та 12Х18Н10Т. Встановлено, що застосування

азотування як фінішної обробки нанесених покриттів значно підвищує їх стійкість до корозії та високих температур.

Проведено дослідження технології багатошарового покриття. Встановлено, що жаростійкість шару Cr-Zn-Cu – Fe-Al-Ti в 6,3 разів вище сталі 12X18H10T, що використовується для виготовлення лопаток димососу, що працюють за високих температур. Дослідження проводилось на ТЕЦ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

#### Перелік використаних джерел:

1. Халатов А. А. Энергетика Украины: сучасний стан і найближчі перспективи. *Вісник Національної академії наук України*. 2016. № 6. С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2016.06.053>.
2. Черноусенко О. Ю. Стан енергетики України та результати модернізації енергоблоків ТЕС. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. № 4. С. 20-28. URL: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0000297977>.
3. Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв із відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2021 роки. URL: [https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/Otsinka\\_TK\\_14.06.2021.pdf](https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/Otsinka_TK_14.06.2021.pdf) (дата звернення 15.09.2024).
4. Lottermoser B. G. *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin : Springer-Verlag, 2010. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>.
5. Удосконалення технології розбирання металоконструкцій механізованого шахтного кріплення / В. Боков та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 7(38). С. 22-29. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7\(38\).1.22-29](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7(38).1.22-29).
6. Flink A., Larson T., Sjolen J. Influence of Si on the microstructure of are evaporated (Ti, Si) N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol.200. Pp. 1535-1542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.096>.

#### References:

1. A.A. Khalatov, «Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan i naiblyzhchi perspektyvy» [«Energy Industry of Ukraine: Current State and Near-Term Prospects»], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, № 6, pp. 53-61, 2016. doi: **10.15407/visn2016.06.053**. (Ukr.)
2. O.Yu. Chernousenko, «Stan enerhetyky Ukrainy ta rezultaty modernizatsii enerhoblokov TES» [«The state of Ukraine's energy industry and the results of modernization of TPP power units»], *Problemy zahalnoi enerhetyky – Problems of general energy*, № 4, pp. 20-28, 2014. (Ukr.)
3. Derzhavna tsilova ekonomichna prohrama enerhoefektyvnosti i rozvytku sfery vyrobnytstva enerhonosiiv iz vidnovliuvanykh dzherel enerhii ta alternatyvnykh vydiv palyva na 2010-2021 roky (State Targeted Economic Program for Energy Efficiency and Development of the Production of Energy Carriers from Renewable Energy Sources and Alternative Fuels for 2010-2021). [Online]. Available: [https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/Otsinka\\_TK\\_14.06.2021.pdf](https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/Otsinka_TK_14.06.2021.pdf). Accessed on: September 15, 2024. (Ukr.)
4. B.G. Lottermoser, *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Publ., 2010. doi: **10.1007/978-3-642-12419-8**.
5. V. Bokov, V. Mirzak, V. Pukalov, R. Telyuta, and O. Sisa, «Udoskonalennia tekhnolohii rozbyrannia metalokonstrukttsii mekhanizovanoho shakhtnoho kriplennia» [«Improvement of the technology of dismantling metal structures of mechanized mine fastening»], *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, № 7(38), pp. 22-29, 2023. doi: **10.32515/2664-262x.2023.7(38).1.22-29**. (Ukr.)
6. A. Flink, T. Larson, and J. Sjolen, «Influence of Si on the microstructure of are evaporated (Ti, Si) N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability», *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, pp. 1535-1542, 2005. doi: **10.1016/j.surfcoat.2005.08.096**.

Стаття надійшла 13.11.2024

Стаття прийнята 29.11.2024