

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



1885

«ХПІ»

ISSN 2079-0821  
48' 2017

# ВІСНИК

Національного технічного університету  
«ХПІ»

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## **ВІСНИК**

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія

**№ 48 (1269) 2017**

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2017

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Мова статей – українська, російська та англійська.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р., Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015.*

**Координаційна рада:**

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**)

К.О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**)

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В.В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;

Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;

В.І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В.А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Ю.В. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф.; М.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

**Редакційна колегія:**

**Відповідальний редактор:** М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Г.М. Шабанова, д-р техн. наук, проф.

**Члени редколегії:** В.Л. Авраменко, канд. техн. наук, проф.;

В.П. Георгіївський, д-р фарм. наук, проф.; Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;

А.М. Каратєєв, д-р хім. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

О.Я. Лобойко, д-р техн. наук, проф.; М.О. Подустов, д-р техн. наук, проф.;

М.Д. Сахненко, д-р техн. наук, проф.; С.О. Слобідський, д-р техн. наук, проф.;

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; Г.Г. Тульський, д-р техн. наук, проф.;

В.П. Шапорев, д-р техн. наук, проф.; И.В. Левицкий, д-р техн. наук, проф. (Минск, Республика Беларусь);

H.V. Fischer, Dr.-Ing., Prof. (Weimar, Bundesrepublik Deutschland);

N. Lesnych, Dr.-Ing., Prof. (Weimar, Bundesrepublik Deutschland); M.J. Ciak, Dr. hab. inż., Prof. (Olsztyn, Polska);

I.V. Rusu, Doctor habilitat în Ştiinţe tehnice, Prof. (Chişinău, Republica Moldova)

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: «Хімія, хімічна технологія та екологія», індексується в наукометричних базах WorldCat і Google Scholar і включений у довідник періодичних видань бази даних «Ulrich's Periodicals Directory» (New Jersey, USA).*

Рекомендовано до друку Вченою Радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 11 від 22 грудня 2017 р.

УДК 621.793.620.172

А. В. БАШТА

**ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Важливою науково-прикладною задачею є вирішення проблеми подовження терміну роботи малоресурсних деталей машин і апаратів виробничої та переробної промисловості. В роботі проведено дослідження впливу ряду фізичних полів на механічні характеристики приповерхневих шарів конструкційних матеріалів. Значне підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та витривалості робочої поверхні проблемних деталей дозволить значно подовжити їх експлуатаційний ресурс.

**Ключові слова:** приповерхневий шар матеріалу, зносостійкість, фізичне поле, витривалість, залишкові напруження, малоресурсні деталі, зміцнюючі покриття, границя втоми.

Важкой научно-прикладной задачей является решение проблемы продления срока работы малоресурсных деталей машин и аппаратов производственной та перерабатывающей промышленности. В работе проведено исследование влияния физических полей на характеристики прочности приповерхностных слоев конструкционных материалов. Значительное повышение износостойкости, коррозионной стойкости та выносливости рабочей поверхности проблемных деталей позволит существенно продлить их эксплуатационный ресурс.

**Ключевые слова:** приповерхностный слой материала, износостойкость, физическое поле, выносливость, предел усталости, остаточные напряжения, малоресурсные детали, упрочняющие покрытия.

To extend life time of short-life machine parts and apparatus of manufacturing and processing industries is an important scientific and applied problem nowadays. The author studies the influence of a number of physical fields on the mechanical properties of surface layers of structural materials. The impact of different in composition gaseous environments on high-temperature creep of samples from chemically pure molybdenum in conditions of linear stress state was analyzed and the results are presented. The experimental curves of wear resistance are presented which show the boundaries of fatigue of sample from constructional heat-resistant metals and their alloys, working surfaces of which are treated with laser radiation, laser acoustic irradiation, gas-flame and arc spraying.

The wear-resistant coating is formed on the working surface of machine parts under the influence of physical fields, different in nature and operation, and it can significantly improve the corrosion resistance, wear resistance and fatigue resistance of high-failure parts of material and significantly extend their service life.

**Keywords:** surface layer of the material, durability, physical field, endurance, residual stress, short-life machine parts, hardened surfacing, fatigue limit state.

**Вступ.** Суттєве здорожчення легуючих металів і практична відсутність переважної більшості з них в Україні, спонукають шукати шляхи вирішення проблем покращення характеристик міцності матеріалів, що використовуються під час виготовлення деталей машин та апаратів сучасних виробництв. Розробка і створення нових матеріалів потребує значних матеріальних і технологічних затрат, а також довготривалих досліджень їх фізико-механічних характеристик. Модифікація ж широкоживаних і добре відомих у промисловості металів під конкретні її потреби є значно перспективнішим вирішенням цих проблем. Поліпшення характеристик міцності робочої поверхні деталей шляхом обробки її певними фізичними полями, а саме: високотемпературними газОВО-йонними середовищами, лазерно-радіаційними і лазерно-акустичними хвилями, електроконтактним припіканням порошкових матеріалів та ін., дає можливість суттєво модифікувати і значно розширити межі їх використання у виробництві.

**Метою роботи** у відповідності до розроблених методик є дослідження впливу ряду фізичних полів на

такі характеристики міцності як короткотермінова повзучість, втома, твердість та зносостійкість досліджуваних матеріалів.

До першого напрямку досліджень по покращенню характеристик міцності конструкційних матеріалів можемо віднести експериментальні роботи по визначенню впливу фізичних полів на повзучість хімічно чистого молібдену, шляхом дифузійної обробки його поверхні високотемпературними газовими середовищами. Методика експериментальних досліджень включала визначення довговічності зразка, що знаходився під одноосним навантаженням в зоні дії високотемпературного газового середовища. Експериментальні дослідження повзучості молібдену, що піддавався впливу азотно-воднево-аміачних сумішей, проводилися на модернізованій установці, яку було створено в Інституті проблем міцності НАН України [1].

Експериментальні дослідження проводилися у три етапи:

1. Нагрівання зразка до температури 500 °С з попереднім 20 % навантаженням від обумовленого і потім 30-хвилинна витримка.

2. Нагрівання в кварцовому реакторі робочої зони зразка та відповідного високо очищеного газового середовища до температури 1000 °С.

3. Обумовлене в експерименті ступеневе навантаження зразка з молібдену у високотемпературному газовому середовищі з автоматичним записом діаграми деформування.

що у порівнянні з інертним середовищем, найбільше зміцнення молібдену відбувається під дією чистої азотно-водневої суміші, а найбільше падіння міцності – в умовах наявності в азотно-водневій суміші газоподібного аміаку (рис. 1).

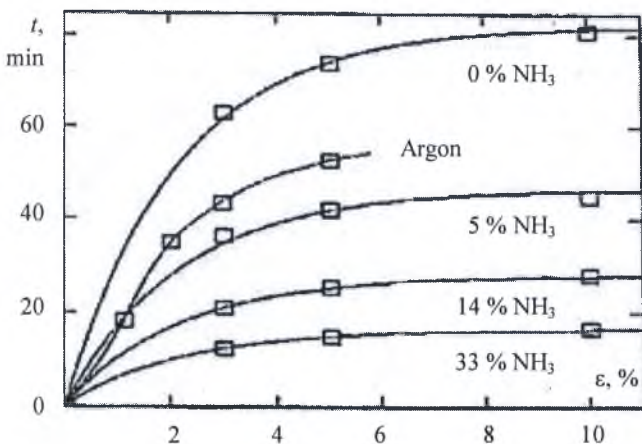
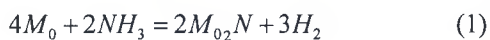


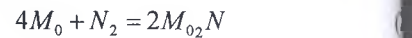
Рис. 1 – Діаграми повзучості молібдену у високотемпературному азотно-водневому та аміачному газовому середовищі

Визначаючи вплив хімічних процесів на повзучість молібдену, вважаємо, отримані результати обумовлені тим, що у випадку реакції



в інтервалі температур (500 ÷ 1000 °С), вільна енергія Гіббса є великою негативною величиною. Тобто, ця реакція є інтенсивною у будь-якому газовому середовищі, що містить аміак. Саме його наявність приводить до глибокого внутрішнього азотування із утворенням великодисперсних нітридних з'єднань, які й викликають таке падіння міцності матеріалу. Крім топокхімічної взаємодії аміаку з молібденом у даних умовах відбувається його інтенсивний дисоціативний розпад. Добре відомо, що молібден і його нітриди – досить хороші каталізатори такої реакції [2]. Тому, інтенсивний гетерогенно-каталітичний процес на поверхні зразків молібдену також сприяє падінню його міцності внаслідок наявності каталітичної корозії приповерхневих шарів.

В азотноводневій суміші азотування цих шарів молібдену відбувається лише за реакції:



Така реакція термодинамічно можлива у досліджуваному інтервалі температур, але вільна енергія Гіббса для неї істотно менша, ніж для першої реакції. Досить міцна молекула азоту  $N_2$  (на відміну від аміаку  $NH_3$ ) досить повільно дисоціює на атоми. Зважаючи на те, що  $M_{O_2}N$  звичайно не можливо одержати прямим синтезом із вільних елементів, можемо стверджувати, дисоціація молекули азоту на атоми легше всього відбувається там де є надлишок вільної енергії. Такими зонами є виходи дислокацій, ділянки нерівноважних граней із малою ретикулярною щільністю та ін. А, оскільки, гідратування нітридних утворень молекулами водню газової суміші відсутнє, то можливо у цьому випадку виникають дрібнодисперсні нітридні фази або дофазові утворення, що і призводять до дисперсійного зміцнення самого матеріалу. Для такої реакції, що є зворотною реакції (1), вільна енергія Гіббса, яка є досить великою позитивною величиною, унеможливує її протікання у вказаному інтервалі температур.

Отримані експериментальні результати узгоджуються із висновками робіт [3 – 6], де з позицій термодинаміки обґрунтовано формування нітридів деяких тугоплавких металів (у тому числі і молібдену) в атмосфері аміаку, а твердих розчинів у атмосфері азоту. Таким чином, змінюючи хімічний склад у приповерхневих шарах вказаних металів, маємо можливість формувати композитність їх структури.

Аналіз експериментальних даних поведінки зразків із молібдену в агресивних газових середовищах дозволив провести аналітичну апроксимацію кривих повзучості у координатах  $(\epsilon, t)$  за фіксованих у часі величин деформацій.

Згідно отриманих даних першої кривої, скориставшись методом найменших квадратів, у координатах  $(t - \epsilon)$  було побудовано залежність у формі:

$$t = \psi(1 - e^{-\beta\epsilon}) \quad (3)$$

Нами було визначено числові значення коефіцієнтів залежності (3) –  $\psi = 16,7$ ;  $\beta = 0,46$ . Нажаль, аналітичну залежність для отриманих кривих повзучості у стандартній формі (експонентну або степеневу), використовуючи лише одну функцію обраного класу у координатах  $(t - \epsilon)$ , виявити не вдалося [7].

Але, виходячи із цілей дослідження, а саме побудова кривих повзучості для різних концентрацій  $(c)$

газоподібного аміаку, знайдених співвідношень виявилось достатньо (рис. 2).

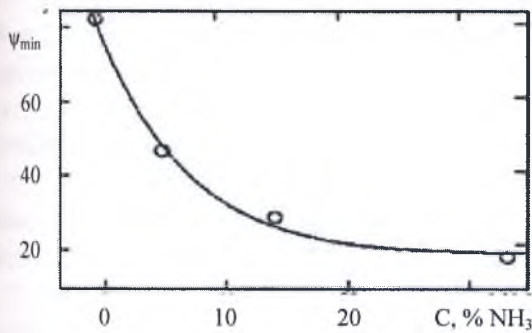


Рис. 2 – Крива регресії повзучості на концентрацію аміаку у високотемпературній азотно-водневій газовій суміші

Фіксуючи параметр функції повзучості ( $\beta$ ), за методом найменших квадратів знаходимо параметр ( $\psi$ ) для трьох інших кривих повзучості.

Значення параметрів функції повзучості для чотирьох кривих, які показані на рисунку 1, разом із точками, що відповідають експериментальним даним, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри функції повзучості для експериментальних кривих молібдену

	1	2	3	4
$\psi$	16,7	28,2	46,6	82,4
$\beta$	0,46			

Згідно з формулою (3) параметр ( $\psi$ ) є граничним часом спостереження за умови необмеженої повзучості ( $\lim_{c \rightarrow \infty} t = \psi$ ). Відтак, крива регресії довговічності ( $\psi$ ) на концентрацію ( $c$ ) матиме такий вигляд (рис. 2).

Її аналітична залежність матиме такий вигляд:

$$\psi(c) = \exp(-0,15 + 4,17c) + 17,47 \quad (4)$$

Коефіцієнт кореляції  $r$  між значеннями ( $c$ ) і ( $\psi$ ) становить 0,9993, а максимальна похибка даних залежності (4) і дослідних даних не перевищує 3 хв.

Напівемпірична залежність (4) дозволяє побудувати для неї криві повзучості, визначивши параметр ( $\psi$ ) за формулою (3), для довільної концентрації газової суміші ( $c$ ) [8]. Отже, отримана аналітична залежність дозволяє, в першому наближенні, проводити апроксимацію кривих високотемпературної повзучості молібдену в агресивному газовому середовищі, і залежно до відсоткового відношення зазначених газових сумішей, прогнозувати повзучість молібдену в зазначених умовах.

Другим напрямком досліджень, що проводилися нами, було визначення впливу фізичних полів на механічні характеристики матеріалів шляхом їх лазерно-радіаційно-акустичного опромінення [9, 10, 11]. Така обробка матеріалу дає можливість змінювати структуру приповерхневих шарів, отримуючи загальну неоднорідність у поперечних перерізах зразків.

Експериментальні дослідження по визначенню міцності матеріалів на втому проводилися на зразках, які виготовлені з пружинної сталі 65Г, литого титану ТЛ5 та тугоплавких вольфрамо-титанових сплавів ВТ8 і ВТ10, що піддавалися обробці вказаними фізичними полями. Модернізована випробувальна установка ЧКЗ-1, силовий блок якої приведено на рисунку 3, створена в Інституті проблем міцності НАН України дозволяє проводити випробування матеріалів на втому під час чистого кругового згину в умовах нормальних температур.

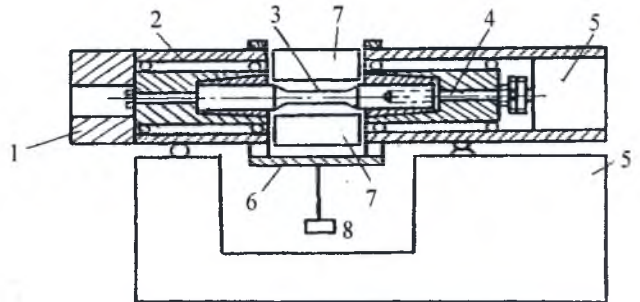


Рис. 3 – Схема силового вузла установки ЧКЗ-1

Особливістю вузла навантаження є не лише широкий діапазон амплітуд повторно-змінних механічних напружень (від 100 Па до 880 МПа), але і досить висока точність встановлення та підтримання навантаження, що діє на зразок. Відносна похибка визначення амплітуд повторно-змінних навантажень не перевищує 1,5 % за частоти коливань від 10 до 120 гц. Випробування проводили на круглих стандартних зразках із концентратором конічної форми у робочій зоні (рис. 6б), а також на круглих галтельних (рис. 4) довжиною 140 мм.

У процесі роботи партія зразків ділилася на декілька рівних частин, які у подальшому підлягали обробці вказаними фізичними полями. Тривалість, рівень впливу та інтенсивність фізичного поля на кожну окрему партію зразків визначали дослідним шляхом. Результати випробувань зразків, що піддавалися дії одного фактору, чи їх комбінації, порівнювалися й аналізувалися із даними еталонної (необробленої) партії. Для зменшення похибки вимірювань, під час статистичної обробки результатів досліджень, проводилися розрахунки основної відносної похибки і порівнювалися із нормативними значеннями.

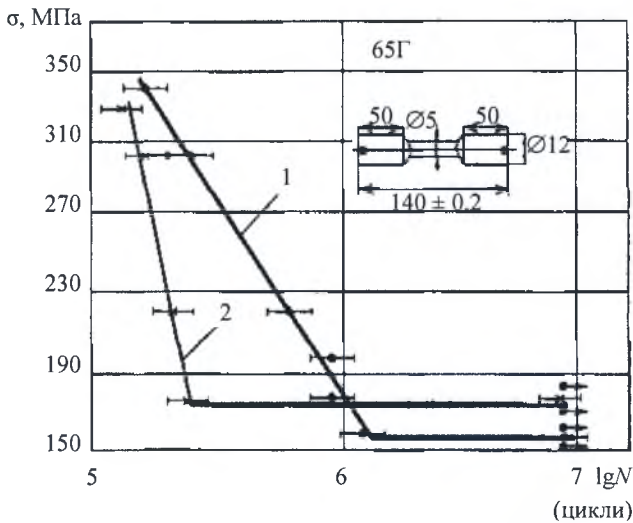


Рис. 4 – Криві втоми сталі 65Г: 1 – еталонна, 2 – лазерне опромінення.

Визначення характеристик міцності композитної, після лазерної, радіаційної та акустичної обробки, структури матеріалів проводилося на зразках, виготовлених із вказаних вище металів. Для рівномірного розподілу енергії мілісекундних імпульсів лазерного опромінення по поверхні зразка і для запобігання плавленню металу у локальних місцях використовували епоксидно-полімерне з алюмінієвим порошковим наповнювачем покриття його робочої зони.

Аналіз експериментальних даних, а також криві втоми зразків із 65Г (рис. 4) дозволяють стверджувати, що після лазерної обробки (крива 2) у приповерхневих шарах матеріалу відбувалося крихке руйнування, яке призводило до відчутного зменшення його міцності. За допомогою термопар також визначено, що після лазерної обробки, зразки під час випробування нагрівалися набагато інтенсивніше порівняно з еталонними.

Відомо, що величина температури нагрівання зразків під час циклічних навантажень залежить як від величини діючих напружень [12], так і від швидкості руху вільних дислокацій [13]. Тому можна стверджувати, що зменшення міцності на втому зразків із 65Г, що піддавалися лазерному опроміненню, відбувалося через появу залишкових напружень в приповерхневих шарах матеріалу внаслідок зміни його структури. Аналіз даних показав, що для загартованих і оброблених лазером зразків із цього металу характерним є зниження витривалості практично на всьому діапазоні високих значень напружень. У той же час, за напружень близьких до границі витривалості її величина зростає на 10 – 15 % за рахунок, як ми вважаємо, меншого впливу приповерхневих залишкових напружень. Дослідження зразків після випробувань дало

можливість встановити дві характерні зони їх руйнування: крихка – в приповерхневому шарі, в'язка – в основному тілі зразка.

Відмічене незначне зниження мікротвердості робочої поверхні зразків зумовлене, на наш погляд, виникненням у периферійних шарах певних зон залишкових напружень, викликаних лазерним опроміненням.

Експериментально встановлено, що комбінована обробка лазерно-акустичним опроміненням поверхні робочої зони зразків, виготовлених із сплаву ТЛ5, дозволяє досягти відчутного збільшення витривалості практично протягом усього діапазону випробувань (рис. 5а).

На відміну, витривалість зразків із вольфрамтитанових сплавів ВТ8 і ВТ10, робоча зона яких оброблена лазерно-радіаційним опроміненням (рис. 5б та рис. 5в) знижується за високих діючих напружень.

Величина границі витривалості при цьому зросла на 12 – 18 % порівняно зі значеннями зразків у вихідному стані. Знову ж таки, як і для зразків із сплаву 65Г, змінюється сам характер руйнування матеріалу від втоми. Так, якщо у вихідному стані (еталонна партія зразків) матеріал руйнувався із ознаками крихкого руйнування, то після лазерно-акустичного їх опромінення спостерігалися вже характерні ознаки пластичного руйнування. В епіцентрах виникнення акустичних хвиль великої амплітуди, як показали подальші дослідження, метал не вступає в реакцію із кислотою травлення шліфів, а гістограми розподілу мікротвердості по поверхні зразка вказують на незначне її збільшення. Щільність потужності під час лазерного опромінення становила  $P = 1 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

Як показали результати механічних випробувань на втому в умовах дії симетричних циклічних навантажень, комбіноване лазерно-радіаційне опромінення робочої поверхні зразків із ВТ8 і ВТ10, призводить до суттєвого (18 %) зростання значення величини границі їх витривалості.

Таке зміцнення зразків відбулося після комбінованої дії, спочатку лазерне азотування, а потім радіаційне опромінення їх поверхні. Лазерне азотування зразків проводилося в середовищі рідкого азоту. Промінь лазера падав на поверхню зразка і, пройшовши через шар рідкого азоту, спричиняв вибухове його випаровування з утворенням нітридів титану у його приповерхневих шарах. Тривалість лазерного імпульсу становила  $t = 50$  н.с. Довжина хвилі та щільність потужності випромінювання складали відповідно  $\alpha = 1,06$  см і  $P = 1 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

За такого методу обробки поверхні зразка мікротвердість титанового сплаву  $H_v$  в приповерхневих шарах зросла на 35 – 38 %. В той же час спостерігалося падіння міцності зразків за значних величин діючих напружень.

Це зумовлене, як ми вважаємо, в першому випадку утворенням твердих нітридів титану в цих шарах, а у другому – утворенням нітридних зерен, що призводить до виникнення далекодіючих полів залишкових напружень, які і впливають на падіння міцності.

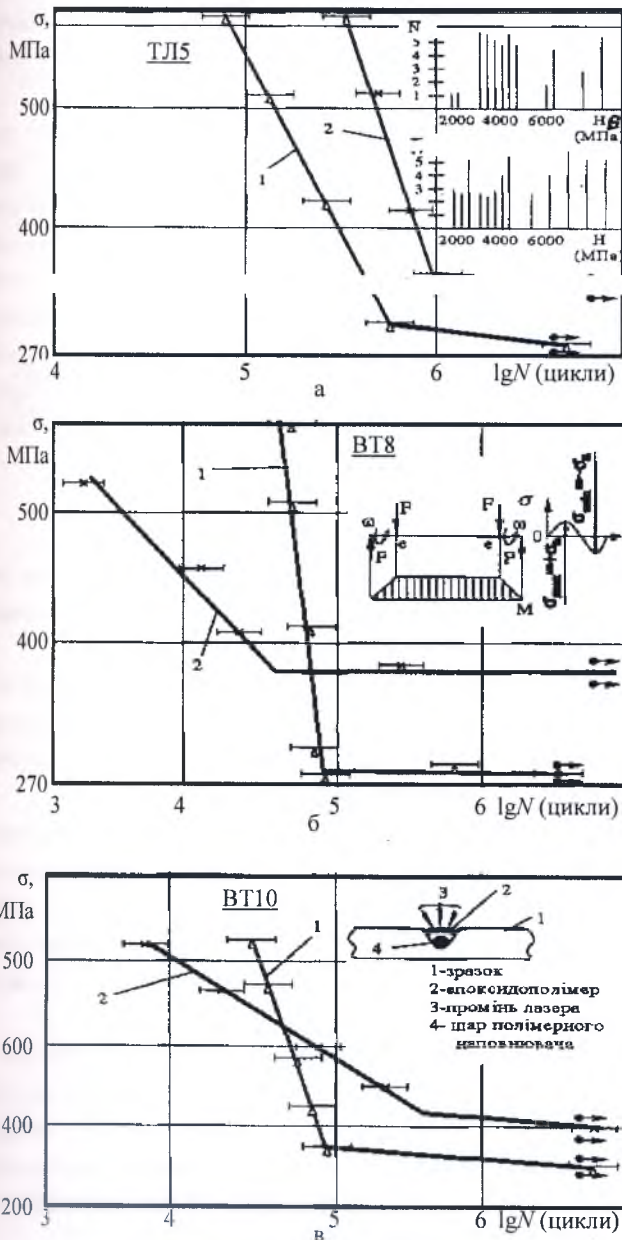


Рис. 5 – Криві втоми: а – TL5 (1 – еталонна, 2 – лазерно-акустичне опромінення), б – BT8 (1 – еталонна; 2 – лазерно-радіаційне опромінення), в – BT10 (1 – еталонна; 2 – лазерно-радіаційне опромінення).

Послідує радіаційне опромінення азотованої поверхні зразків із цих сплавів, як уже відмічалось,

дає змогу суттєво змінювати її структуру і впливати на поля вказаних залишкових напружень.

Шляхом подрібнення нітридних зерен радіаційне опромінення дозволяє усереднювати і навіть знижувати величини цих напружень.

Отже, лазерно-радіаційна обробка поверхні зразка дає можливість, із одного боку, поліпшити його зносостійкість за рахунок зростання твердості приповерхневих шарів металу, а з іншого – помітно зменшити вплив залишкових напружень у цих шарах. Тому, за напружень близьких до границі витривалості, де вагомість впливу залишкових напружень значно зменшується, її величина помітно зростає.

Таким чином, є підстави стверджувати, що комбінована лазерно-акустична, як і лазерно-радіаційна обробка елементів конструкцій із литого титану чи вказаних вольфрамово-титанових сплавів дає можливість суттєво підвищити опір зношуваності робочих поверхонь та рівень їх витривалості в умовах експлуатації.

Особливо актуально це для малоресурсних деталей машин і елементів конструкцій переробного виробництва. Під час їх виготовлення основним матеріалом, в переважній більшості, є нелеговані сталі, вибір яких зумовлений конструкційною міцністю і їх собівартістю. Головною умовою для подовження ресурсу експлуатації вказаних конструкційних елементів є те, щоб зовнішня робоча зносостійка поверхня не мала границі розділу із основою, а навпаки з'єднувалася, по можливості, досить широкою перехідною дифузійною зоною твердого розчину. Оскільки її відсутність в умовах знакозмінних навантажень, як показують дослідження, призводить до руйнування від втоми зміцнюючого периферійного шару на робочій поверхні і виходу деталі із ладу. Проаналізовані експериментальні дані вказують на те, що під час навантаження залежність міцності адгезійного зв'язку між поверхневим зносостійким шаром та основою є лінійно залежною від товщини цього покриття.

Цілісність композитної структури поперечного перерізу зразка забезпечується більш плавною і неперервною зміною властивостей по його висоті за рахунок наявності перехідної зони твердого розчину між поверхневим зміцнюючим покриттям і основою. Це, у свою чергу, дозволяє суттєво подовжити термін експлуатації такої деталі машини чи відповідної конструкції.

Зносостійкі та корозійностійкі сучасні покриття, що отримують шляхом вакуум-плазмової або йонно-плазмової обробки робочі поверхні малоресурсних деталей, а також за допомогою електроконтактного її припикання порошковими матеріалами, у більшій сту-



пені задовольняють цим вимогам.

Зміцнені приповерхневі шари деталей, що отримані таким чином, у декілька разів перевищують, наприклад, зносостійкість традиційних суцільних покриттів ідентичного матеріалу однакової товщини.

Вона у 3 – 6 разів вища за отриману традиційною цементацією і загартуванням та більше ніж на порядок, два перевищує вказані параметри матеріалу основи [14, 15]. Різні за природою і характером дії фізичні поля, за допомогою яких на поверхні матеріалу деталей утворюються зміцнюючі покриття, отримують як за вказаними вище методиками, так і за методиками електроконтактного припікання порошкових матеріалів, активованого газопламеневого та електродугового наплення дротів із сталей феритного (Св-08), мартенситного (40Х13) та аустенітного класів [16, 17, 18]. Отримані покриття характеризуються товщиною від десятків – сотень мікрон до декількох міліметрів і можуть бути як зміцнюючими, так і зміцнюючовідновлюючими. Тобто, такі покриття, нанесені на вироблені в ході експлуатації ділянки робочої поверхні деталі, після відповідної шліфувальної обробки дають можливість знову використовувати їх у виробництві.

Як уже відмічалось, із збільшенням товщини покриття зростає величина залишкових напружень у ньому, а це є одним із основних факторів, що призводять до відшарування його від основи в ході експлуатації. Зміцнюючі покриття товщиною у 1 – 3 і більше міліметрів, що отримані електроконтактним припіканням порошкових матеріалів і електродуговим напленням вказаних вище сталей, характеризуються, на відміну від більшості зміцнюючих покриттів, хорошим адгезійним зв'язком із основою. Так, на думку автора роботи [19], в умовах деформування основи і використання поняття ефективних напружень як суми залишкових напружень у основі і експлуатаційних напружень у зміцнюючому покритті, є можливість провести оцінку величини залишкових напружень у ньому. Із збільшенням товщини покриття, величина цих напружень по асимптотичній кривій зменшується практично до нульових значень. А це, в свою чергу, дозволяє суттєво збільшити величину навантаження у зоні покриття – основа без ризику відшарування покриття. Таким чином, застосування зазначених методів отримання зміцнюючих покриттів дозволяє довести кратність підвищення терміну роботи малоресурсних деталей машин і апаратів харчових виробництв до рівня, що відповідає основній групі рівномірності інших її вузлів. Заміна ж деталей із дорогих матеріалів на дешеві із покриттями дає можливість покращити їх зно-

состійкість і корозійну стійкість у 1,5 – 2,0 рази, а витратність у 2 – 2,5 рази. Деталі із зміцненою поверхнею потребують чистої механічної обробки на спеціальному токарному та шліфувальному обладнанні із використанням сучасних надтвердих матеріалів. Це означає, що міцність адгезійного зв'язку повинна мати величину якою визначається вирішенням та умовами чистої обробки вказаної робочої поверхні деталей.

Слід відмітити, що одні, із вказаних методів впливу фізичних полів на структуру і характеристики приповерхневих шарів матеріалів, потребують подальшого доопрацювання і дослідження, інші можуть бути застосованими та вже використовуються у виробництві.

Контроль якості зносостійкого поверхневого покриття зазвичай проводиться металографічним, лазерно-радіаційним та іншими спеціальними сучасними методами. Експлуатація обладнання із зміцненими деталями показує, що їх масове застосування у виробництві дасть можливість суттєво скоротити тривалість і трудомісткість ремонтних робіт та збільшить термін експлуатації самого обладнання, а це, у свою чергу, значно підвищить ефективність і рентабельність самого виробничого процесу.

## Висновки.

Встановлено, що вплив зазначених фізичних полів приводить до значних змін у фізико-механічних характеристиках матеріалів.

Так, за наявності в газовому азотоводневому середовищі аміаку, за рівновеликої відносної деформації, значно зростає швидкість високотемпературної повзучості і деформативності молібдену.

Натомість, у порівнянні зі станом постачання (інертне середовище), вплив чистого азотоводневого газового середовища призводить до суттєвого зміцнення приповерхневих шарів металу, і, відповідно, зменшує високотемпературну швидкість його повзучості.

Отримано аналітичну залежність, що дозволяє у першому наближенні проводити апроксимацію кривих повзучості молібдену в агресивному газовому середовищі і, залежно від відсоткового відношення зазначених газових сумішей, прогнозувати поведінку зразків із молібдену у вказаних умовах.

Лазерна обробка приповерхневих шарів більшості досліджуваних матеріалів (65Г, ВТ8, ВТ10) негативно впливає на їх характеристики в тому за значних величин діючих навантажень.

Це зумовлено, на наш погляд, зміною структури цих шарів, досить значними полями залишкових на-

пружень, а також більш інтенсивним окисленням граничної мікротріщин поверхонь пустот, раковин, одночасним існуванням декількох фаз металів, складним розподілом легуючих елементів, що є особливо характерним для «складних» матеріалів.

Комбінована обробка поверхні зразків фізичними полями лазерно-радіаційного та лазерно-акустичного опромінювання дозволяє за рахунок зміни структурних характеристик для однорідних матеріалів в усьому діапазоні повторно-змінних напружень (ТЛ5), а для «складних» сплавів 65Г, ВТ8, ВТ10 – в зоні напружень близьких до границі втоми, суттєво підвищити їх витривалість, зносостійкість та корозійну стійкість.

Наявності перехідної зони твердого розчину між поверхневим зміцнюючим покриттям і основою, дає можливість отримувати цілісність композитної структури поперечного перерізу зразка яка забезпечується більш плавною і неперервною зміною фізико-хімічних властивостей матеріалу по його висоті.

Це особливо характерно для фізичних полів, обумовлених методиками електроконтактного прип'явання порошкових матеріалів, активованого газопламенного та електродугового напилення.

#### Список літератури

1. Скуратов Л. П. Установка для испытания конструкционных материалов на растяжение при повышенных температурах в газовых средах / [Л. П. Скуратов, В. К. Яцимирский, Б. А. Ляшенко и др.] // Завод. лаб. – 1981. – № 7. – С. 90 – 91.
2. Каталитические свойства веществ: справ. / [под общ. ред. акад. В. А. Ройтера]. – К.: Наукова думка, 1968. – 1463 с.
3. Дзядикевич Ю. В. Шляхи підвищення жаростійкості виробів із тугоплавких металів від високотемпературного окислення / Ю. В. Дзядикевич // Українська наука: минуле, сучасне, майбутнє. – 2008. – Вип. 13. – С. 20 – 28.
4. Змий В. И. Реакционно-активированная диффузия и вакуумные покрытия / В. И. Змий, С. Г. Руденький. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2010. – 158 с.
5. Смирнов С. В. Определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена в условиях тепловой деформации / С. В. Смирнов, А. В. Нестеренко, В. П. Швейкин // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11, Ч. 3. – С. 660 – 664.
6. Самсонов Г. В. Нитриды / Г. В. Самсонов. – К.: Наукова думка, 1969. – 380 с.
7. Каминский А. А. Об одном подходе к определению характеристик деформирования вязкоупругих материалов / А. А. Каминский, М. Ф. Селиванов // Прикл. механика. – 2005. – Т. 41, № 8. – С. 41 – 50.
8. Bashta A., Selivanov M. Strength characteristics of molybdenum in high-temperature gas medium. 8-th International fracture conference guide for manuscript preparation, 07-09 nov. 2007, Istanbul, 2007. – pp. 46 – 51.
9. Башта А. В. Методика експериментального вивчення дії фізичних полів на характеристики витривалості конструкційних матеріалів / А. В. Башта, О. В. Горик, В. А. Леонець // 46-а Наукова конференція викладачів, наукових працівників аспірантів та студентів Полтавського інженерно-будівельного

- університету, 7-9 квіт. 1994 р.: тези доп. – Полтава, 1994. – С. 142.
10. Башта А. В. Влияние лазерно-радиационных полей на характеристики прочности сплаву ВТ8 / А. В. Башта, В. А. Леонець, О. В. Горик // 48-а Наукова конференція викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського інженерно-будівельного університету, 10-12 квіт. 1996 р.: тези доп. – Полтава, 1996. – Ч. 3. – С. 86.
11. Башта А. В. Лазерно-акустичне опромінення зразків і його вплив на характеристики міцності металів / А. В. Башта, В. А. Леонець // 50-а Наукова конференція викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського державного технічного університету, 7-9 квіт. 1998 р.: тези доп. – Полтава, 1998. – Ч. 3. – С. 179
12. Матакэ Т. Усталостное тепловыделение в стали при изгибе, кручении, комбинированном нагружении / Т. Матакэ, Я. Имаи // Кюсю дайгаку оё рики гаку кэнкюсёхо. – 1976. – № 45. – С. 31 – 43.
13. Писаренко Г. С. Протекание пластических деформаций стали 12Х18Н10Т при циклическом симметричном изгибе образцов разной длины / Г. С. Писаренко, В. А. Леонев, М. Д. Беца // Пробл. прочности. – 1983. – № 8. – С. 20 – 23.
14. Ляшенко Б. А. Технологическое обеспечение дискретной структуры поверхности при азотировании / [Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловьев, В. Г. Каплун и др.] // Технологические системы. – 2009. – № 2. – С. 55 – 59.
15. Белоус В. А. Комплексный метод упрочнения стальных деталей: азотирование + износостойкие покрытия / [В. А. Белоус, И. Г. Ермоленко, Ю. А. Заднепровский, Н. С. Ломино] // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: 16-й Междуна. науч.-техн. семинара, 22-26 февр. 2016, Свалява: материалы докл. – К.: АТМ Украина, 2016. – 300 с.
16. Лопата Л. А. Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием с силовым активированием сдвигом: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы» / Л. А. Лопата. – Минск. – 1989. – 24 с.
17. Белоцерковский М. А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволоочными материалами / М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 12. – С. 17 – 23.
18. Белоцерковский М. А. Структурные особенности в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / [М. А. Белоцерковский, Т. В. Ворона, М. С. Агеев и др.] // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: 16-й Междуна. науч.-техн. семинара, 22-26 февр. 2016, Свалява: материалы докл. – К.: АТМ Украина, 2016. – 300 с.

#### References (transliterated)

1. Skuratov L. P. *Ustanovka dlya ispytaniia konstruktсионnykh materialov na rastiazhenie pri povyshenyykh temperaturah v gazovykh sredah* [Machine unit for testing structural materials for tension at elevated temperatures in gaseous media]. *Zavod. lab.*, 1981, No 7, pp. 90 – 91.
2. *Kataliticheskie svoystva veschestv* [Catalytic properties of substances]: *Sprav. [Directory]*. Under the gen. rel. of acad. V. A. Royter. Kiev, Naukova dumka, 1968, 1463 p.
3. Dzyadikovich Yu. V. *Shlyahi pidvischennya zharostlykosty virobiv iz tugoplavkikh metalliv vld visokotemperaturnogo okislennya* [Ways to improve the heat resistance of products made from refractory metals high-temperature oxidation]. *Ukrainska nauka: minule, suchasne, maybutne*, 2008, Vol. 13, pp. 20 – 28.

4. Zmiy V. I. *Reaktsionno-aktivirovannaya diffuziya i vakuumnyie pokryitiya [Reactively activated diffusion and vacuum coatings]*. Kharkov: NNTs HFTI, 2010, 158 p.
5. Smirnov S. V. *Opredeleyayushchie sootnosheniya mehaniki povrezhdennosti dlya molibdena v usloviyah teplovoy deformatsii [Defining relationships of damage mechanics for molybdenum under conditions of thermal deformation]*. Fundamentalnyie issledovaniya, 2012, № 3, Ch. 3, pp. 660 – 664.
6. Samsonov G. V. *Nitridy [Nitrides]*. Kiev, Naukova dumka, 1969, 380 p.
7. Kaminskiy A. A. *Ob odnom podhode k opredeleniyu harakteristik deformirovaniya vyazkoupругih materialov [About one approach to determine the deformation characteristics of viscoelastic materials]*. International Applied Mechanics, 2005, Vol. 41, No 8, pp. 41 – 50.
8. Bashta A., Selivanov M. *Strength characteristics of molybdenum in high-temperature gas medium*. 8-th International fracture conference, 07-09 nov. 2007: proceedings, Istanbul, Turkey, 2007, pp. 46 – 51.
9. Bashta A. V. *Metodika eksperimentalnogo vivchenniya dii fizychnykh poliv na kharakterystyky vytryvalosti konstruktivnykh materialiv [Technique of experimental study of physical fields effects on endurance characteristics of constructive materials]*. 46-t Scientific conference for academicians, scientists, post-graduate students and students of Poltava engineering and construction university, 7-9 apr. 1994: proceedings, Poltava, 1994, p. 142.
10. Bashta A. V. *Vplyv lazerno-radiatsiynnykh poliv na kharakterystyky mitsnosti splavu VT8 [Effect of laser radiation fields on the strength characteristics of the alloy B78 (VT8)]*. 48-t Scientific conference of instructors, scientists, post-graduate students and students of Poltava Engineering and Construction university, 10-12 apr. 1996: proceedings, Poltava, 1996, Part 3, p. 86.
11. Bashta A. V. *Lazerno-akustychno oprominennia zrazkiv i yogo vplyv na kharakterystyky mitsnosti metaliv [Laser-acoustic radiation patterns and its effect on the strength properties of metals]*. 50-th scientific conference of instructors, scientists, post-graduate students and students of Poltava Engineering and Construction university, 7-9 apr. 1998: proceedings, Poltava, 1998, Part 3, p. 179.
12. Matake T., Imasi Ya. *Ustalostnoe teplovyidelenie v stali pri izgibe, kruchenii, kombinirovannom nagruzhennii [Fatigue heat generation in steel under bending, torsion, combined loading]*. Kharkov: NNTs HFTI, 1976, № 45, pp. 31 – 43.
13. Pisarenko G. S., Leonets V. A., Betsa M. D. *Protekanie plasticheskikh deformatsii stali 12H18N10T pri tsiklicheskom simmetrichnom izgibe obraztsov raznoy dliny [The flow of plastic deformations of 12Kh18N10T steel under cyclic symmetrical bending samples of different lengths]*. Problemy prochnosti, 1983, No 2, pp. 20 – 23.
14. Lyashenko B. A., Soloviyh E. K., Kaplun V. G., Lipinskaya N. V., Kaplun P. V. *Tehnologicheskoe obespechenie diskretnoy struktury poverhnosti pri azotirovanii [Technological support of a discrete structure of surface when nitriding]*. Tehnologicheskie sistemy, 2009, No 2, pp. 55 – 59.
15. Belous V. A. *Kompleksnyi metod uprochneniya stalnykh detalей azotirovanie + iznosostoykie pokrytii [The complex method of hardening of steel parts: nitriding + wear-resistant surface]*. Sovremennyye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: 16-th International scientific technical seminar, 22-26 feb. 2016, Svaliava (Ukraine): proceedings, Kiev: ATM Ukraine, 2016, 300 p.
16. Lopata L. A. *Razrabotka tehnologii naneseniya iznosostoykoy poroshkovoy pokrytii elektrokontaktnym pripekaniem s silovym aktivirovaniem sdvigom [Development of the technology of applying wear-resistant powder coatings with electric-contact welding with force activation by shift]*. Dissertation abstract for PhD in technical science, speciality 05.16.06 «Powder Metallurgy and Composite Materials». Minsk, 1989, 24 p.
17. Belotserkovskiy M. A., Pryadko A. S. *Aktivirovannoe gazoplozmennoe i elektrodugovoe napylenie pokrytii provolochnyimi materialami [Activated gas-flame and electric arc-spraying of coatings with wire materials]*. Uprochnyayushchie tehnologii i pokrytiya, 2006, No 12, pp. 17 – 23.
18. Belotserkovskiy M. A., Vorona T. V., Ageev M. S., Lopata V. N., Chigray S. L. *Strukturnyye osobennosti v stalnykh gazo-termicheskikh pokrytyyah i vozmozhnosti ih ispolzovaniya [Structural features in steel gas-thermal coatings and the possibilities of their use]*. Sovremennyye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: 16-th international scientific technical seminar, 22-26 feb. 2016, Svaliava (Ukraine): proceedings, Kiev: ATM Ukraine, 2016, 300 p.

Надійшло (received) 12.07.17

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Вплив фізичних полів на характеристики міцності конструкційних матеріалів / А. В. Башта // Вісник НТУ«ХПІ».** – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ«ХПІ». – 2017. – № 48 (1269). – С. 3 – 11. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0821.

**Влияние физических полей на характеристики прочности конструкционных материалов / А. В. Башта // Вісник НТУ«ХПІ».** – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ«ХПІ». – 2017. – № 48 (1269). – С. 3 – 11. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0821.

**Influence of physical fields on strength property of surface layers of structural materials / A. V. Bashta / Bulletin of NTU “KhPI”.** – Series: Chemistry, Chemical Engineering and Ecology. – Kharkov: NTU “KhPI”. – 2017. – No 48 (1269). – P. 3 – 11. – Bibliogr.: 18 names. – ISSN 2079-0821.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Башта Анатолій Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри теоретичної механіки і ресурсощадних технологій; тел.: (050) 742-58-09; e-mail: bashta.anatoliy@gmail.com.