

**С. Є. Донець<sup>1</sup>, В. Ф. Клепиков<sup>1</sup>, В. В. Литвиненко<sup>1,\*</sup>, Є. М. Прохоренко<sup>1</sup>,  
Ю. Ф. Лонін<sup>2</sup>, А. Г. Пономарьов<sup>2</sup>, О. А. Старцев<sup>1</sup>, В. Т. Уваров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, Україна

<sup>2</sup> ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, Україна

\*Відповідальний автор: [vvlytvynenko@ukr.net](mailto:vvlytvynenko@ukr.net)

## **ВИПРОБУВАННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРИСКОРЮВАЧА СИЛЬНОСТРУМОВИХ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОНІВ**

Вивчено проблему застосування сильнострумових релятивістських електронних пучків для тестування лопаток газотурбінних двигунів до дії висококонцентрованих потоків енергії. Здобуті дані дозволять розуміти напрямки застосування прискорювачів для визначення граничних значень радіаційного та термічного впливу, при яких виробни здатні зберігати експлуатаційні характеристики. Установлено особливості зміни структури зерен при впливі потоків електронів різної густини. Показано, що механізм руйнування полягає у збільшенні пор на межах зерен та в оплавленні їх.

*Ключові слова:* сильнострумовий прискорювач електронів, лопатка газотурбінного двигуна, опромінення.

### **1. Вступ**

Технологічні процеси, що ґрунтуються на використанні енергії іонізуючого випромінювання, мають узагальнюючу назву – радіаційні технології. Їх у свою чергу можна умовно поділити на модифікуючі технології, що ґрунтуються на опроміненні певного матеріалу з метою надання йому заданих експлуатаційних властивостей [1], та на тестові, в яких опромінення виконує роль інструмента відтворення екстремальних експлуатаційних (або інших аварійних) навантажень з метою дослідження граничних можливостей матеріалів для збереження ним функціональних властивостей в умовах такого впливу [2]. Особливе місце в напрямку радіаційних технологій посідають імпульсні сильнострумові релятивістські електронні пучки, оскільки вони забезпечують можливість передачі просторово розподіленого теплового імпульсу великої потужності. Перспективним напрямком такого застосування є енергетичне машинобудування, зокрема газотурбінні двигуни (ГТД), адже однією з умов їхньої безпечної експлуатації та підвищення ресурсу роботи є забезпечення цілісності складових елементів, що перебувають в умовах дії сильноградієнтних температурних полів. Серед найбільш вразливих елементів ГТД є лопатки, що свого часу і зумовило розвиток таких технологій їхнього виготовлення, як вирощування з розплаву зі спрямованою кристалізацією, нанесення захисних покриттів, розробка спеціальних сплавів та захисних композитів [3 - 5].

Одним з можливих напрямків удосконалення виробництва лопаток ГТД є інтеграція радіаційних технологій до існуючих технологічних процесів, що зазвичай дає змогу в стислі строки переводити виробництво на більш високий технологічний рівень та гарантувати підвищену якість продукції. Концентровані потоки енергії мають успішні застосування в енергетичному машинобудуванні та при виготовленні елементів ГТД. Потужне лазерне випромінювання застосовується як для наплавки захисних покриттів на лопатки турбін, так і для видалення нашарувань, що утворюються в процесі експлуатації [6]. Потоки іонів застосовують для зміцнюючої модифікації поверхні шляхом імплантації в поверхневий шар. Знаходять застосування також сильнострумові електронні пучки низьких енергій для відновлення зношених поверхонь наплавкою зміцнюючих матеріалів. Повторне опромінення сильнострумовими електронними пучками також використовується для досягнення кращої адгезії з основним матеріалом виробу та/або формування нових сполук з більш високими експлуатаційними характеристиками, стійкими до дії екстремальних навантажень [7]. Енергії електронів в останньому випадку перебувають в межах 115 - 125 кеВ. Становить інтерес розширення технологічних застосувань для сильнострумових прискорювачів електронів з енергіями в 150 - 350 кеВ. Прискорювачі сильнострумових електронних пучків указанного діапазону енергій створювались для реалізації проектів термоядерного синтезу, генерації мікрохвильового електромагнітного

випромінювання, вирішення спеціальних задач. На теперішній час їх розглядають як інструмент нанесення захисних покриттів [8] та як засіб тестування стійкості матеріалів сховищ радіоактивних відходів [9] та матеріалів активної зони [10] до дії екстремальних чинників. Слід зазначити, що необхідність оцінки впливу екстремальних потоків енергії на лопатки ГТД зумовлена такими міркуваннями. По-перше, підвищення ефективності ГТД пов'язують у тому числі зі збільшенням температури газових струменів, а отже виникає задача пошуку інструмента створення відповідних температурних градієнтів. По-друге, збільшення енергії електронів у пучку створює теплові та механічні впливи на більших відстанях від поверхні, які є співвимірними з товщиною захисних покриттів. Таким чином, застосування сильноточових релятивістських електронних пучків до випробування лопаток ГТД дозволить започаткувати новий підхід для з'ясування стійкості цих виробів.

## 2. Методи дослідження

Опромінення зразків лопаток ГТД проводилось на прискорювачі сильноточових релятивістських електронів ТЕМП-А (ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України) рис. 1. Електрична схема прискорювача – це магнітоізолюваний діод з інвертованим магнітним полем.



Рис. 1. Загальний вигляд прискорювача ТЕМП-А. (Див. кольорове фото на сайті журналу.)

Релятивістський електронний пучок формується в діоді в результаті вибухової емісії на поверхні катода. Джерелом живлення прискорювача є генератор імпульсів напруг за схемою Аркадьєва - Маркса. Енергія електронів  $\sim 0,35$  МеВ, струм пучка  $\sim 2$  кА, тривалість фронту імпульсу

$\sim 5$  нс. Опромінення мішеней проводиться дискретно, одиночними імпульсами. Зразки кріпились на колекторі рис. 2, який в електричній схемі є заземленням. Опромінення здійснюється у вакуумній камері прискорювача при тиску  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  торр.



Рис. 2. Зразок опроміненої лопатки ГТД.

## 3. Результати чисельного моделювання

Унікальність впливу сильноточових релятивістських електронних пучків полягає в комплексності їхнього впливу на матеріал. Перша відмінність властива всім іонізуючим частинкам і проявляється в тому, що максимум розташування поглиненої дози припадає на підповерхневу область. Оскільки, як правило, такі пучки є високоточовими, їхня дія супроводжується миттєвим підвищенням температури зі швидкостями порядку  $10^7 - 10^8$  К/с, що приводить до плавлення частини опромінюваного матеріалу. Оскільки підповерхнева область нагрівається більш швидко, у ній на певний час виникає шар перегрітої рідини, який вивільняється в міру розплаву верхніх шарів. Разом з тим подібне уявлення не є остаточним, тому що, як нами було показано в роботі [11], під дією пучка відразу починається випаровування поверхні, що спричиняє утворення екрануючої хмари, а потім відбувається абляційний викид речовини мішені. Ці процеси у свою чергу ініціюють термічний та гідродинамічний режими впливу на мішень. Власне радіаційний вплив має місце як потік гальмівного рентгенівського випромінювання вглиб мішені.

Швидке збільшення температури в об'ємі мішені в першу чергу спричиняє виникнення термопружних напружень [12]

$$\sigma_t(r, t) = \Gamma \cdot \varepsilon(r, t), \quad (1)$$

де  $\varepsilon(r, t)$  – величина поглиненої енергії випромінювання;  $\Gamma$  – параметр Грюнайзена речовини, що становить

$$\Gamma = \frac{\alpha}{k \cdot \rho \cdot c}, \quad (2)$$

де  $\alpha$ ,  $k$ ,  $\rho$ ,  $c$  – коефіцієнт теплового розширення, ізотермічний модуль всебічного стиснення, густина та теплоємність речовини відповідно.

Величина поглиненої енергії визначається виразом [12]

$$\varepsilon(r, t) = \int_0^t j(r, t') \left( \frac{dE}{dr} \right) dt', \quad (3)$$

де  $j(r, t)$  – потік частинок, що попадають на поверхню мішені;  $\frac{dE}{dr}$  – питомі втрати енергії частинки при проходженні одиниці шляху.

Оскільки нами розглядаються електрони з енергією порядку 0,5 МеВ, втрати енергії будуть іонізаційними. І, як витікає з наших міркувань стосовно значень часового розподілу струму пучка, границі інтегрування у формулі (3) повинні визначатись тривалістю імпульсу. У певній кореляції зі зміною поля поглиненої дози буде змінюватись і температурне поле, тому згідно з міркуваннями, що викладені в роботі [13], просторово-часове співвідношення між температурою та внутрішніми напруженнями  $\sigma(r, t)$ , зумовленими опроміненням, визначаються виразом

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ C_s^2(r) \frac{\partial \sigma(r, t)}{\partial r} \right] \frac{\partial^2 \sigma(r, t)}{\partial t^2} = \Gamma c \rho \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial t^2}, \quad (4)$$

де  $C_s^2$  – швидкість звуку.

Разом з тим відомо, що при абляційному викиді речовини, а він відбувається також у процесі дії імпульсу пучка, утворюється тиск на межі мішені та газоплазмової хмарини, і величина цього тиску визначається виразом [14]

$$p = (\gamma_{ef} - 1) \cdot \omega, \quad (5)$$

де  $\gamma_{ef} = 1,2$  – співвідношення значень питомої теплоємності твердого тіла та плазми;  $\omega$  – об'ємна густина енергії випромінювання, що поглинається мішенню, Дж/см<sup>3</sup>. Отже, ще раз бачимо, що врахування перебігу процесу абляційного викиду є важливим з точки зору розуміння внеску всіх чинників, що впливають на формування структурно-фазових перетворень в опромінюваних сплавах. Урахування чинника тиску плазмової хмарини є особливо важливим якраз при помірних значеннях інтенсивності пучків, коли їхнє значення є співвимірним з термопружними механізмами.

#### 4. Результати матеріалознавчих досліджень

У результаті опромінення на поверхні утворювався хвилеподібний рельєф в області інтенсивної дії пучка (див. рис. 2), що узгоджується з результатами розрахунку поля механічних зміщень (рис. 3, а) і показує, що по дотичній до поверхні відбувався зсув розплавленої речовини. На рис. 3 показано результати розрахунку поля температури та механічних зміщень методом скінченних елементів у програмному пакеті FreeFEM. В околі зони опромінення була утворена периферійна зона, де відбувався частковий розплав матеріалу. Растрова електронна мікроскопія показала, що початкова зеренна структура лопатки є високовпорядкованими дендритами з достатньо щільним розташуванням, що досягається спрямованою кристалізацією (рис. 4, а). EDS – аналіз показав, що в елементному складі переважають нікель і кобальт, а також низка легуючих елементів (таблиця).

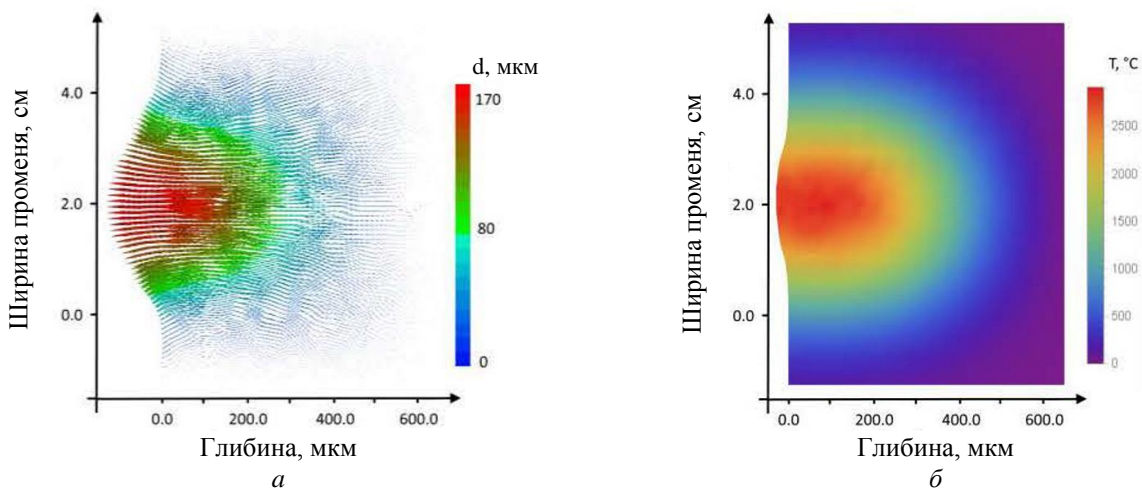


Рис. 3. Поле зміщень на мішені після дії імпульсу пучка (а)

і розподіл температурного поля після дії імпульсу пучка (б). (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

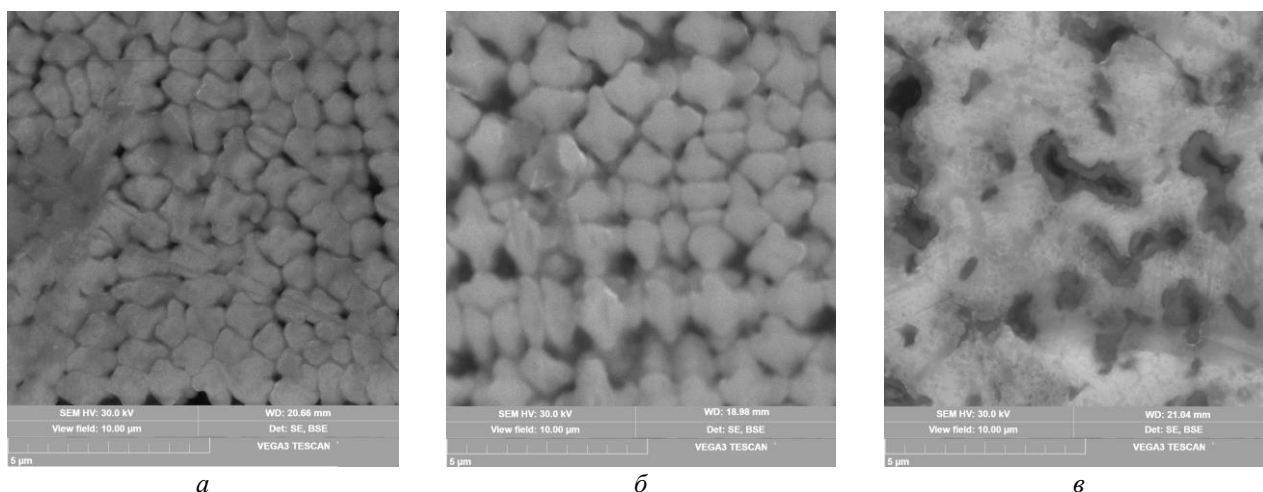


Рис. 4. Структура поверхні лопатки ГДТ у ділянках:  
*a* – неопромінена, *б* – опромінена периферійна, *в* – епіцентр опромінення.

#### Нормалізований елементний склад матеріалу до і після опромінення, % мас. $\pm 2\sigma$

Зона	Al	Cr	Co	Ni	W	Nb
Неопромінений зразок	$5 \pm 2$	$10 \pm 3$	$9 \pm 2$	$68 \pm 8$	$6 \pm 2$	$2 \pm 1$
Опромінена периферія	$4 \pm 1$	$15 \pm 3$	$8 \pm 2$	$61 \pm 8$	$12 \pm 3$	–
Епіцентр опромінення	$2 \pm 1$	$16 \pm 3$	$14 \pm 3$	$51 \pm 7$	$17 \pm 3$	–

Периферійна зона опромінення за структурою показує, що внаслідок дії пучка збільшилися пори на міжзеренних межах (див. рис. 4, *б*). Збільшення пор було зумовлено двома факторами. По-перше, виникнення внутрішніх напружень унаслідок дії пучка [15], які можуть у подальшому релаксувати, що призведе до пришвидшеного руйнування. По-друге, пори збільшуються завдяки неоднорідності розплавлення гетерогенних дендритних структур. Ядра дендритів є більш тугоплавкими через особливості кристалізації, при цьому периферія є порівняно легкоплавкою через збагачення легуючими елементами. Розмір дендритів збільшився за рахунок ресолідифікації розплаву й об'єднання дендритів при низькій швидкості охолодження.

У зоні інтенсивного опромінення, на яку припала більша частина поглиненої енергії випромінювання (на рис. 3 відповідає центральній частині пучка) спостерігалось переплавлення меж зерен (див. рис. 4, *в*). Елементи дендритної структури матеріалу надалі спостерігаються. Дендритна структура матеріалу виявилась стійкою до дії сильнопотужного електронного пучка завдяки особливостям упаковки структури та елементній неоднорідності. Серед основних компонентів елементного складу відбувся перерозподіл, зокрема збільшилась питома частка вольфраму, який утворював більш тугоплавкі сполуки, тоді як інші елементи в результаті абляційного викиду газоплазмового факела [16] випаровувались або зміщувались у сусідню область, що нами спостерігалось у роботі [11]. Імовірно, що вольфрам, хром, кобальт становлять ядра дендритів у початковій структурі, а нікель, ніобій і алюміній збагачують їхню периферію і міждендритні межі.

Треба зазначити, що використання таких пучків пов'язано з генерацією потоків гальмівного та електромагнітного випромінювання, які впливають на засоби діагностики. При роботі на них дотримання норм радіаційного захисту досягається застосуванням свинцевих екранів. Для екранування електронних приладів та обчислювальної техніки від дії електромагнітних полів та іонізуючого випромінювання доцільно застосовувати композитні матеріали [17, 18]. Контроль поля розсіяного гальмівного випромінювання може здійснюватись із застосуванням детекторів на основі сполук ртуті [19, 20], які мають достатньо прийнятні значення точності та радіаційної стійкості для потоків гамма-квантів з енергією до 500 кеВ.

#### 5. Висновки

Сильнопотужні релятивістські електронні пучки доцільно використовувати як інструмент тестування стійкості термонавантажених елементів газотурбінних двигунів до дії концентрованих потоків енергії. Це дає змогу здобути нові дані про можливість підвищення температури газоплазмового потоку двигуна та збільшення його ефективності. Застосування електронних пучків дозволяє також відтворювати режими впливу, що виникають в екстремальних умовах, і таким чином здобувати знання про межі стійкості виробів у випадку надзвичайних ситуацій.

Роботу виконано із залученням коштів бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПВК 6541230).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Т.В. Ковалінська, І.А. Остапенко, В.І. Сахно. Технологія рівномірного електронного опромінення промислових виробів великих габаритів. *Ядерна фізика та енергетика* 17(2) (2016) 199.
2. Т.В. Ковалінська, В.І. Сахно. Електрофізичний імітатор ушкоджуючих факторів ядерної енергії. *Ядерна фізика та енергетика* 20(1) (2019) 84.
3. А.В. Богуслаев, В.В. Мурашко. Газоцикловое покрытие лопаток турбин газотурбинных двигателей. *Вестник двигателестроения* 4 (2006) 73.
4. С.А. Estrada M. New technology used in gas turbine blade materials. *Scientia et Technica Año XIII, 36* (2007) 297.
5. Ю.Г. Квасницкая. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих лопаток турбин современных промышленных газотурбинных двигателей. *Металл и литье Украины* 8(267) (2015) 29.
6. С.И. Планковский, Ф.Ф. Головин, Ф.Ф. Сиренко. Анализ существующих методов очистки поверхностей лопаток турбин в газотурбинных двигателях. *Авіаційно-космічна техніка і технологія* 6(103) (2013) 8.
7. V.A. Shulov et al. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals* 57 (2016) 256.
8. S.E. Donets et al. Aluminum surface coating of copper using high-current electron beam. *Problems of Atomic Science and Technology* 98(4) (2015) 302.
9. N.I. Bazaleev et al. Simulating the radiation transformations in rocks: potential media for radioactive waste disposal. *Physics of Particles and Nuclei Letter* 6(5) (2009) 417.
10. V.F. Klepikov et al. Behavior of Zr1%Nb Alloy Under Swift Kr Ion and Intense Electron Irradiation. *Journal of Nano- and Electronic Physics* 7(4) (2015) 04016.
11. A.G. Kobets et al. Melting effects of high-current relativistic electron beam on aluminum alloy 1933. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 51(5) (2015) 478.
12. В.Д. Воловик, В.Т. Лазурик. Акустический эффект пучков заряженных частиц в металлах. *ФТТ* 15 (1973) 2305.
13. Г. Блейхер, В. Кривобоков, О. Пашенко. Теплофизические процессы в твердом теле при воздействии мощных импульсных пучков заряженных частиц. *Известия томского политехнического университета. Радиационная физика твердого тела и радиационные технологии* 303(2) (2000) 71.
14. С. Бацанов, Б. Демидов, Л. Рудаков. Использование сильноточного РЭП для осуществления структурных превращений. *Письма в ЖЭТФ* 30(9) (1979) 611.
15. V.T. Uvarov et al. Radiation acoustic control over the thermal parameter of construction materials irradiated by intense relativistic electron beam. *Physics of Particles and Nuclei Letters* 11(3) (2014) 274.
16. V.F. Klepikov et al. Dynamics of the gas-plasma torch formed by the high-current electron beam action on solid targets. *Problems of Atomic Science and Technology* 1(15) (2009) 119.
17. E.M. Prokhorenko et al. Metal containing composition materials for radiation protection. *Problems of Atomic Science and Technology*. 4(92) (2014) 125.
18. E.M. Prokhorenko et al. Improvement of characteristics of composite materials for radiation biological protection. *Problems of Atomic Science and Technology* 6(88) (2013) 240.
19. A.I. Skrypnyk et al. Simulation of characteristics of gamma-radiation detectors based on mercury compounds. *Problems of Atomic Science and Technology* 3(85) (2013) 231.
20. P.M. Amarasinghe et al. Growth of high quality mercurous halide single crystals by physical vapor transport method for AOM and radiation detection applications. *Journal of Crystal Growth* 450 (2016) 96.

С. Е. Донец<sup>1</sup>, В. Ф. Клепиков<sup>1</sup>, В. В. Литвиненко<sup>1,\*</sup>, Е. М. Прохоренко<sup>1</sup>,  
Ю. Ф. Лонин<sup>2</sup>, А. Г. Пономарев<sup>2</sup>, А. А. Старцев<sup>1</sup>, В. Т. Уваров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків, Україна

<sup>2</sup> ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, Україна

\*Ответственный автор: vvlytyvnenko@ukr.net

### ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСКОРИТЕЛЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Изучена проблема применения сильноточных релятивистских электронных пучков для тестирования стойкости лопаток газотурбинных двигателей к действию высококонцентрированных потоков энергии. Полученные данные позволят понимать направления применения ускорителей для определения предельных значений радиационного и термического воздействия, при которых изделия способны сохранять эксплуатационные характеристики. Установлены особенности изменения зеренной структуры при воздействии потоков электронов различной плотности. Показано, что механизм разрушения состоит в увеличении пор на границах зерен и в их оплавлении.

*Ключевые слова:* сильноточный ускоритель электронов, лопатка газотурбинного двигателя, облучение.

S. E. Donets<sup>1</sup>, V. F. Klepikov<sup>1</sup>, V. V. Lytvynenko<sup>1,\*</sup>, E. M. Prokhorenko<sup>1</sup>,  
Yu. F. Lonin<sup>2</sup>, A. G. Ponomarev<sup>2</sup>, O. A. Startsev<sup>1</sup>, V. T. Uvarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrophysics and Radiation Technologies, National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> NSC "Kharkiv Institute of Physics and Technology", National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kharkiv, Ukraine

\*Corresponding author: vvlytvynenko@ukr.net

## TESTING OF GAS-TURBINE BLADES ENGINES USING THE ACCELERATOR OF HIGH CURRENT RELATIVISTIC ELECTRONS

The problem of using high current relativistic electron beams for testing blades of gas-turbine engines for the action of highly concentrated energy flows is studied. The data obtained will allow us to understand the directions of use of accelerators to determine the limits of radiation and thermal impact at which products are able to maintain performance. The peculiarities of grain structure change under the influence of electron fluxes of different densities have been established. It has been shown that the mechanism of destruction is to increase the pores at the grain boundaries and to melt them.

*Keywords:* high current electron accelerator, blade of gas-turbine engine, irradiation.

### REFERENCES

1. T.V. Kovalinska, I.A. Ostapenko, V.I. Sakhno. The technology of steady electron irradiation of large size industrial products. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 17(2) (2016) 199. (Ukr)
2. T.V. Kovalinska, V.I. Sakhno. Electrophysical simulator of nuclear energy striking factors. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 20(1) (2019) 84. (Ukr)
3. A.V. Boguslayev, V.V. Murashko. Gas cycle coating of turbine blades of gas turbine engines. *Vestnik dvigatelestroeniya* 4(6) (2006) 73. (Rus)
4. C.A. Estrada M. New technology used in gas turbine blade materials. *Scientia et Technica Año XIII*, 36 (2007) 297.
5. I.G. Kvasnytska. Improving the performance of working blades of modern industrial gas turbine engines. *Metall i Litey Ukrainy* 8 (2015) 29. (Rus)
6. S.I. Plankovskiy, F.F. Golovin, F.F. Sirenko. Considering of the existent techniques of cleaning turbine blade surface in gas turbine engines. *Aviatsijno-kosmichna Tekhnika i Tekhnologiya (Aerospace Technic and Technology)* 6(103) (2013) 8. (Rus)
7. V.A. Shulov et al. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals* 57 (2016) 256.
8. S.E. Donets et al. Aluminum surface coating of copper using high-current electron beam. *Problems of Atomic Science and Technology* 98(4) (2015) 302.
9. N.I. Bazaleev et al. Simulating the radiation transformations in rocks: potential media for radioactive waste disposal. *Physics of Particles and Nuclei Letters* 6(5) (2009) 417.
10. V.F. Klepikov et al. Behavior of Zr1%Nb Alloy Under Swift Kr Ion and Intense Electron Irradiation. *Journal of Nano- and Electronic Physics* 7(4) (2015) 04016.
11. A.G. Kobets et al. Melting effects of high-current relativistic electron beam on aluminum alloy 1933. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 51(5) (2015) 478.
12. V.D. Volovik, V.T. Lazurik. Acoustic effect of charged particle beams in metals. *Fizika Tverdogo Tela (Physics of the Solid State)* 15 (1973) 2305. (Rus)
13. G. Bleuher, V. Krivobokov, O. Pashchenko. Thermophysical processes in solid state by the influence of power pulse charged particles. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* 303(2) (2000) 71. (Rus)
14. S.S. Batsanov, B.A. Demidov, L.I. Rudakov. Using high intensity REB to perform structural transformations. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki (Technical Physics Letters)* 30 (1979) 611. (Rus)
15. V.T. Uvarov et al. Radiation acoustic control over the thermal parameter of construction materials irradiated by intense relativistic electron beam. *Physics of Particles and Nuclei Letters* 11(3) (2014) 274.
16. V.F. Klepikov et al. Dynamics of the gas-plasma torch formed by the high-current electron beam action on solid targets. *Problems of Atomic Science and Technology* 1(15) (2009) 119.
17. E.M. Prokhorenko et al. Metal containing composition materials for radiation protection. *Problems of Atomic Science and Technology* 4(92) (2014) 125.
18. E.M. Prokhorenko et al. Improvement of characteristics of composite materials for radiation biological protection. *Problems of Atomic Science and Technology* 6(88) (2013) 240.
19. A.I. Skrypnyk et al. Simulation of characteristics of gamma-radiation detectors based on mercury compounds. *Problems of Atomic Science and Technology* 3(85) (2013) 231.
20. P.M. Amarasinghe et al. Growth of high quality mercurous halide single crystals by physical vapor transport method for AOM and radiation detection applications. *Journal of Crystal Growth* 450 (2016) 96.

Надійшла / Received 15.01.2020