

УДК 669.245:629.7

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.146.22

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ

КАЛИНИНА Н. Е.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, профессорКАЛИНИН В. Т.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, профессорГРЕКОВА М. В.<sup>3\*</sup>, аспирант, инженерМАМЧУР С. И.<sup>4</sup>, к.т.н., доцентНОСОВАТ. В.<sup>5</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup> Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, кафедра технологии производства, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепр, Украина, ORCID 0000-0003-3810-6778

<sup>2</sup> Национальная металлургическая академия Украины, кафедра литейного производства, пр. Гагарина, 4, 49005, Днепр, Украина, ORCID 0000-0003-4490-0994

<sup>3\*</sup> ГП «КБ «Южное» им. М. Янгеля ул. Криворожская 3, Днепр, Украина, 49008, e-mail: marina.grekova.kbu@gmail.com, тел. +38(096)-843-14-41, ORCID 0000-0003-4099-5471

<sup>4</sup> Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, кафедра технологии производства, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепр, Украина, ORCID 0000-0002-8146-8849

<sup>5</sup> Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, кафедра технологии производства, пр. Гагарина, 72, 49010, Днепр, Украина, ORCID 0000-0002-0855-568X

**Цель.** Разработка технологии модифицирования никелевого сплава системы Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co дисперсными композициями, полученными на установках плазмохимического синтеза. **Методика.** Дисперсные и нанодисперсные порошковые композиции на основе титана, карбида титана и алюминия размером до 1 мкм получены на промышленных высокочастотных установках плазмохимического синтеза в АО «Неомат» (г. Рига, Латвия). Порошковые композиции прессовали в таблетки размером 30×10 мм и использовали в качестве модификаторов никелевого расплава. Материалом исследования служил многокомпонентный никелевый сплав системы Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co, получаемый равноосной кристаллизацией. **Результаты.** Приведены результаты экспериментальных и опытно-промышленных испытаний комплекса механических свойств и коррозионной стойкости многокомпонентного жаропрочного никелевого сплава ЖСБК применяемого для изготовления лопаток газотурбинных двигателей. Разработан технологический режим модифицирования никелевого расплава дисперсными композициями на основе карбида титана. Исследованы особенности формирования структуры модифицированного сплава, а также комплекс прочностных пластических свойств. Достигнуто значительное измельчение зерна сплава в результате модифицирования, что обусловило повышение прочностных свойств до 10 % и ударной вязкости до 35 %. Повышена коррозионная стойкость сплава ЖСБК в окислительной среде, глубина коррозии при температуре 1000 °С уменьшилась на 25 % по сравнению с немодифицированным сплавом. Повышение стойкости и высокотемпературной коррозии связано с более равномерным распределением избыточных фаз в структуре модифицированного сплава. **Научная новизна.** Установлены закономерности влияния модифицирования дисперсной тугоплавкой композицией карбида титана на повышение комплекса свойств многокомпонентного никелевого сплава. **Практическая значимость.** Полученные результаты использованы на машиностроительном предприятии для повышения механических и эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов для лопаток газотурбинного двигателя.

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав; механические свойства; структура; высокотемпературная коррозия; модифицирование

## МЕХАНИЧНІ І КОРОЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СПЛАВІВ, МОДИФІКОВАНИХ ДИСПЕРСНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

КАЛІНІНА Н. Є.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, професорКАЛІНІН В. Т.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, професорГРЕКОВА М. В.<sup>3\*</sup>, аспірант, інженерМАМЧУР С. І.<sup>4</sup>, к.т.н., доцентНОСОВАТ. В.<sup>5</sup>, к.т.н., доцент

<sup>1</sup> Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, кафедра технології виробництва, пр. Гагарина, 72, 49010, Дніпро, Україна, ORCID 0000-0003-3810-6778

<sup>2</sup> Національна металургійна академія України, кафедра ливарного виробництва, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, ORCID 0000-0003-4490-0994

<sup>3\*</sup> ДП «КБ «Південне» ім. М. Янгеля вул. Криворізьська 3, Дніпро, Україна, 49008, e-mail: marina.grekova.kbu@gmail.com, тел. 096-843-14-41, ORCID 0000-0003-4099-5471

<sup>4</sup> Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, кафедра технології виробництва, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, ORCID 0000-0002-8146-8849

<sup>5</sup> Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, кафедра технології виробництва, пр. Гагаріна, 72, 49010, Дніпро, Україна, ORCID 0000-0002-0855-568X

**Мета.** Розробка технології модифікування нікелевого сплаву системи Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co дисперсними композиціями, отриманими на установках плазмохімічного синтезу. **Методика.** Дисперсні і нанодисперсні порошкові композиції на основі титану, карбиду титану і алюмінію розміром до 1 мкм отримані на промислових височастотних установках плазмохімічного синтезу в АТ «Неомат» (м Рига, Латвія). Порошкові композиції пресували в таблетки розміром 30 × 10 мм і використовували в якості модифікаторів нікелевого розплаву. Матеріалом дослідження слугував багатокomпонентний нікелевий сплав системи Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co, одержаний рівноосною кристалізацією. **Результати.** Наведено результати експериментальних і дослідно-промислових випробувань комплексу механічних властивостей та корозійної стійкості багаткомпонентного жароміцного нікелевого сплаву ЖС6К застосовуваного для виготовлення лопаток газотурбінних двигунів. Розроблено технологічний режим модифікування нікелевого розплаву дисперсними композиціями на основі карбиду титану. Досліджено особливості формування структури модифікованого сплаву, а також комплекс міцності пластичних властивостей. Досягнуто значне подібнення зерна сплаву в результаті модифікування, що зумовило підвищення міцнісних властивостей до 10 % і ударної в'язкості до 35 %. Підвищена корозійна стійкість сплаву ЖС6К в окислювальному середовищі, глибина корозії при температурі 1000 °С зменшилася на 25 % в порівнянні з немодифікованим сплавом. Підвищення стійкості і високотемпературної корозії пов'язано з більш рівномірним розподілом надлишкових фаз в структурі модифікованого сплаву. **Наукова новизна.** Встановлено закономірності впливу модифікування дисперсної тугоплавкої композиції карбиду титану на підвищення комплексу властивостей багаткомпонентного нікелевого сплаву. **Практична значимість.** Отримані результати використані на машинобудівному підприємстві для підвищення механічних і експлуатаційних властивостей жароміцних сплавів для лопаток газотурбінного двигуна.

Ключові слова: жароміцний сплав; механічні властивості; структура; високотемпературна корозія; модифікування

## MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF MULTICOMPONENT ALLOYS, MODIFIED BY DISPERSE COMPOSITIONS

KALININA N. E. <sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech), Prof.

KALININ V. T. <sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech), Prof.

GREKOVA M. V. <sup>3\*</sup>, Appl., Ing.

MAMCHUR S. I. <sup>4</sup>, Ph.D., Assoc. Prof.

NOSOVA T. V. <sup>5</sup>, Ph.D., Assoc. Prof.

<sup>1</sup> DNU O. Gonchara, Department of Production Technology, Gagarina Avenue, 72, 49010, Dnipro, Ukraine, ORCID 0000-0003-3810-6778

<sup>2</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine, Department of Foundry, Gagarina Avenue, 4, 49005, Dnipro, Ukraine, ORCID 0000-0003-4490-0994

<sup>3\*</sup> Yuzhnoye State Design Office, 3, Krivorozhskaya str., Dnipro, Ukraine, 49008, e-mail: marina.grekova.kbu@gmail.com, n. 096-843-14-41, ORCID 0000-0003-4099-5471

<sup>4</sup> DNU O. Gonchara, Department of Production Technology, Gagarina Avenue, 72, 49010, Dnipro, Ukraine, ORCID 0000-0002-8146-8849

<sup>5</sup> DNU O. Gonchara, Department of Production Technology, Gagarina Avenue, 72, 49010, Dnipro, Ukraine, ORCID 0000-0002-0855-568X

**Goal.** Development of technology for modifying the nickel alloy of the Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co system with dispersed compositions obtained in plasma-chemical synthesis plants. **Methodology.** Dispersed and nanodispersed powder compositions based on titanium, titanium carbide and aluminum up to 1 μm in size are obtained at industrial high-frequency plasma synthesis plants in JSC "Neomat" (Riga, Latvia). Powder compositions were compressed into tablets of 30 × 10 mm size and used as nickel melt modifiers. The material of the study was a multicomponent nickel alloy of the Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co system obtained by equiaxed crystallization. **Results.** The results of experimental and pilot-industrial tests of a complex of mechanical properties and corrosion resistance of a multicomponent high-temperature nickel alloy ZhS6K used for the manufacture of gas turbine engine blades were presented. The technological mode of modifying the nickel melt by dispersed compositions based on titanium carbide was developed. The peculiarities of a modified alloy structure formation, as well as the complex of strength plastic properties, are studied. A significant refinement of the alloy grain as a result of modification was achieved, which led to increasing of strength properties of up to 10% and an impact strength up to 35%. The corrosion resistance of the alloy ZhS6K in oxidizing environment was increased, the corrosion depth at 1000 °C decreased by 25% in comparison with the unmodified alloy. The increase in durability and high-temperature corrosion is associated with a more even distribution of excess phases in the structure of the modified alloy. **Scientific**

*novelty.* The regularities of the effect of modifying a titanium carbide by a dispersed refractory composition on increasing the complex of a multicomponent nickel alloy properties are established. *Practical significance.* The obtained results were used at the machine-building enterprise to improve the mechanical and operational properties of high-temperature alloys for gas turbine engine blades.

*Key words:* heat-resistant alloy; mechanical properties; structure; high-temperature corrosion; modifying

### Введение

Повышение качества и эксплуатационных свойств изделий машиностроения и изделий авиакосмической техники может быть успешно решено при разработке и усовершенствовании существующих материалов. В современных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) на долю жаропрочных сплавов приходится до 40 % массы двигателя. При этом работоспособность всего авиационного двигателя определяется работоспособностью лопаток турбины. Условия работы лопаток в ГТД нового поколения становятся все более напряженными в связи с повышением температуры газа на входе в турбину, увеличением скорости полета, ресурса и цикличности работы двигателя. Эти экстремальные условия требуют применения перспективных материалов с улучшенной структурой и свойствами. Эффективным способом измельчения структурных составляющих сплавов на макро и микроуровнях являются модифицирование многокомпонентных сплавов дисперсными композициями [1,5].

Задача материаловедения заключается в создании современных высокожаропрочных сплавов со стабильной структурой, способных работать при высоких температурах и напряжениях.

### Цель

Целью данной работы является разработка технологии модифицирования никелевого сплава системы Ni-Cr-Al-Ti-Mo-W-Co дисперсными композициями, полученными на установках плазмохимического синтеза. Необходимо изучить структурные изменения в сплавах, взаимосвязь структуры со свойствами и влияние легирующих элементов на структурообразование в многокомпонентных никелевых сплавах.

**Методика исследований и результаты.** Материалом исследования служил жаропрочный никелевый сплав ЖС6К, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя (таблица 1).

Таблица 1

**Химический состав жаропрочного никелевого сплава / Chemical composition of high-temperature nickel alloy**

Марка сплава	Содержание элементов, % масс.								
	Al	Ti	Cr	Mo	W	Co	C	Mn, Si	Ni
ЖС6К	5,0-6,0	2,5-3,2	9,5-12	3,5-4,8	4,5-5,5	4,0-5,5	0,13-0,2	0,4	Осн.

Разработана технологии ввода модификатора в расплав, включающая: оптимизацию состава комплексного модификатора; определение способа ввода модификатора в расплав; установление температурно-временного режима плавки, выпуска и заливки расплава в форму.

Для ввода порошков модификатора в расплав разработана технология, состоящая из трех этапов. На первом этапе методом порошковой металлургии в аттриторе смешивали порошки никелевого сплава с порошком модификатора. На втором этапе проводили прессование порошков в стальной прессформе. Третьим этапом являлась введение порошка в жидкий расплав жаропрочного никелевого сплава [2].

Аттриторную обработку смесей порошков проводили в три этапа. На первом происходило расплющивание и размол отдельных частиц; на втором – разрушение и перестройка структуры частиц за счет холодного сваривания разнородных частиц и образования слоистой структуры; третьим этапом являлось истончение компонентов слоев и повышение внутренней однородности частиц. Теоретической основой аттриторной обработки является представление о системе шары-порошок как многокомпонентной вязкой жидкости, интенсивность перемещения компонентов которой определяется турбулентной диффузией. При вращении мешалки в движение приводится вся масса шаров, находящихся в рабочей камере. Непосредственно мешалкой приводится во вращение относительно небольшое количество шаров, остальные приводятся в движение путем эстафетной передачи импульсов от шара к шару.

С целью оптимизации макроструктуры, получения равномерной полиэдрической, мелкокристаллической структуры на лопатках было опробовано модифицирование сплава ЖС6К дисперсными композициями в таблетированном виде. Прессование производили на гидравлическом прессе в стальных прессформах [2]. Исследовали различную дозировку модификатора: 0,1 и 0,2 % масс. из учета 50%-ного усвоения расплавом.

Основой модификатора авторами предложен дисперсный модификатор-карбид титана Ti(C). Состав спрессованных таблеток: порошок Ti(C) и Ti размером менее 1 мкм; порошок Ni размером 20 мкм [3].

Таблетка комплексного модификатора, попадая в расплав, растворяется в нем и равномерно распределяется по объему расплава путем индукционного перемешивания.

Предложенная методика позволяет с минимальными потерями вводить необходимое

количество модификатора и гарантировать равномерное распределение в расплаве. Ввод модификатора осуществляли на том технологическом этапе плавки, который обеспечивает максимальный технический эффект. Температурно-временные параметры модифицирования:  $t=1650\pm 10$  °С;  $\tau=5$  минут.

Структура многокомпонентного никелевого сплава ЖС6К – гетерофазная, представляющая собой высокодисперсные частицы  $\gamma^1$ -фазы (формирующейся на основе интерметаллидного соединения  $Ni_3Al$ ), равномерно распределенные в матрице из твердого  $\gamma$ -раствора легирующих элементов в никеле. Тугоплавкие легирующие элементы (W, Mo, Cr) увеличивают область существования  $\gamma^1$  – фазы. Вследствие обеднения  $\gamma$  – фазы тугоплавкими элементами эффективность твердорастворного упрочнения уменьшается, и, как следствие, снижается сопротивление скольжению дислокаций, что в конечном счете, приводит к понижению жаропрочности. Алюминий и титан являются  $\gamma^1$  – образующими, входят в  $\gamma^1$ -твердый раствор и являются основными упрочнителями. Элементы Co, Mo, и Cr входят в  $\gamma$  – твердый раствор. Наличие W одинаково и в  $\gamma$ , и в  $\gamma^1$ -твердом растворе. Таким образом, упрочнение сложнелегированного никелевого сплава происходит за счет: упрочнения  $\gamma$  твердого раствора и наличия дисперсных фаз.

Температуру модифицирования определяли исходя из диаграмм состояния Ni-Cr и Ti-Ni [4,6].

Согласно классической теории, существует три вида модифицирования: измельчение первичных зерен при кристаллизации матричной фазы; изменение внутреннего строения зерен – дендритов; измельчение эвтектик. Применен способ модифицирования [7] за счет измельчения зерен никелевого твердого раствора, что является результатом зародышевого действия тугоплавких частиц модификатора, специально введенных в расплав. Механизм действия модификатора в расплаве заключается в том, что на поверхностях дисперсных частиц TiC происходит зарождение первичных кристаллов аустенитной  $\gamma$  – фазы.

Исследование макроструктуры сплава в исходном состоянии показало, что структура сплава крайне неоднородна по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зерен 3-5 мм. Модифицированные образцы имели однородную, мелкозернистую структуру с размером зерен до 1 мм. Таким образом, вследствие модифицирования средний размер зерна уменьшился в 3 раза.

Формирование при модифицировании упрочненного никелевого твердого раствора и более развитой зернограницной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава по сравнению с немодифицированным состоянием:  $\sigma_b$  повышен на 10 %;  $\sigma_{0,2}$  – на 11 %;  $\delta$  – в 1,1 раза; KCU резко повышена на 35 % (рис.1).

О жаростойкости сплава судили по результатам испытаний на высокотемпературную коррозию в окислительной атмосфере [8-9]. После каждой термоэкспозиции измеряли глубину межкристаллитной коррозии. Установлено, что во всех образцах имело место внутреннее окисление. Более интенсивное высокотемпературное окисление наблюдали в немодифицированном образце глубиной ~ 40 мкм по сравнению с модифицированным образцом, где глубина коррозии составила 30 мкм. Таким образом, достигнуто снижение коррозионного повреждения сплава на 25 %.

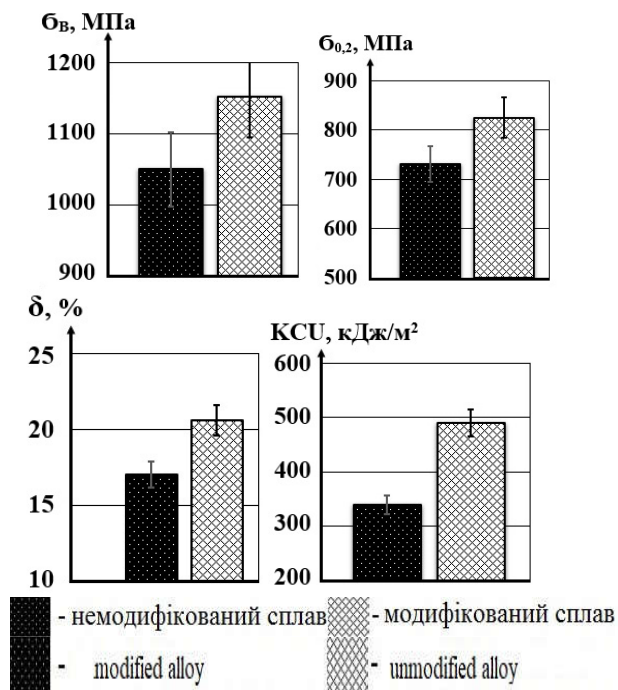


Рис. 1. Механические свойства никелевого сплава ЖС6К до и после модифицирования / Mechanical properties of nickel alloy ZhS6K before and after modification

#### Научная новизна.

Установлены закономерности влияния модифицирования расплава дисперсной тугоплавкой композицией карбида титана на повышение комплекса свойств многокомпонентного никелевого сплава.

#### Практическая ценность.

Полученные результаты использованы на машиностроительном предприятии для повышения механических и эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов для лопаток газотурбинного двигателя.

#### Выводы.

Установлено, что комплексное модифицирование жаропрочного никелевого сплава ЖС6К влияет на формирование мелкодисперсной структуры с равномерным распределением легирующих элементов.

В результате введения в расплав дисперсных частиц карбида титана достигнуто значительное измельчение зерна сплава от 3...5 мм в исходном, до 1 мм в модифицированном состоянии.

Формирование при модифицировании более развитой зернограничной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава ЖС6К. Достигнуто

повышение предела прочности  $\sigma_b$  на 10 %; предела текучести  $\sigma_{0,2}$  – на 11 %; относительного удлинения  $\delta$  в 1,1 раза; ударной вязкости КСВ на 35 %.

После испытаний на жаростойкость, глубина межкристаллической коррозии в модифицированном сплаве уменьшена в среднем на 25 %, что характеризует высокую эксплуатационную стойкость сплава.

#### Список использованных источников

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов.- М.: МИСИС, 2001. - 631 с.
2. Калинина Н. Е. Технологические особенности наномодифицирования литейных жаропрочных никелевых сплавов/ Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Т. Калинин // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. - №1(31). – С. 54-56.
3. Патент України на корисну модель № 82163, МПК С22С 19/03. Комплексний модифікатор нікелевих сплавів / Н. Є. Калініна, А. Є. Калиновська, В. Т. Калінін, З. В. Віліщук, Т. В. Носова. - № u 2013 00612 Заявл. 17.01.2013; Опубл. 25.07.2013// Бюл. №14.
4. Калинина Н. Е. Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Т. Калинин, и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. - №7(94). – С.23-26.
5. Суперсплавы: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [текст] пер. С англ. / под ред. 4. Симса. – М.: Металлургия, 1995 – Кн.1. – 384 с.
6. Диаграммы равновесия двойных металлических систем [текст] : справочник/ под ред. Лакишева Н. П. – М.: Машиностроения, 1997. – 56 с.
7. Saunders, N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni- based Superalloys [Text] / M. Saunders, M. Fahrman, S. Y. Small // In «Superalloys 2000»; eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R. D. Kissinger. – TMS, Warrendate, 2000- 803 p.
8. Bolshakov V.I. Structure and Properties of Building Materials/ V.I. Bolshakov, L.L. Dvorkin.- Switzerland: TTP, 2016.-220p.
9. Nanoparticle Technology Handbook. / Ed. M. Hosokawa, K. Nogi, M. Naito, T. Yokoyama. Elsevier. 2007.-644 p.

#### References

1. Kablov E. N. *Cast vanes of gas turbine engines* / EN E. N. Kablov.- M.: MISA, 2001. – 631p.
2. Kalinina N. E. *Technological features nanomodifitsirovaniya casting heat-resistant nickel alloys* / N. E. Kalinina, A. E. Kalynovska, V. T. Kalinin // Compressor and power engineering. - 2013. - №1 (31). - pp. 54-56.
3. *Patent of Ukraine on korisnu model number 82163, IPC S22S 19/03. Complex modifikator nikelievih splaviv* / N. E. Kalinina, A. E. Kalynovska, V.T. Kalinin, Z.V. Vilischuk, T.V. Nosova. - № u 2013 00612 stated. 17.01.2013; Publ. 25/07/2013 // Bul. №14.
4. Kalinina N.E. *Features nanomodifitsirovaniya multicomponent nickel alloys* / N.E. Kalinina, A. E. Kalynovska, V. T. Kalinin // Aerospace technics and technology. - 2012. - №7 (94). - pp. 23-26.
5. *Superalloys: Heat-resistant materials for the aerospace and industrial power plants* [text] per. With English. / Ed. 4. Sims. - M.: Metallurgy, 1995 - Book 1. - 384 p.
6. *Diagrams equilibrium binary metallic systems* [Text]: a handbook / ed. Lakisheva NP - M.: Engineering, 1997. - 56 p.
7. Saunders, N. *The Application of CALPHAD Calculations to Ni- based Superalloys* [Text] / M. Saunders, M. Fahrman, S. Y. Small // In «Superalloys 2000»; eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R. D. Kissinger. - TMS, Warrendate, 2000 - 803 p.
8. Bolshakov V.I. *Structure and Properties of Building Materials* / V.I. Bolshakov, L.L. Dvorkin.- Switzerland: TTP, 2016.-220 p.
9. Nanoparticle Technology Handbook / Ed. M. Hosokawa, K. Nogi, M. Naito, T. Yokoyama. Elsevier. 2007. - 644 p.

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Д.В. Лаухінім (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Г.Д. Сухомлінім (Україна)