

УДК 669.245

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

КАЛИНИНА Н. Е.<sup>1\*</sup>, *д.т.н., проф.*

ЮХИМЕНКО А. Е.<sup>2</sup>

КАЛИНИН В. Т.<sup>3</sup>, *д.т.н., проф.*

<sup>1\*</sup>Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 095 550 28 00, e-mail: kalinina-ne@yandex.ru

<sup>2</sup> Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 097 856 40 20, e-mail: yuane@ukr.net

<sup>3</sup> Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 743 33 02, e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**Аннотация. Цель.** Целью данной работы является исследование влияния модифицирования нанодисперсными композициями на формирование структуры и повышение свойств жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ, установлению взаимосвязи структуры сплава с механическими свойствами. **Методика.** Применены современные методы исследований: металлографический и энергодисперсионный анализы, измерение комплекса механических свойств. Все исследования проведены на стандартизованном оборудовании. **Результаты.** Установлено, что использование комплексных нанодисперсных модификаторов позволяет активно влиять на дисперсность макро- и микроструктуры, механические свойства жаропрочных никелевых сплавов. Обработка расплава жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ комплексным модификатором позволяет получить однородную мелкозернистую структуру и высокий комплекс механических свойств никелевого сплава.

**Научная новизна.** Обработка расплава разработанным комплексным модификатором способствует измельчению зерна сплава ЖСЗДК-ВИ в 6...10 раз, повышению дисперсности структурных составляющих в 3...4 раза и равномерному их распределению в объеме зерен. Это позволило повысить предел прочности сплава  $\sigma_B$  на 8...10 %, предел текучести  $\sigma_{0,2}$  – на 10...13 %, относительное удлинение  $\delta$  – на 19...21 %, ударную вязкость КСУ – на 40...44 %. Впервые установлено образование переходного слоя между упрочняющими фазами Ti(C,N) и матрицей никелевого сплава, в котором содержание W и Mo превышает их содержание в матрице. Образование переходного слоя обусловлено диффузией основных легирующих элементов и обеспечивает надежную связь упрочняющих фаз с матрицей сплава. Переходной слой препятствует диффузии титана из карбонитрида титана в матрицу, обеспечивая стабильность фаз и эффективность упрочнения сплава ЖСЗДК-ВИ при повышенных температурах. **Практическая значимость.** Разработаны температурно-временные параметры наномодифицирования сплава ЖСЗДК-ВИ: температура модифицирования составляла  $1630...1650 \pm 10^\circ\text{C}$ ; время действия модификатора в расплаве составляло 3...5 минут. На основании результатов проведенных исследований разработаны технологические рекомендации по получению модифицированного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ с повышенным комплексом механических свойств. Разработана технологическая инструкция по выплавке сплава ЖСЗДК-ВИ с применением наномодификатора.

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав; модифицирование; нанопорошок; карбонитрид титана; макро- и микроструктура; переходной слой; механические свойства

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

КАЛІНІНА Н. Є.<sup>1\*</sup>, *д.т.н., проф.*

ЮХИМЕНКО А. Є.<sup>2</sup>

КАЛІНІН В. Т.<sup>3</sup>, *д.т.н., проф.*

<sup>1\*</sup>Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 095 550 28 00, e-mail: kalinina-ne@yandex.ru

<sup>2</sup> Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 097 856 40 20, e-mail: yuane@ukr.net

<sup>3</sup> Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 743 33 02, e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**Анотація. Мета.** Метою даної роботи є дослідження впливу модифікування нанодисперсними композиціями на формування структури та підвищення властивостей жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, встановленню взаємозв'язку структури сплаву з механічними властивостями. **Методика.** Застосовані сучасні методи досліджень: металогіфічний та енергодисперсійний аналізи, вимірювання комплексу механічних властивостей. Всі дослідження проведені на стандартизованому обладнанні. **Результати.** Встановлено, що використання комплексних нанодисперсних модифікаторів

дозволяє активно впливати на дисперсність макро- і мікроструктури, механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів. Обробка розплаву жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-VI комплексним модифікатором дозволяє отримати однорідну структуру та високий комплекс механічних властивостей нікелевого сплаву. **Наукова новизна.** Обробка розплаву розробленим комплексним модифікатором сприяє подрібненню зерна сплаву ЖСЗДК-VI в 6...10 разів, підвищенню дисперсності структурних складових в 3...4 рази і рівномірному їх розподілу в об'ємі зерен. Це дозволило підвищити межу міцності сплаву  $\sigma_B$  на 8...10 %, межу текучості  $\sigma_{0,2}$  – на 10...13 %, відносне подовження  $\delta$  – на 19...21 %, ударну в'язкість KCU – на 40...44 %. Вперше встановлено утворення перехідного шару між зміцнюючими фазами Ti(C,N) і матрицею нікелевого сплаву, в якому вміст W і Mo перевищує їх вміст в матриці. Утворення перехідного шару обумовлено дифузією основних легуючих елементів і забезпечує надійний зв'язок зміцнюючих фаз з матрицею сплаву. Перехідний шар перешкоджає дифузії титану з карбонітрида титану в матрицю, забезпечуючи стабільність фаз та ефективність зміцнення сплаву ЖСЗДК-VI при підвищених температурах. **Практична значимість.** Розроблено температурно-часові параметри наномодифікування сплаву ЖСЗДК-VI: температура модифікування становила  $1630...1650 \pm 10^\circ\text{C}$ ; час дії модифікатора в розплаві складає 3...5 хвилин. На підставі результатів проведених досліджень розроблено технологічні рекомендації з отримання модифікованого нікелевого сплаву ЖСЗДК-VI з підвищеним комплексом механічних властивостей. Розроблено технологічну інструкцію з виплавки сплаву ЖСЗДК-VI із застосуванням наномодифікатора.

**Ключові слова:** жароміцний нікелевий сплав; модифікування; нанопорошок; карбонітрид титану; макро- та мікроструктура; перехідний шар; механічні властивості

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF MODIFIED HEAT-RESISTANT ALLOY

KALININA N. E.<sup>1\*</sup>, *dr. sc.(tech.), prof.*

UHIMENKO A. E.<sup>2</sup>

KALININ T. V.<sup>3</sup>, *dr. sc.(tech.), prof.*

<sup>1\*</sup> The Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk 49050, Ukraine, tel. +38 095 550 28 00, e-mail: kalinina-ne@yandex.ru

<sup>2</sup> The Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk 49050, Ukraine, tel. +38 097 856 40 20, e-mail: yuane@ukr.net

<sup>3</sup> National metallurgical academy of Ukraine, 4, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 743 33 02, e-mail: vt.kalinin@gmail.com

**Abstract. The Aim.** The aim of this work is to study the effect of modifying microdispersible composition on the structure and improving the properties of heat-resistant nickel alloy ZhS3DK-VI, networking structure of the alloy mechanical properties. **Methods.** Applying modern methods of research: metallographic and energy dispersive analysis, measurement of the mechanical properties of the complex. All studies were performed on standardized equipment. **The Results.** Found that the use of complex nano-dispersed modifiers allows you to actively influence the dispersion of macro- and microstructure, mechanical properties, heat-resistant nickel alloys. Processing molten heat-resistant nickel alloy ZhS3DK-VI complex modifier allows a uniform melkozernennuyu structure and mechanical properties of complex high nickel alloy. **Scientific novelty.** Melt Treatment developed complex modifier promotes grain refinement alloy ZhS3DK-VI 6 ... 10 times, improve dispersion of structural components in 3 ... 4 times and uniform distribution in the amount of grains. It is possible to increase the ultimate strength  $R_m$  of the alloy at 8 ... 10%, yield  $\sigma_{0,2}$  - 10 ... 13%, elongation  $\delta$  - 19 ... 21%, the toughness KCU - 40 ... 44%. First established between the formation of the transition layer of reinforcing phases Ti (C, N) and a matrix of a nickel alloy, wherein the content of W and Mo contents exceed their matrix. Education of the transition layer due to the diffusion of the main alloying elements and provides a reliable connection with hardening phases of the alloy matrix. Transition layer prevents diffusion of titanium in the titanium carbonitride matrix to provide phase stability and efficiency of work hardening alloy ZhS3DK-VI at elevated temperatures. **The practical significance.** Developed temperature-time parameters nanomodifitsirovaniya ZhS3DK-VI alloy temperature modification was in  $1630 ... 1650 \pm 10^\circ\text{C}$ ; duration modifier in the melt is 3 ... 5 minutes. Based on the results of the research developed technological advice on the preparation of modified nickel alloy ZhS3DK-VI with Enhanced mechanical properties. The technological instruction melting alloy ZhS3DK-VI using nanomodifier.

**Keywords:** heat-resistant nickel alloy; modification; nanopowder; titanium carbonitride; macro- and microstructure; transition layer; mechanical properties

### Актуальность проблемы

Повышение качества и эксплуатационных свойств изделий авиационной техники может быть успешно решено при разработке новых и усовершенствовании существующих материалов. Литейные жаропрочные никелевые сплавы применяют для изготовления деталей авиационных двигателей, к которым

предъявляют требования: высокая плотность и герметичность, отсутствие пористости, стабильность размеров, высокий комплекс физико-механических свойств, жаропрочность, жаростойкость и долговечность [1]. При разработке жаропрочных никелевых сплавов с заданными свойствами, важным этапом является процесс обработки расплавов, поскольку технология изготовления влияет на конечную структуру отливок. На стадии обработки

расплавов наиболее эффективно использование операции модифицирования. В настоящее время для модифицирования никелевых сплавов применяют чистые металлы: цирконий, титан, иттрий, а также тугоплавкие композиции, в том числе наноразмерного диапазона, на основе карбидов, нитридов, боридов и карбонитридов [6, 14]. В основе процесса модифицирования первичного зерна  $\gamma$ -никелевой матрицы лежит зародышевый механизм. В результате модифицирования в никелевом расплаве возникают дополнительные центры кристаллизации, которыми служат наночастицы тугоплавких соединений, специально введенные в расплав [2]. Кристаллизация из многих центров, искусственно созданных в расплаве, способствует получению мелкозернистой равномерной структуры литого металла.

#### Постановка задачи

Экстремальные условия работы лопаток авиационных газотурбинных двигателей нового поколения требуют применения перспективных материалов с принципиально новой структурой и свойствами, отличными от традиционных материалов [4, 5]. Задачей данной работы является создание в жаропрочном никелевом сплаве стабильной структуры с повышенными прочностными характеристиками для надежной эксплуатации при высоких температурах и напряжениях. Для достижения указанной задачи никелевый расплав обрабатывали комплексным наномодификатором разработанного состава [11].

#### Материалы и методика экспериментального исследования

Никелевые сплавы типа ЖС: ЖСЗДК-ВИ, ЖСЗ, ЖС6У, ЖС6К, ЖС26, ЖС32 используются для изготовления деталей двигателей, которые выпускаются в настоящее время на ведущих предприятиях Украины [3]. Материалом исследования служил литейный жаропрочный никелевый сплав типа ЖС, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя [12]. Распределение легирующих и модифицирующих элементов в структурных составляющих сплавов определяли методом микрорентгеноспектрального анализа на многоцелевом растровом микроскопе JSM-6360LA.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Механизм действия модификаторов в никелевом расплаве заключается в зарождении многочисленных первичных кристаллов матричной фазы на поверхностях вводимых наночастиц [8]. Не всякая инородная частица, созданная в расплаве, может служить центром кристаллизации при затвердевании никелевого сплава. Зародышем может служить частица, имеющая некоторый критический размер и обладающая определенным структурным, размерным

и кристаллографическим сходством с кристаллизующимся на ней веществом [13]. Титан и соединения на его основе являются эффективными модификаторами [10].

В качестве основы для модифицирующего комплекса были рассмотрены соединения титана – металлоподобные тугоплавкие соединения – химические соединения титана с неметаллами – углеродом и азотом: карбиды, нитриды и карбонитриды. Карбонитрид титана имеет кубическую решетку и высокую температуру плавления. Основным компонентом комплексного модификатора сплава ЖСЗДК-ВИ выбран нанопорошок карбонитрида титана  $Ti(C,N)$ , полученный методом плазмохимического синтеза [9]. Наночастицы  $Ti(C,N)$  размером 50...100 нм служили мельчайшими центрами кристаллизации в расплаве никелевого сплава, способствовали объемной кристаллизации отливки [7].

Для определения влияния наномодифицирования, исследовали структуру сплава ЖСЗДК-ВИ в исходном и модифицированном состояниях. Микроструктура, приведенная на рис. 1а, состоит из зерен  $\gamma$ -фазы неправильной формы с множеством крупных включений, что негативно сказывается на прочностных характеристиках сплава. В немодифицированных образцах присутствуют крупные включения, расположенные по границам зерен. В модифицированных образцах включения значительно дисперснее (рис. 1б) и располагаются как по границам зерен, так и внутризеренно.

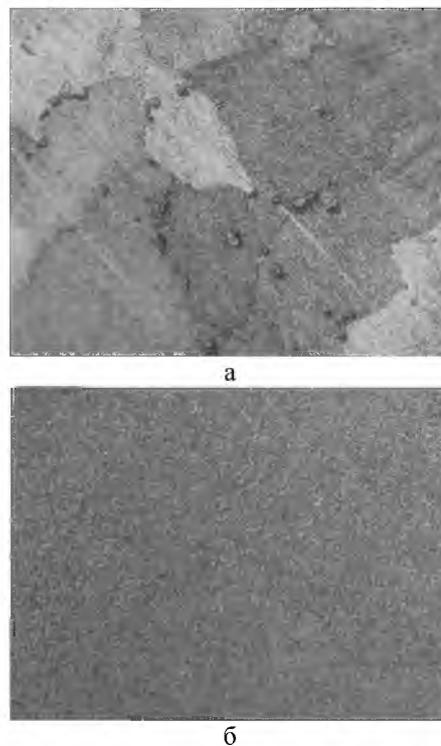


Рис. 1. Микроструктура немодифицированного (а) и модифицированного (б) никелевого сплава,  $\times 500$  / The microstructure of the unmodified (a) and modified (b) nickel alloy  $\times 500$

В немодифицированном металле обнаружены крупные включения на стыке границ зерен, которые могут служить концентраторами напряжений и очагами развития трещин при эксплуатации. Изучение морфологии фаз показало наличие включений различных форм от многогранников до пластин длиной 6...14 мкм, а также включений квадратной формы размером 4...6 мкм.

При изучении микроструктуры модифицированного сплава было установлено, что все включения, присутствующие в сплаве, равномерно распределены по всему объему образца, не образуя скоплений и групп. Образование карбидов и карбонитридов наблюдается в основном внутри зерен. Все включения практически одного размера 1...5 мкм (рис. 1б). Таким образом, в результате модифицирования достигнуто измельчение структурных составляющих сплава в 3...4 раза.

Исследование макроструктуры лопаток никелевого сплава до модифицирования показало крайнюю неоднородность по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зерен 6...10 мм. Образцы из модифицированных лопаток характеризовались однородной, мелкозернистой структурой с размером зерен до 1 мм. Таким образом, в результате модифицирования средний размер зерна уменьшился в 6...10 раз.

Формирование при модифицировании упрочненного никелевого твердого раствора и более развитой зернограничной структуры привело к повышению комплекса механических свойств модифицированного сплава. Достигнуто значительное повышение прочностных и пластических свойств сплава ЖСЗДК-ВИ:  $\sigma_B$  повышен на 8...10 %;  $\sigma_{0,2}$  – на 10...13 %;  $\delta$  – на 19...21 %, КСУ – на 40...44 %.

В структуре модифицированного сплава обнаружено множество аналогичных комплексных включений (рис. 2). Микрорентгеноспектральным анализом образцов модифицированного сплава ЖСЗДК-ВИ установлено, что в центральной части включений повышено содержание титана, присутствует азот и углерод; содержание никеля понижено.

Проведенными исследованиями доказано, что включение, приведенное на рис. 2 – карбонитрид титана  $Ti(C,N)$ . В исследуемой точке 22 повышено содержание углерода, азота и титана. Вокруг всех включений карбонитрида титана установлено образование переходного слоя толщиной 0,2...1 мкм. Содержание вольфрама и молибдена – основных легирующих элементов сплава в переходном слое повышено по сравнению с матрицей. Поэтому можно сделать вывод, что Mo и W в переходном слое препятствуют диффузии титана из карбонитрида титана в матрицу, обеспечивая высокую стабильность частиц и эффективность упрочнения сплава при рабочих температурах. Образование

переходного слоя обеспечивает надежную связь упрочняющих фаз с матрицей сплава.

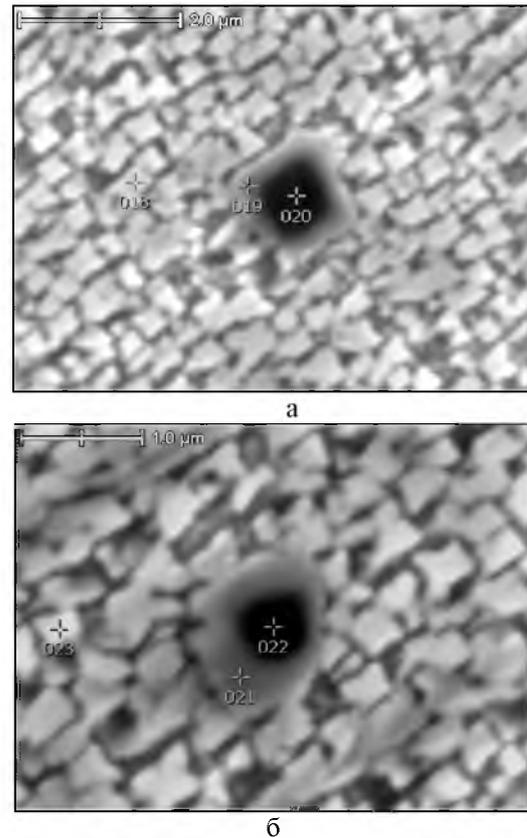


Рис. 2. Комплексные включения в модифицированном никелевом сплаве ЖСЗДК-ВИ: а –  $\times 20000$ , б –  $\times 30000$  / Complex inclusion in a modified nickel alloy ZhS3DK-VI: and -  $\times 20000$ , b -  $\times 30000$

### Выводы

Для достижения стабильности структуры и повышения свойств жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК проведена обработка расплава комплексным наномодификатором на основе карбонитрида титана  $Ti(C,N)$ . Порошок карбонитрида титана получен методом плазмохимического синтеза, размер частиц составлял 50...100 нм.

В модифицированном никелевом сплаве достигнуто резкое измельчение зерна – в 6...10 раз. В результате модифицирования получена однородная структура с дисперсными включениями упрочняющих фаз как по границам, так и внутри зерен.

Достигнуто повышение комплекса механических и пластических свойств модифицированного сплава ЖСЗДК-ВИ:  $\sigma_B$  – на 8...10 %;  $\sigma_{0,2}$  – на 10...13 %;  $\delta$  – на 19...21 %, КСУ – на 40...44 %.

Установлено образование переходного слоя между матрицей никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ и частицами карбонитрида титана, которые препятствуют диффузии титана из карбонитрида титана в матрицу, обеспечивая высокую стабильность частиц и эффективность упрочнения сплава при высоких температурах.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
/ REFERENCES**

1. Авиационно-космические материалы и технологии / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 383 с.

Aviacionno-kosmicheskie materialy i tehnologii / V.A. Boguslaev, A.Ja. Kachan, N.E. Kalinina i dr. – Zaporozh'e: ОАО «Motor Sich», 2007. – 383 s.

2. Большаков В.И. Структурная теория упрочнения конструкционных сталей и других материалов: монография / В.И. Большаков. – Д.: Изд-во «Свидлер А.Л.», 2010. – 484 с.

Bol'shakov V.I. Strukturnaja teorija uprochnenija konstrukcionnyh stalej i drugih materialov: monografija / V.I. Bol'shakov. – D.: Izd-vo «Svidler A.L.», 2010. – 484 s.

3. Влияние тантала на структуру и прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС / А.Д. Коваль, А.Г. Андриенко, С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – № 2. – 2011. – С. 42-46.

Vlijanie tantala na strukturu i prochnostnye harakteristiki litejnogo zharoprochnogo korrozionnostojkogo nikelovogo splava ZhS3LS / A.D. Koval', A.G. Andrienko, S.V. Gajduk, V.V. Kononov // Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. – № 2. – 2011. – S. 42-46.

4. Каблов Е.Н. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932 – 2007. Юбилейный научно-технический сборник; под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2007. – 438 с.

Kablov E.N. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932 – 2007. Jubilejnyj nauchno-tehnicheskij sbornik; pod obshh. red. akad. RAN E.N. Kablova. – M.: VIAM, 2007. – 438 s.

5. Каблов Е.Н. Литье лопатки газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов. – М.: МИСИС, 2001. – 631 с.

Kablov E.N. Litye lopatki gazoturbinyh dvigatelej / E. N. Kablov. – M.: MISIS, 2001. – 631 s.

6. Неорганическое материаловедение в двух томах. Энциклопедическое издание. Материалы и технологии. – Том 2, книга 1 / Под ред. Г.Г. Гнесина, В.В. Скорохода. – Киев: Наукова думка, 2008. – 854 с.

Neorganichesкое materialovedenie v dvuh tomah. Jenciklopedicheskoe izdanie. Materialy i tehnologii. – Tom 2, kniga 1 / Pod red. G.G. Gnesina, V.V. Skorohoda. – Kiev: Naukova dumka, 2008. – 854 s.

7. Отримання нанодисперсних сполук методом плазмохімічного синтезу / Н.Є. Калініна, А.Є. Калиновська, В.Т. Калінін та ін. // Сучасні проблеми фізики конденсованого стану. Праці III Міжнародної конференції. – Київ. – 2012. – С. 205-206.

Otrymannya nanodispersnykh spolum metodom plazmohimichnoho syntezy / N.Ye. Kalinina, A.Ye. Kalynov'ska, V.T. Kalinin ta in. // Suchasni problemy fizyky kondensovanoho stanu. Pratsi III Mizhnarodnoyi konferentsiyi. – Kyiv. – 2012. – S. 205-206.

8. Панкратов А.С. Модифицирование наноразмерными частицами карбида вольфрама / А.С. Панкратов, А.А. Линник, Н.В. Коберник // Материалы VII конференции «Сварка и родственные технологии». – Киев, 2013. – С. 51.

Pankratov A.S. Modificirovanie nanorazmernymi chasticami karbida vol'frama / A.S. Pankratov, A.A. Linnik, N.V. Kobernik // Materialy VII konferencii «Svarka i rodstvennye tehnologii». – Kiev, 2013. – S. 51.

9. Патент України № 82163, МПК С22С 19/03 Комплексний наномодифікатор 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 с.

Patent Ukrayiny # 82163, MPK S22S 19/03 Kompleksnyy nanomodyfikator nikelovykh splaviv / N.Ye. Kalinina, A.Ye. Kalynov'ska, V.T. Kalinin, Z.V. Vilishchuk, T.V. Nosova. – # u 2013 00612; zayavl. 17.01.2013; opubl. 25.07.2013, Byul. # 14. – 4 s.

10. Симс Ч. Жаропрочные стали и сплавы: пер. с англ./ Ч.Симс, В.Хагель. - М.: Металлургия,1976 – 566 с.

Sims Ch. Zharoprochnye stali i splavy: per. s angl./ Ch.Cims, V.Hagel'. - M.: Metallurgija,1976 – 566 s.

11. Структурные изменения в жаропрочных никелевых сплавах при наномодифицировании / Н.Е. Калинина, А.Е. Калиновская, В.Т. Калинин, А.Ю. Борисенко // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. – Вып. 67. – Дн-вск, ПГАСА. – 2013. – С. 91-95.

Strukturnye izmeneniya v zharoprochnykh nikelovykh splavah pri nanomodificirovanii / N.E. Kalinina, A.E. Kalinovskaja, V.T. Kalinin, A.Ju. Borisenko // Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauch. trudov. – Vyp. 67. – Dn-vsk, PGASA. – 2013. – S. 91-95.

12. Beisheim J.R., Sinclair G.B. On the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dovetail Attachments // Journal of Turbomachinery. – 2003. – Vol. 125, No 2. – P. 373-379.

13. Goldstein J. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Third edition / J. Goldstein, D. Newbury, D. Joy et al. – Dordrecht: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2003. – 586 p.

14. Radek N. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam / N. Radek, K. Bartkowiak // Physics Procedia (Elsevier), N 5, 2010. – p. 417-423.

*Статья рекомендована к публикации д-ром.техн.наук, проф. В. Е. Хрычиковым (Украина)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 23.01.2015