

М. В. ГРЕКОВА¹, Н. Є. КАЛІНІНА², В. Т. КАЛІНІН³,
Є. О. ДЖУР², О. В. БОНДАРЕНКО²

¹ ДП «КБ «Південне», Дніпро, Україна

² Дніпровський національний університет ім. О. Гончара «ДНУ», Дніпро

³ Національна металургійна академія України «НМетАУ», Дніпро

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ НАНОКОМПОЗИЦІЯМИ ЛИВАРНИХ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ ДЛЯ АвіАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Вивчені існуючі аспекти модифікування багатокомпонентних сплавів. Проведено аналітичний огляд існуючих представлень з проблеми підвищення корозійної стійкості жаростійких нікелевих сплавів групи ЖС. Проаналізовано вплив легуючих елементів на структурні перетворення, види зміцнення і корозійну стійкість. Встановлено критерії щодо фізичних властивостей модифікаторів нікелевих сплавів: величина іонізаційного потенціалу, нерозчинність у розплаві, інтервал кристалізації за діаграмою стану. Проаналізовано модифікування розплавів модифікаторами на основі чистих перехідних металів та РЗМ. Проведена експериментальна робота з виплавки жаростійкого нікелевого сплаву ЖС6К у промисловому машинобудівному виробництві. Розроблено схему раціонального технологічного процесу виплавки з використанням порошкового модифікатора у таблетованому вигляді. Особливу увагу приділяли підготовці шихтових матеріалів та їх очищенню. Форми для відливання отримували за серійною технологією цеху машинобудівного підприємства. Моделі відливок виготовляли у спеціальних прес-формах. Моделюну масу виплавляли згідно технологічного процесу, а форму прожарювали при температурі 950...1050°C. Виплавку сплаву і заливку форм робили у вакуумі із залишковим тиском 0,13...6,66 Па, змінювали залишковий тиск під час розкислювання до 13 Па. Рівномірність розподілу модифікатора в об'ємі розплаву забезпечували індукційним перемішуванням в тиглі. Для обробки нікелевих розплавів запропоновано комплексний порошковий модифікатор на основі карбіду титану Ti (C) у таблетованому вигляді. Досліджена структура нікелевого сплаву ЖС6К. Встановлені закономірності впливу модифікування дисперсною тугоплавкою композицією карбіду титану на підвищення комплексу властивостей багатокомпонентного нікелевого сплаву. Досягнуте значне подрібнення зерна сплаву в результаті модифікування, що зумовило підвищення міцнісних властивостей до 10 % і ударної в'язкості на 35 %. Підвищена корозійна стійкість сплаву ЖС6К в окислювальному середовищі, глибина корозії при температурі 1000° зменшилася на 25 % в порівнянні з немодифікованим сплавом.

Ключові слова: жаростійкі сплави; модифікатор; структура; властивості; лопатки ГТД.

Вступ

Починаючи з піонерських робіт Глейтера [1, 2], інтерес до наноструктурних матеріалів у різних галузях техніки неухильно зростає. У авіаційній і ракетно-космічній техніці застосування нового класу матеріалів - наноматеріалів обґрунтовано їх унікальними властивостями: поєднанням високих міцнісних і пластичних характеристик, технологічності, корозійної стійкості, стабілізації розмірів і дисперсної структури. Ці показники важливі для багатокомпонентних сплавів на основі нікелю які застосовують для виготовлення деталей авіаційних та ракетних двигунів [1].

Теоретична частина

Підвищення якості і властивостей газотурбінних двигунів (ГТД) відповідального призначення не

може бути вирішене без розробки нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів виробництва сплавів. До відливок ливарних сплавів, що входять до складу ГТД, турбонасосних агрегатів, насосів палива пред'являють вимоги, що поєднують герметичність, низьку пористість, високий комплекс механічних властивостей. При отриманні ливарних сплавів важливим етапом є процес плавки і обробки розплавів. Саме на цих стадіях ефективно використовуються операції модифікування [2].

Розвиток сучасних технологій вимагає створення нових матеріалів і удосконалення існуючих сплавів. Одним з ефективних способів підвищення якості виливків, подрібнення зерна і отримання однорідної структури є модифікування [3].

Перспективним напрямом при модифікуванні є використання дисперсних тугоплавких модифікаторів: карбідів, нітридів, боридів, чистих металів з розміром часток менш 0,1 мкм [2]. При модифіку-

ванні ливарних сплавів дисперсними частками карбїду титану розміром до 1 мкм відмічене підвищення корозійної стійкості, технологічних і механічних властивостей сплавів [3].

Теоретичні основи модифікування полягають в основоположних роботах В. Е. Неймарка, М. В. Мальцева [3, 8]. Нині існує декілька теорій модифікування, вони пояснюють певні сторони процесу модифікування ливарних сплавів, але не характеризують його повністю. Це обумовлено складністю процесу та його залежністю від умов плавки і лиття, а також впливом деяких неконтрольованих домішок і взаємодією компонентів, що вводяться, які можуть як посилювати, так і послабляти дію модифікаторів.

Усі речовини, що мають меншу електронегативність і менший ефективний іонізаційний потенціал U_{Me} , чим металева основа сплаву, матимуть модифікуючий вплив на процес кристалізації [1-3].

Матеріали, що мають більше значення U_{Me} , металевої основи сплаву, матимуть негативну дію. Це відбувається тому, що чим нижче значення іонізаційного потенціалу. Тим легше елемент віддає свої валентні електрони матриці і навпаки. Чинник, який характеризує здатність речовини впливати на процес кристалізації, слід розглядати як чинник розчинності домішок в матриці. Модифікатор повинен розташовуватися на межі кристалів і кластерів, але не входить до складу матричного сплаву [4].

Модифікатор не повинен утворювати свої власні кластери. Елемент, що має властивості модифікатора, повинен мати низьку розчинність в твердому стані і обмежену в рідкому. На основі зміни коефіцієнтів зміни активності різних елементів найбільш потужними модифікаторами ливарних сплавів є: Ge, La, Sr, Ti та їх сполук. Вивчений вплив перехідних металів: Hf, Ta, Ti, V, Nb, Zr на властивості ливарних сплавів. Встановлено, що елемент є ефективним модифікатором, якщо на діаграмі стану він має найбільше значення інтервалу кристалізації.

У теперішній час опублікована достатня кількість наукових робіт, присвячених модифікуванню дисперсними частками тугоплавких сполук. У дисперсійних системах відображуються особливості стану поверхні, оскільки доля поверхневих атомів в дисперсних частках є переважаючою. В зв'язку з викладеним, тематика представленої роботи є актуальною для отримання якісних відливок ту машинобудуванні [4, 5].

Експериментальна частина

Підготовку шихти для виплавки проводили по технологічній інструкції ДП "ПО ПМЗ ім. О. М. Макарова" № 0-428-66. Шихтові матеріали зважували з точністю до 100 г, а бій електродів гра-

фітованих – до 10 г. В якості шихти для відливок використали заготовки із сплаву ХН59МВТКЮЛ відкритої індукційної виплавки із застосуванням непрямої термочасової обробки у вакуумно-індукційній печі. В якості шихти застосовували 100% мірної заготовки, отриманої у вакуумі; допускалася підшихтовка легуючих елементів (завертали в алюмінієву фольгу А5-М-0 по ГОСТ 618-73), що входять до складу сплаву. Підшихтовка дозволяється алюмінію і вуглецю на утримування їх вмісту 4,65 % і 0,11 % відповідно. Отримання мірної заготовки проводили розпилом шихти у вакуумі і фільтрації через чотирьох шарову кварцову сітку КС-11-ЛА (240) по ТУ 6-11-318-78.

Усі шихтові матеріали для виплавки сплаву ЖС6К мали сертифікат і протокол хімічного аналізу. Підготовка шихтових матеріалів : прокат, ливники, що не мають зовнішньої рихлості, були очищені від забруднень (іржі, олії, фарби і сторонніх включень) в піскоструминному апараті безпосередньо перед поданням шихти на плавку електрокорундом марки 12АР зернистістю 50-Н ГОСТ 3647-80 [6 - 8]. По габаритах шихтові матеріали відповідні для печі ІСВ-006 тигля місткістю до 90 кг. Очищення відливок готового сплаву ЖС6К робили у барабані ОБ-900 або 44-24-0805 із застосуванням зірочок Ц76-18-231. Для виплавки нікелевого сплаву ЖС6К використали шихтові матеріали, що відповідають технічним умовам підприємства та Держстандартам.

В якості шихти для відливок із сплаву ЖС6К застосовували мірну заготовку, виплавлену у вакуумній печі з наступних складових: чушок готового сплаву ХН59МВТКЮЛ – 25,30 %; вакуумного повеннення сплаву ХН59МВТКЮЛ – до 55 %; некондиційних відходів сплаву ХН59МВТКЮЛ промислового виробництва – до 20 %.

Форми для відливання отримували за серійною технологією ливарного цеху ДП "ПО ПМЗ ім. О. М. Макарова" багатократним покриттям модельних блоків пилоподібним або зернистим (0,25 мкм) вогнетривким матеріалом (кварцем, корундом). Нанесення вогнетривкого матеріалу здійснюється після занурення блоків в ємність з єднальним складом – колоїдний розчин двоокису кремнію. Кожне чергове покриття піддавали сушці.

Моделі відливок виготовляли в металевих або епоксипластових прес-формах шляхом заливки або запресовки шприцом легкоплавких або легкорозчинних модельних складів. Після остаточного нанесення покриття модельну масу виплавляли, а форму прожарювали при температурі 950...1050°C. Основні операції технологічного процесу отримання нікелевого сплаву приведені на рисунку 1 [8].

На плавильно-заливальної установці УППФ-3М шихту розплавляли і нагрівали в основ-

ному тиглі електрокорунда до температури $1630...1650 \pm 10$ °С. Виплавку сплаву і заливку форм робили у вакуумі із залишковим тиском $0,13...6,66$ Па, змінювали залишковий тиск під час розкислювання до 13 Па.

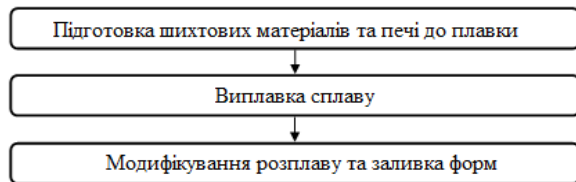


Рис. 1. Схема технологічного процесу отримання нікелевого сплаву, обробленого модифікатором, ТІ № 102.25210.00138

Рівномірність розподілу модифікатора в об'ємі розплаву забезпечували індукційним перемішуванням в тиглі. При залишковому тиску в печі $0,665$ Па і температурі 1590 ± 10 °С метал заливали в нагріті до 800 °С керамічні форми електрокорундів для отримання лопаток і пальчикових зразків для проведення механічних випробувань на ударну в'язкість і пластичність. У розплав за $3...5$ хвилин до зливу вводили через завантажувальний пристрій таблетований комплексний модифікатор на основі карбиду титану. Використали пігулки, завернуті у нікелеву фольгу ЗИ435 (Cr – 20 %, Ni – 80 %), рисунок 2.



Рис. 2. Модифікатор у таблетованому вигляді

Відливки піддавали наступним операціям: рентгівське просвічування; контроль профілю на місці заварки; контроль профілю методом кольорової дефектоскопії; термічна обробка.

Структура металу литих заготовок з жароміцних сплавів відрізняється значною ліквідаційною неоднорідністю через їх складного фазового складу. У зв'язку з цим в технологічному циклі виготовлення лопаток обов'язкова операція термічної обробки литих заготовок, яка сприяє вирівнюванню хімічного складу сплаву за об'ємом відливання. Термічну

обробку сплавів проводили в печі типу "Ipsen" "SECO/WARWICK 10.0VPT-4035/36HV". Термічна обробка характеризується високотемпературним гомогенізуючим відпалом, при якому відбувається не лише розчинення зміцнюючої γ' - фази, але і практично повне розчинення її нерівноважних евтектичних виділень, а також зменшення дендритної ліквідаційної неоднорідності. Стандартний режим термічної обробки: нагрівання до 1210 ± 10 °С, витримка 4 години, охолодження на повітрі.

Люмінесцентний контроль. Готові лопатки піддавали люмінесцентному контролю. Це – капілярний метод неруйнівного контролю якості, призначений для виявлення поверхневих дефектів.

Контроль здійснювали в наступній послідовності: поверхню змочували спеціальною рідиною (індикаторний пенетрант), яка під дією капілярних сил заповнює мікропорожнини дефектів, що виходять на поверхню, потім проявляли той, що входить до її складу люмінатор або барвник, застосовуючи речовини або ультрафіолетове освітлення. Цей метод забезпечує виявлення поверхневих дефектів з розкриттям до 1 мкм і протяжністю порівнянню з величиною зерен сплаву. Допустимі дефекти для лопаток і зразків обумовлені у вимогах АО «Мотор Січ» 18Т ТУ-55. Очищення поверхні від залишків пенетранта робили змиванням теплим ($40-50$ °С) водним розчином кальцінованої соди до забарвленого або світлого фону поверхні. Технологія люмінесцентного контролю поверхневих дефектів включала операції: підготовка дефектоскопічних складів і перевірка їх якості; підготовка деталей до контролю, їх очищення і знежирення; нанесення на контрольовану поверхню пенетранта; видалення пенетранта з нешкодкованої поверхні виробу (занурення в розчин, змивши водою, протирання, сушка); нанесення проявників пенетранта і витримка для прояву пенетранта на поверхні дефектів; виявлення дефектів при спостереженні поверхні в темряві, в ультрафіолетовому або видимому світлі; розмітка дефектів і розбуркування контрольованих об'єктів.

Радіологічний контроль. Лопатки із сплаву ЖС6К проходили радіологічний контроль за інструкцією I 7541318.82.0081 для виявлення внутрішніх дефектів по контрольній рентгенограмі. Ротор контролювали після остаточної механічної обробки рентгенографічним методом по ОСТ 92-1535-76 [1, 7].

Висновки

1. Проаналізований вплив легувальних елементів жароміцних нікелевих сплавів на структуру, зміцнення та корозійну тривкість.
2. Для обробки нікелевих розплавів запропоновано комплексний модифікатор на основі карбиду

титану у таблетованому вигляді.

3. Встановлені закономірності впливу модифікування дисперсною тугоплавкою композицією карбиду титану на підвищення комплексу властивостей багатокомпонентного нікелевого сплаву ЖС6К.

4. Досягнуте значне подібнення зерна сплаву в результаті модифікування, що зумовило підвищення міцнісних властивостей до 10 % і ударної в'язкості на 35 %.

5. Підвищена корозійна стійкість сплаву ЖС6К в окислювальному середовищі, глибина корозії при температурі 1000° зменшилася в середньому на 25 %, що підвищує ефективність обробки сплавів нанодисперсними матеріалами.

Література

1. Комплексний наномодифікатор нікелевих сплавів [Текст] : пат. 82163 Укр. : МПК C22C 19/03 / Н. Е. Калинина и др. – и 201300612. 2013.

2. Большаков, В. І. Наноматеріали і нанотехнології [Текст] / В. І. Большаков, В. З. Куцова, Т. В. Котова. – Дніпро : ПДАБА, 2016. – 220 с.

3. Мальцев, М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов [Текст] / М. В. Мальцев. – М. : Металлургия, 1970. – 368 с.

4. Barsoum, W. *Max-Phases: Properties of Machinable tertiary Carbides and Nitrides [Text]* / W. Barsoum. – Weinheim, Germany : John Willey and sons, 2013. – 126 p.

5. Получение нанодисперсных модификаторов для обработки жаростойких сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, О. А. Кавац, В. Т. Калинин и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8 (44). – С. 41–43.

6. Young-Dong, K. *The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys [Text]* / K. Young-Dong, L. Zin-Hyoung // *Mater. Sci. and Eng.* – 2003. – № 1–2. – P. 372–376.

7. Каблов, Е. Н. *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) [Текст]* / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.

8. Мальцев, П. П. *Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника: мировые достижения за 2005 год [Текст]* / П. П. Мальцев. – М. : Техносфера, 2006. – 152 с.

References

1. Kalynyna, N. E. *Kompleksnyy nanomodyfikator nikelevykh splaviv [Complex nanomodifier for nickel alloys]*. Patent Ukr, № 82163. 2013.

2. Bol'shakov, V. I., Kutsova, V. Z., Kotova, T. V. *Nanomaterialy i nanotekhnolohiyi [Nanomaterials and nanotechnologies]*. Dnipro, PDABA Publ., 2016. 220 p.

3. Mal'tsev, M. V. *Metallohrafyya promyshlennykh tsvetnykh metallov y splavov [Metallography of industrial non-ferrous metals and alloys]*. Moscow, Metallurhiya Publ., 1970. 368 p.

4. Barsoum, W. *Max-Phases: Properties of Machinable tertiary Carbides and Nitrides*. Weinheim, Germany, John Willey and sons Publ., 2013. 126 p.

5. Kalynyna, N. E., Kavats, O. A., Kalynyn, V. T., Beloyartseva, V. P. *Poluchenye nanodysper-snykh modyfykatorov dlya obrabotky zharostoykykh splavov [Obtaining nanodispersed modifiers for pro-cessing heat-resistant alloys]*. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2007, no. 8 (44), pp. 41–43.

6. Young-Dong, K., Zin-Hyoung, L. *The effect of grain refining and ox-ide inclusion on the fluidity of Al-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys*. *Mater. Sci. and Eng.*, no. 1–2, 2003, pp. 372–376.

7. Kablov, E. N. *Lytye lopatky hazoturbynykh dvyhateley (splavy, tekhnolohyya, pokrytyya) [Cast blades of gas turbine engines (alloys, technologies, coatings)]*. Moscow, MYSYS Publ., 2001. 632 p.

8. Mal'tsev, P. P. *Nanomaterialy. Nanotekhnolohyy. Nanosystemnaya tekhnika: myrovye dostyzenyya za 2005 hod [Nanomaterials. Nanotechnologies. Nanosystem engineering: world achievements for 2005]*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 152 p.

Поступила в редакцию 6.06.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ НАНОКОМПОЗИЦИЯМИ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРСТОЙКИХ СПЛАВОВ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М. В. Грекова, Н. Е. Калинина, В. Т. Калинин, Е. А. Джур, О. В. Бондаренко

Изучены существующие аспекты модифицирования многокомпонентных сплавов. Проведен аналитический обзор существующих представлений о проблеме повышения коррозионной стойкости жаростойких никелевых сплавов группы ЖС. Проанализировано влияние легирующих элементов на структурные превращения, виды упрочнения и коррозионную стойкость. Установлены критерии в отношении физических свойств модификаторов никелевых сплавов: величина ионизационного потенциала, нерастворимость в расплаве, интервал кристаллизации по диаграмме состояния. Проанализировано модифицирование расплавов модификаторами на основе чистых переходных металлов и РЗМ. Проведена экспериментальная работа по выплавке жаростойкого никелевого сплава ЖС6К на промышленном машиностроительном производстве. Разработана схема рационального технологического процесса выплавки с использованием порошкового модификатора в таблетированной форме. Особое внимание уделяли подготовке шихтовых материалов и их очистке. Формы для отливки получали по серийной технологии цеха машиностроительного предприятия.

Модели отливок изготавливали в специальных пресс-формах. Модельную массу выплавляли по технологическому процессу, а форму прожаривали при температуре 950 ... 1050 °С. Выплавку сплава и заливку форм делали в вакууме с остаточным давлением 0,13 ... 6,66 Па, меняли остаточное давление вовремя раскисления до 13 Па. Равномерность распределения модификатора в объеме расплава обеспечивали индукционным перемешиванием в тигле. Для обработки никелевых расплавов предложен комплексный порошковый модификатор на основе карбонитрида титана Ti (CN) в таблетированном виде. Исследована макро- и микроструктура никелевого сплава ЖС6К. Установлены закономерности влияния модифицирования дисперсной тугоплавкой композицией карбонитрида титана на повышение комплекса свойств многокомпонентного никелевого сплава. Достигнуто значительное измельчение зерна сплава в результате модифицирования, что обусловило повышение прочностных свойств до 10 % и ударной вязкости до 35 %. Повышена коррозионная стойкость сплава ЖС6К в окислительной среде, глубина коррозии при температуре 1000° уменьшилась на 25 % по сравнению с немодифицированным состоянием.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы; модификатор; структура; свойства; лопатки ГТД.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF PROCESSING NANOCOMPOSITIONS OF CASTING HEAT-RESISTANT ALLOYS FOR AVIATION ENGINES

M. V. Grekova, N. E. Kalinina, T. V. Kalinin, Y. O. Djur, O. V. Bondarenko

It is studied the existing aspects of the modification of multicomponent alloys. It is carried out the analytical review of existing ideas about the problem of increasing the corrosion resistance of heat-resistant nickel alloys of the JS group. It is analyzed the influence of alloying elements on structural transformations, types of hardening and corrosion resistance. It is determined criteria for the physical properties of modifiers of nickel alloys: the magnitude of the ionization potential, insolubility in the melt, the crystallization interval according to the state diagram. It is analyzed the modification of melts with modifiers based on pure transition metals and rare-earth metals. Experimental work was carried out on the smelting of heat-resistant nickel alloy ZS6K in the industrial engineering production. A scheme has been developed for a rational technological smelting process using powder modifier in tablet form. Particular attention was paid to the preparation of charge materials and their cleaning. Casting molds were obtained by serial technology of the workshop of a machine-building enterprise. Models of castings were made in special molds. The model mass was smelted by the technological process, and the form was roasted at a temperature of 950 ... 1050 °С. The alloy was smelted and the forms were cast in a vacuum with a residual pressure of 0.13 ... 6.66 Pa, the residual pressure was changed during deoxidation to 13 Pa. The uniform distribution of the modifier in the melt volume was provided by induction stirring in the crucible. It is proposed a complex powder modifier based on titanium carbonitride Ti (CN) in tablet form for the treatment of nickel melts. It was studied the macro and microstructure of the ZS6K nickel alloy. The regularities of the effect of modifying dispersed refractory titanium carbonitride composition on the increase in the complex properties of a multicomponent nickel alloy are established. It was achieved a significant grinding of alloy grains as a result of modification, which led to an increase in strength properties up to 10% and impact strength up to 35%. The corrosion resistance of ZhS6K alloy in an oxidizing environment increased, the depth of corrosion at a temperature of 1000 ° decreased by 25% compared to the unmodified state.

Keywords: alloy; modifier; structure; power; blades GTE.

Грекова Марина Викторовна – аспирант, инженер-конструктор ГП «КБ «Южное», Днепр, Украина.

Калинина Наталия Евграфовна – д-р техн. наук, проф. кафедры технологии производства, Днепровский национальный университет им. О. Гончара «ДНУ», Днепр, Украина.

Калинин Василий Тимофеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины «НМетАУ», Днепр, Украина.

Джур Евгений Алексеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры технологии производства, Днепровский национальный университет им. О. Гончара «ДНУ», Днепр, Украина.

Бондаренко Олег Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства, Днепровский национальный университет им. О. Гончара «ДНУ», Днепр, Украина.

Maryna V. Grekova – PhD Student, Engineer-designer of the 3d category of SE "Yuzhnoye", Dnipro, Ukraine, e-mail: marina.grekova.kbu@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-4099-5471.

Nataliya E. Kalinina – Doctor of Technical Sciences., Prof. Department of Production Technology, Dnipro National University. O. Gonchar "DNU", Dnipro, Ukraine, e-mail: kalinina.dnu@gmail.com.

Vasiliy T. Kalinin – Doctor of Technical Sciences., Prof. Department of foundry production, National Metallurgical Academy of Ukraine "NMetAU", Dnipro, Ukraine, e-mail: kalinina.dnu@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0003-4490-0994.

Yevgeniy O. Djur – Doctor of Technical Sciences., Prof. Department of Production Technology, Dnipro National University. O. Gonchar "DNU", Dnipro, Ukraine, e-mail: material.ftf@gmail.com.

Oleg V. Bondarenko – PhD, Department of Production Technology, Dnipro National University. O. Gonchar "DNU", Dnipro, Ukraine, e-mail: bov1977@i.ua.