

Н. А. ЛЫСЕНКО¹, А. А. ПЕДАШ¹, В. В. КЛОЧИХИН¹, В. В. НАУМИК²

¹АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина

²Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫЖИГАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОМ 3D-ПРИНТИНГА ДЛЯ ОТЛИВОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье проведено исследование модели и отливок деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД), полученных с применением аддитивных технологий. Модель отливки была изготовлена методом селективного лазерного спекания (SLS-selective laser sintering) полистирольных порошков по специально разработанной в программном комплексе 3D-модели. С использованием полученной модели, методом литья по выжигаемым моделям, были отлиты детали горячего тракта ГТД из литейного жаропрочного никелевого сплава ВХ4Л-ВИ. Исследование полученных отливок проводили в состоянии непосредственно после литья, а также после проведения горячего изостатического прессования с последующей термообработкой. Выполнен анализ построенной модели на наличие поверхностных дефектов и соответствие геометрическим размерам, а также изучены макро- и микроструктурное состояние полученных отливок, механические характеристики и длительная прочность. Установлено, что исследуемые модели максимально точно воспроизводят размеры детали, а отливки имеют удовлетворительную чистоту поверхности, плотную среднекристаллическую макроструктуру. Микроструктура материала отливок является типичной для жаропрочного никелевого сплава ВХ4Л-ВИ в литом состоянии, с наличием карбидов, карбонитридов и эвтектических фаз. Проведение операции горячего изостатического прессования способствует практически полному устраниению пористости и усадочной рыхлоты во внутренних объемах отливок. Механические свойства и длительная прочность (время до высокотемпературного разрушения) образцов соответствуют предъявляемым требованиям. Несколько большие показатели механических свойств получены после выполнения горячего изостатического прессования с последующей вакуумной термической обработкой (гомогенизации и старения). Применение селективного лазерного спекания при изготовлении выжигаемых моделей позволило получить качественные отливки с удовлетворительной микроструктурой, достаточно высоким уровнем свойств и реализовать традиционные преимущества обоих рассматриваемых технологий.

Ключевые слова: аддитивные технологии; селективное лазерное спекание; литьё по выжигаемым моделям; полистирольная модель; жаропрочные сплавы.

Введение

Технология литья по выжигаемым моделям нашла применение в изготовлении деталей авиационной техники поскольку позволяет получать сложные по конфигурации, тонкостенные отливки в широком диапазоне применяемых в отрасли материалов [1, 2].

Применение аддитивных технологий при изготовлении литейных форм и моделей позволяет снизить трудовые и временные затраты на производство [3] и соответственно уменьшить себестоимость продукции, особенно в условиях мелко- и среднесерийного производства. Процесс изготовления литейных моделей в данном случае представляет собой послойное равномерное нанесение слоев материала модели и выборочное (селективное) их сплавление лазерным лучом при температурах 100-120°C. Использование современных систем 3D-проекти-

рования при разработке моделей под аддитивное производство позволяет оптимизировать конструкцию отливки, литниковой системы, а также минимизировать литейные дефекты еще на стадии проектирования [4, 5].

В настоящей работе проведено исследование качества материала среднегабаритных отливок деталей горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочного никелевого сплава ВХ4Л-ВИ, полученных с применением технологии литья по выжигаемым моделям, изготовленных селективным лазерным сплавлением полистирольных порошков.

Методика проведения исследований

В качестве объекта для исследования были выбраны модель и отливка детали горячего тракта авиационного газотурбинного двигателя. По специально разработанной 3D-модели детали, на 3D-установке sPro60 (фирмы 3D-Systems, США) с размера-

ми рабочего пространства ($x/y/z$) $380 \times 330 \times 460$ мм, оснащенной CO₂ лазером мощностью 30 Ватт, методом селективного лазерного спекания (SLS) полистирольных порошков марки Cast Form PS была изготовлена модель для последующего использования при изготовлении керамической формы под заливку расплавом металла. Фракции гранул полистирольных порошков, используемых для изготовления модели, составляли 25-106 мкм. Указанную модель подвергали инфильтрации (пропитке) в расплаве парафина П-2 с целью придания ей прочности, хорошего соединения с литниковой системой и облегчения удаления полистирола из формы при выжигании. Парафинированную модель собрали в блок с использованием литниковой системы из модельной массы Paracast FW352 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид модельного блока отливки, изготовленного с использованием модели, полученной селективным лазерным спеканием полистирольных порошков. Белый цвет – модель отливки, темный цвет – элементы литниковой системы

В дальнейшем на указанную модель наносилось огнеупорное покрытие на основе порошков электрокорунда и дистенсиллиманита. Затем проводили вытопку из полученной керамической формы модельной массы литниковой системы, а также выжигание модели при температуре выше 700°C с выдержкой 6 ч и последующим охлаждением с печью. В полученный керамический блок производили заливку жаропрочного сплава ВХ4Л-ВИ для получения отливки детали.

С целью улучшения качества материала отливки за счет повышения плотности вследствие устранения пористости отливки подвергали операции горячего изостатического прессования при повышенных температурах с последующей вакуумной

термической обработкой: гомогенизация при температуре $1180 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка 4 часа, с последующим старением при температуре $900 \pm 10^\circ\text{C}$ – 16 часов, с охлаждением в потоке аргона.

Для проведения сравнительных исследований одну отливку и часть образцов не подвергали ГИП, а исследовали непосредственно после литья.

Химический состав сплава определяли методами спектрального и химического анализов.

Исследование поверхности отливок проводили с использованием бинокулярного микроскопа STEMI 2000-C.

Пористость на поверхности и по сечению отливок оценивали люминесцентным контролем методом ЛЮМ1-ОВ.

Исследование микроструктуры проводили на нетравленых и травленых микрошлифах на микроскопе «Axio Observer. Dlm».

Механические свойства (σ_b , σ_{02} , δ , ψ) образцов испытывали на разрывной машине ZDMY 30.

Ударную вязкость КСУ определяли на ударных образцах испытанных на маятниковом копре Instron SI-1M.

Длительную прочность образцов определяли на установке Instron M3 при температуре 800°C и постоянно приложенной нагрузке 206 МПа (21 кгс/мм²). При испытаниях на длительную прочность образцы доводили до разрушения.

Анализ и обсуждение полученных результатов

Визуальным осмотром построенной модели установлено, что ее поверхность имеет слоистый характер, с ярко выраженным следами послойного синтеза (рис. 2). Построенная модель отличается высокой детализацией элементов; проверкой на ко-

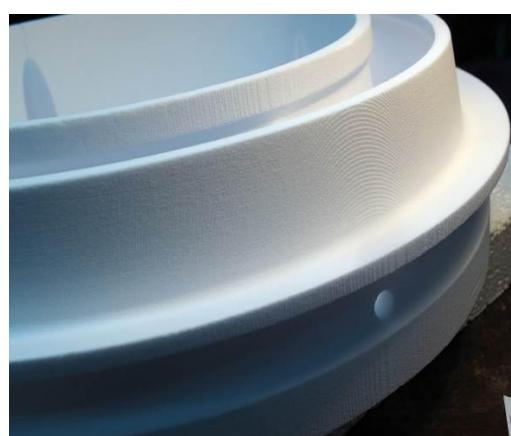


Рис. 2. Поверхность модели отливки после селективного лазерного спекания полистирольных порошков

ординатно-измерительной машине не выявлено отклонений от допусков на размеры. Царапин, сколов, признаков усадки модели не обнаружено. В местах крепления некоторых внутренних стоек выявлены незначительные растрескивания, которые потом подвергались исправлению.

Внешний вид под источником ультрафиолетового света (УФС) отливки корпуса из сплава ВХ4Л-ВИ, отлитой с использованием выжигаемой модели, полученной методом SLS, представлен на рис. 3. Установлено, что отливки, полученные методом литья по выжигаемым моделям, в основном, максимально точно воспроизводят размеры детали и имеют удовлетворительную чистоту поверхности. О точности используемого метода литья может свидетельствовать наличие следов послойного синтеза переданные от модели к отливке.



Рис. 3. Внешний вид отливки, полученной с применением выжигаемой модели

На поверхности отливок обнаружены допустимые нормативной документацией точечные свечения люминофора обусловлены наличием усадочных раковин и микропористости, а также в местах заделки трещин на модели.

Химический состав отливки из сплава ВХ4Л-ВИ соответствует требованиям нормативной технической документации (НТД) (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав отливки, полученной с применением выжигаемой модели

Марка сплава	Содержание элементов, %						
	C	Cr	Nb	W	Mo	Al	Ti
ВХ4Л-ВИ	0,06	32,3	1,27	4,92	3,07	0,88	1,15
Нормы НТД	$\leq 0,1$	32,0 ... 35,0	0,7 ... 1,3	4,3 ... 5,5	2,3 ... 3,5	0,7 ... 1,3	0,7 ... 1,3

Примечание: Fe \leq 5%, Ni – остаток

Исследование макроструктурного состояния в осевом сечении полученных отливок показало, что макроструктура материала плотная, среднекристаллическая с размерами макрозерна от 3,0 до 12,0 мм (рис. 4).



Рис. 4. Макроструктура в поперечном сечении отливки из сплава ВХ4Л-ВИ полученной с применением выжигаемой модели

При металлографическом исследовании травленых микрошлифов, установлено, что микроструктура отливок характерна для литого сплава ВХ4Л-ВИ в удовлетворительном состоянии, представляет собой γ -твердый раствор с наличием карбидов типа MeC, карбонитридов и карбидной эвтектики, небольшим количеством интерметаллидной γ -фазы (рис. 5, а).

Микроструктура корпуса после ГИП и термообработки показана на рис. 5, б

После проведения термообработки по указанному выше режиму в микроструктуре отливок происходит карбидное и интерметаллидное (γ' -фазой типа Ni_3Al) упрочнение γ -твердого раствора с наличием частиц избыточной фазы на основе хрома (α -Cr).

При проведении металлографического исследования нетравленых микрошлифов, вырезанных из различных зон исследуемой детали, обнаружены – микропористость с размером пор до 75 мкм, а также оксидные включения и карбонитриды – до 15 мкм (рис. 6, а). Проведение операции ГИП способствует «залечиванию» пор и рыхлот, располагающихся во внутренних объемах металла. В структуре исследуемой отливки после ГИП микропоры и рыхлоты

практически отсутствуют (рис. 6, б, табл. 2). Размер выявленных после ГИП единичных микропор не превышает ~ 4 мкм, что примерно в 20 раз меньше по сравнению с порами, обнаруженными в деталях до проведения операции ГИП.

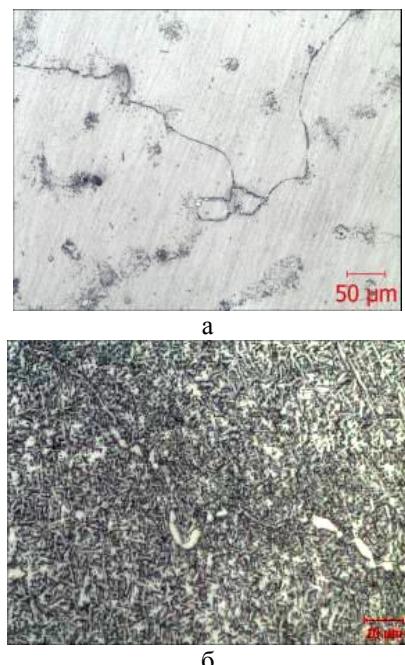


Рис. 5. Микроструктура отливки из сплава BX4Л-ВИ, полученной с применением выжигаемой модели:
а – литое состояние, $\times 200$; б – ГИП+ТО, $\times 1000$

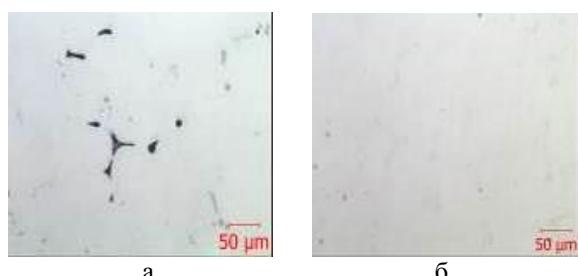


Рис. 6. Пористость ($\times 200$) в отливке из сплава BX4Л-ВИ, полученной с применением выжигаемой модели:
а – литое состояние; б – после ГИП+ТО

Таблица 2

Размеры структурных составляющих в отливках из сплава BX4Л-ВИ исследуемых вариантов изготовления

Сплав	Состояние материала	Размеры структурных составляющих, мкм		
		карбиды MeC	эвтектика	Микропоры и рыхлота
BX4Л-ВИ	Литьё	2...15	4...15	≤ 75
	ГИП+ТО	1...5	3...7	≤ 4

Механические и жаропрочные свойства отливок (как до, так и после ГИП) соответствуют требованиям НТД. При этом следует отметить, что проведение ГИП с последующей термообработкой, по указанному выше режиму, способствует повышению механических свойств, а также времени до высокотемпературного разрушения жаропрочного сплава BX4Л-ВИ.

Таблица 3
Механические свойства (средние) образцов из сплава BX4Л-ВИ исследуемых вариантов

Состояние материала	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KСU, Дж/см ²	τ^{800}_{206} , ч.
Литьё+ТО	894,0	8,8	14,1	27,8	73
ГИП + ТО	913,1	12,8	15,4	35,9	90,5
Нормы НТД	$\geq 780,0$	$\geq 4,0$	-	≥ 20	$\geq 40,0$

Выводы

1. Применение выжигаемых моделей, изготовленных методом селективного лазерного спекания, позволило получить отливки деталей горячего тракта ГТД с высокой размерной точностью и удовлетворительной чистотой поверхности, плотной макроструктурой.

2. Проведение ГИП с последующей термообработкой способствует практическому полному устранению микропористости и рыхлот во внутренних объемах отливок, повышению дисперсности карбидных фаз, растворению эвтектических и получению удовлетворительной микроструктуры в целом, что соответственно оказалось положительное влияние и на уровень механических характеристик и длительной прочности.

3. Применение при изготовлении выжигаемых моделей отливок аддитивных технологий позволило реализовать характерные преимущества, присущие обоим рассматриваемым способам при изготовлении традиционных деталей авиационного назначения.

Литература

1. Разработка методики литья из жаропрочных сплавов сложных деталей малоразмерных газотурбинных двигателей с применением аддитивных технологий [Текст] / В. Г. Смелов, А. В. Балякин, А. В. Агаповичев и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – 2014. – Т. 5(47), № 3. – С. 19-25.

2. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям [Текст] /

Г. Н. Митраков, С. Н. Евдокимов, Е. Г. Лаврик и др.
// Омский научный вестник. – 2015. – № 21 (140).
– С. 80-84.

3. Применение цифровых технологий при изготавлении выжигаемых моделей лопаток ГТД без применения оснастки [Текст] / В. А. Дорошенко, Е. В. Скворцов, А. И. Чудайкин и др. // Литейное производство. – 2012. – № 6. – С. 38-40.

4. Морозов, В. В. Исследование и разработка технологических режимов изготовления отливок по выжигаемым моделям, полученных методом лазерной стереолитографии [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Морозов ; М., 2005. – 15 с.

5. Повышение эффективности технологической подготовки производства на основе сквозного использования информационных технологий [Текст] / С. В. Зыбанов В. Г. Смелов, Н. Д. Проничев и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – 2009. – Т. 3 (34), № 3. – С. 127-131.

References

1. Smelov, V. G., Balyakin, A. V., Agapovich, R. A., Vdovin, R. A. Razrabotka metodiki litvy iz zharkoprochnykh splavov slozhnykh detaley malorazmernykh gazoturbinnih dvigateley s primeneniem additivnykh tekhnologiyi [Development of a technique of moulding small complex parts of gas turbine engines from high-temperature alloys using additive technologies]. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo aero-*

kosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Korolyova, 2014, vol. 5 (47), no. 3, pp. 19-25.

2. Doroshenko, V. A., Skvortsov, E. V., Tchudakin, A. I., Yudin, V. A. Primeneniye tzyfrovyykh tekhnologiyi pri izgotovlenii vyzhygaemykh modeley lopatok GTD bez primeneniya osnastki [Application of digital technologies in production of consumable patterns of GTE blades without using tooling]. *Liteynoye proizvodstvo*, 2012, no. 6, pp. 38-40.

3. Mitrakov, G. N., Yevdokimov, S. N., Lavrik, E. G., Sazonov, V. S. Ispol'zovaniye additivnykh tekhnologiyi pri litve po vyzhygaemym modelyam [Additive manufacturing application for burned pattern casting process]. *Omskyi nauchnyi vestnik*, 2015, no. 21 (140), pp. 80-84.

4. Morozov, V. V. Issledovaniye I razrabotka technologicheskikh rezhimov izgotovleniya otlivok po vyzhigayemym modelyam, poluchennym metodom lazernoy stereolitografii. Avtoref. dis. kand. techn. nauk [Evaluation and development of process parameters of fdm-castings production made by laser stereolithography. Avtoref. dis. PhD], 2005. 15 p.

5. Zybanov, S. V., Smelov, V. G., Pronichev, N. D., Surkov, O. S. Povysheniye effektivnosti technologicheskoy podgotovky proizvodstva na osnove skvoznogo ispol'zvaniya infirmatzionnykh tekhnologiyi [Increase of efficiency of technological preparation of manufacture on the basis of through use of the information technology]. *Vestnik gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Korolyova*, 2009, vol. 3 (34), no. 3, pp. 127-131.

Поступила в редакцию 20.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ОТРИМАННЯ ВИПАЛЮВАНИХ МОДЕЛЕЙ МЕТОДОМ 3Д-ПРINTИНГУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Н. О. Лисенко, О. О. Педаш, В. В. Ключхін, В. В. Наумик

В статті проведене дослідження моделей виливків деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів (ГТД), що були отримані з використанням адитивних технологій. Модель виливка було виготовлено методом селективного лазерного спікання (SLS-selective laser sintering) полістирольних порошків за спеціально розробленою в програмному комплексі 3D-моделлю. З використанням отриманої моделі методом ліття за випалюваннями моделям було відлито деталі гарячого тракту ГТД із ливарного жароміцного нікелевого сплаву BX4L-BI. Дослідження отриманих виливків проводили у стані безпосередньо після ліття, а також після проведення гарячого ізостатичного пресування з наступною термічною обробкою. Виконано аналіз побудованої моделі на наявність поверхневих дефектів й відповідність геометричним розмірам, а також вивчено макро- й мікроструктурний стан отриманих виливків, механічні характеристики й тривалу міцність. Встановлено, що досліджувані моделі максимально точно відтворюють розміри деталей, а виливки мають задовільну чистоту поверхні, щільну й середньокристалічну мікроструктуру. Мікроструктура матеріалу виливків є типовою для жароміцного нікелевого сплаву BX4L-BI в літому стані з наявністю карбідів, карбонітридів та евтектичних фаз. Проведення операції гарячого ізостатичного пресування сприяє практично повному усуненню пористості й усадкової рихлоти у внутрішніх об'ємах виливків, а притаманна сплаву BX4L-BI тривала термічна обробка (високотемпературні гомогенізація та старіння) сприяє його карбідному та інтерметалідному зміщенню. Механічні властивості й тривала міцність (час до високотемпературного руйнування) зразків задовільняє вимогам, що висуваються. Декілька вищі показники механічних властивостей отримані після виконання гарячого ізостатичного пресування з наступною вакуумною термічною обробкою. Застосування селективного лазерного сплавлення при виготовлені випалюваних моделей дозволило отримати якісні виливки із задовільною мікроструктурою, достатнім рівнем властивостей й реалізувати традиційні переваги обох застосованих технологій.

Ключові слова: адитивні технології; селективне лазерне спікання; ліття за випалюваними моделями; полістирольна модель; жароміцні сплави.

PRODUCTION OF FDM-PATTERNS VIA 3D-PRINTING FOR GAS TURBINE CASTINGS

N. A. Lysenko, O. O. Pedash, V. V. Klochikhin, V. V. Naumik

A study of the fuse deposited pattern and castings of gas turbine hot section, which was obtained with additive manufacturing, has been carried out in the present article. A pattern of the castings had been produced by selective laser sintering (SLS) process from the polystyrene powders according to developed in special program complex 3D-model. With involving of the obtained FDM-pattern via burned pattern casting process have been produced a parts of gas turbine hot section from nickel-base superalloy VKh4L-VI. The castings were investigated as in the as-cast state, thus and after inherent superalloy VKh4L-VI heat treatment with prior hot isostatic pressing (HIP). An analysis of the obtained FDM-pattern for the presence of surface defects and geometry compliance are provided, together with the macro- and microstructure study of obtained castings and evaluation of mechanical properties and stress rupture strength results.

It was established that investigated patterns as precisely as possible reproduce dimensions accuracy of the parts, and castings had satisfactory surface cleanliness, roughness, dense and middle crystalline macrostructure. Micro-structure of castings material is typical for nickel-base superalloy VKh4L-VI in the as-cast state with carbides, carbonitrides and eutectic phase's presence.

HIP with subsequent heat treatment provides almost full micro porosity releases in the inner volumes of the metal and getting more uniform solid-state, almost full eutectic dissolving, and carbides dispersivity. Mechanical properties and stress rupture strength (rupture life) of the specimens produced by considered production processes meet the specification requirements.

Application of HIP with subsequent heat treatment (homogenization and ageing) for specimen's production provides slightly bigger indexes of mechanical properties at room temperature.

Selective laser sintering application for FDM-patterns production made it possible to obtain qualitative castings with satisfactory microstructure, the acceptable level of the properties and realize traditional advantages inherent for both considered processes.

Keywords: additive manufacturing; selective laser sintering; fused deposition modeling (FDM) casting; polystyrene model; Ni-base superalloy.

Лысенко Наталия Алексеевна – ведущий инженер управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Педаш Алексей Александрович – канд. техн. наук, начальник бюро управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Ключихин Владимир Валерьевич – начальник управления главного металлурга АО «МОТОР СИЧ», Запорожье, Украина.

Наумик Валерий Владиленович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры машин и технологии литьевого производства, проректор по научной работе Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина.

Lysenko Nataliia Alexeyevna – project engineer in chief of metallurgical engineers department JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine,

e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID Author ID: 0000-0003-2319-1260.

Pedash Alexey Alexandrovich – Ph.D., bureau chief in chief of metallurgical engineers department JSC «MOTOR SICH», Zaporozhye, Ukraine,

e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID Author ID: 0000-0003-1231-9951.

Klochikhin Vladimir Valerievich – chief of metallurgical engineer's department JSC « MOTOR SICH », Zaporozhye, Ukraine,

e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID Author ID: 0000-0002-0754-5543.

Naumyk Valeriy Vladilenovich – doctor of technical sciences, professor, Professor of the Department of foundry machinery and technology, vice-rector for research of National University «Zaporiz'ka polytechica», Zaporozhye, Ukraine,

e-mail: naumik@zntu.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-0657-4510.