ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО / FOUNDRY

УДК 669.245:621.74.045 https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-55-65 Hаучная статья Research article



Моделирование макроструктуры крупногабаритной отливки из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ

А.В. Колтыгин¹, А.А. Никитина¹, А.А. Белова¹, В.Е. Баженов¹, В.Д. Белов¹, Е.Ю. Щедрин²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1

² Публичное акционерное общество «ОДК-Кузнецов» Россия, 443009, г. Самара, Заводское шоссе, 29

🖂 Андрей Вадимович Колтыгин (misistlp@mail.ru)

Аннотация: В работе рассмотрена проблема прогнозирования зеренной структуры в крупногабаритных отливках из никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ, представляющих собой тела вращения с весьма тонкими литыми стенками. Для этого использовалась система компьютерного моделирования литейных процессов ProCast с модулем для расчета зеренной структуры CAFE. Путем компьютерного моделирования определена скорость охлаждения в различных частях отливки, после чего на реальных образцах, полученных в условиях промышленного производства в ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара, Россия), определены размеры зерен и построена их зависимость от скорости охлаждения отливки. Установлено влияние на размер зерна не только скорости охлаждения, но и геометрических особенностей отливки, в частности ее термический модуль (приведенная толщина). Показано, что система ProCast может быть эффективно использована для прогнозирования литейных дефектов в крупногабаритных отливках из жаропрочных никелевых сплавов. При этом путем сравнения температурных зависимостей плотности, теплоемкости и теплопроводности сплава ВЖЛ14Н-ВИ, полученных прямыми измерениями и расчетом с использованием термодинамической базы ProCast, выявлено, что расчетные данные достаточно точны для прогнозирования их в компьютерном моделировании литейных процессов. Установлено, что модуль САFE может быть востребован для прогнозирования, прежде всего величны переохлаждения при затвердевании и количества зародышей зерен в сплаве. Поскольку эти параметры не поддаются прямому измерению, их определение потребует дополнительных исследований.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, ВЖЛ14Н-ВИ, литье по выплавляемым моделям, размер зерна, моделирование литейных процессов, ProCast, CAFE.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 по соглашению о предоставлении субсидии № 075-11-2022-023 от 06.04.2022 г. «Создание технологии изготовления уникальных крупногабаритных отливок из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей, ориентированной на использование отечественного оборудования и организацию современного ресурсоэффективного, компьютероориентированного литейного производства».

Для цитирования: Колтыгин А.В., Никитина А.А., Белова А.А., Баженов В.Е., Белов В.Д., Щедрин Е.Ю. Моделирование макроструктуры крупногабаритной отливки из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ14Н-ВИ. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2025;31(2):55–65. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-55-65

Grain structure simulation in a large-scale casting made of VZhL14N-VI nickel-base superalloy

A.V. Koltygin¹, A.A. Nikitina¹, A.A. Belova¹, V.E. Bazhenov¹, V.D. Belov¹, E.Yu. Shchedrin²

¹ National University of Science and Technology "MISIS"
¹ Bld, 4 Leninskiy Prosp., Moscow 119049, Russia

² UEC-Kuznetsov Public Joint Stock Company
29 Zavodskoe Shosse, Samara 443009, Russia

Andrey V. Koltygin (misistlp@mail.ru)

Abstract: The study addresses the problem of predicting the grain structure in large-scale castings made of the VZhL14N-VI nickel-base superalloy, which are bodies of revolution with very thin walls. To this end, the ProCast casting simulation software was used, including its CAFE module for grain structure prediction. Cooling rates in various areas of the casting were determined by computer simulation. Grain size measurements were then performed on real samples produced under industrial conditions at PJSC UEC Kuznetsov (Samara, Russia), and the correlation between grain size and cooling rate was established. It was found that grain size is affected not only by the cooling rate, but also by the geometric features of the casting defects in large-scale castings made of nickel-base superalloys. A comparison of the temperature-dependent density, specific heat capacity, and thermal conductivity of the VZhL14N-VI alloy – obtained through both direct measurements and ProCast thermodynamic database calculations – showed that the computed data are sufficiently accurate for use in casting process simulations. The CAFE module was found to be applicable for predicting grain structure in castings; however, accurate simulation requires the specification of key parameters, primarily the degree of undercooling during solidification and the number of grain nuclei in the alloy. Since these parameters cannot be measured directly, further research is required to determine them.

Keywords: nickel-base superalloys, VZhL14N-VI, investment casting, grain size, casting simulation, ProCast, CAFE module, thermal modulus.

Acknowledgments: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Government Decree No. 218, in accordance with Subsidy Agreement No. 075-11-2022-023 dated April 6, 2022, titled: "Development of a manufacturing technology for unique large-scale castings made of heat-resistant alloys for gas turbine engines, aimed at the use of domestically produced equipment and the establishment of a modern, resource-efficient, computer-aided casting production".

For citation: Koltygin A.V., Nikitina A.A., Belova A.A., Bazhenov V.E., Belov V.D., Shchedrin E.Yu. Grain structure simulation in a largescale casting made of VZhL14N-VI nickel-base superalloy. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy.* 2025;31(2):55–65. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-2-55-65

Введение

Никелевые жаропрочные сплавы широко используются в качестве материалов для получения деталей камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) [1; 2]. Сплав ВЖЛ14Н-ВИ (ОСТ 1 90126-85) состава, %¹, не более:

Ni	Осн.
C	0,08
Cr	20,0
Мо	5,0
A1	1,5
Ti	2,9
Nb	2,8
Fe	10,0

¹ Здесь и далее в тексте, если не указано иное, содержание элементов приведено в мас. %.

используется для крупногабаритных литых деталей ГТД и отличается значительным содержанием упрочняющей фазы γ' (Ni₃(Al,Ti)) [1—3]. Кроме того, сплав дополнительно упрочняется за счет выделения микрочастиц фаз δ (Ni₃Nb), η (Ni₃Ti), σ (CrFeMoNi, CrMoNi, (Cr,Mo)₃Ni) и карбидов MC, M₂₃C₆, M₆C (M — в основном Cr, но также и Ti, Nb, Mo) [4—8]. Высокие эксплуатационные свойства отливок из сплава ВЖЛ14Н-ВИ зависят от литой структуры и ее изменения после термической обработки [1; 4; 9] и определяются сочетанием размера зерна, количеством, а также величиной и расположением формируемых карбидных и упрочняющих фаз.

На размер зерна в отливке влияет скорость охлаждения, достигаемая в интервале кристаллизации сплава. С ее увеличением возрастает градиент температур в жидкости перед фронтом кристаллизующегося сплава, что ведет к появлению большего количества кристаллов в двухфазной области затвердевающей отливки и, как следствие, к измельчению зерен из-за их конкурентного роста [10—12].

Для моделирования зеренной структуры в отливках с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов ProCast (ESI Group) обычно используется специализированный модуль CAFE для расчета зеренной структуры отливки [13]. Он позволяет проводить моделирование размеров, формы зерна и направления роста для отливок с равноосной, столбчатой и монокристаллической структурами [14]. Расчет с помощью модуля CAFE хорошо показал себя для небольших отливок из никелевых жаропрочных сплавов, в том числе лопаток газотурбинных двигателей [15; 16]. Однако для крупногабаритных отливок он затруднен из-за очень большого количества элементов в расчетной сетке.

В настоящей работе изучалось влияние условий формирования корпусной отливки в оболочковой керамической форме на макроструктуру отливки из сплава ВЖЛ14Н-ВИ с использованием методов компьютерного моделирования, в том числе была предпринята попытка использования модуля CAFE для прогнозирования размера литого зерна в крупногабаритных отливках. Полученные данные сравнивались с результатами оценки размера зерна на образцах, вырезанных из отливки, с целью определения влияния скорости охлаждения на величину зерна в крупногабаритных отливках, имеющих существенную разнотолщинность стенок.

Материалы и методики исследования

Тестовая отливка была получена в огнеупорных оболочковых формах по технологии литья по выплавляемым моделям. В качестве наполнителя суспензии и обсыпки использовали плавленый кварц различной фракции производства АО «ДИНУР» (г. Первоуральск, Россия). Для приготовления огнеупорной суспензии были выбраны связующие Ultracast One+ и Ultracast Prime (ООО «Технопарк» г. Москва, Россия). В качестве шихты использовали готовый сплав ВЖЛ14Н-ВИ производства Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ, г. Москва, Россия). Плавку и разливку сплава осуществляли в вакуумной индукционной плавильно-разливочной установке ВИАМ-24 (Россия) по технологии ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара, Россия).

Для выявления макроструктуры из отливки (рис. 1) после термической обработки вырезали темплет в плоскости, проходящей через ее ось вращения. Поверхность разреза темплета подвергали шлифовке и полировке с использованием абразивных материалов до получения зеркальной поверхности металлографического шлифа. Последний подвергали травлению в реактиве Марбле (20 г Си₂SO₄, 100 мл соляной кислоты, 100 мл этилового спирта) [17]. Изображение макроструктуры получали с использованием цифрового фотоаппарата Сапоп EOS 6D и макрообъектива Волна-9 с удлинительными макрокольцами.

Моделирование литейных процессов проводили с использованием программного обеспечения ProCast (ESI Group), которое дает хорошие результаты при моделировании процесса литья в керамические оболочковые формы [18-20]. САД-модель включала в себя модели отливки, керамической формы, утеплителя, опоки и внутреннего пространства печи. Расчет выполняли с учетом предварительного охлаждения формы перед заливкой в течение 20 мин (температура заливки — 1490 °С), а также с учетом теплопередачи излучением. Более детально описание процесса моделирования представлено в работе [13]. Теплофизические свойства огнеупорных материалов, использованные в моделировании, достаточно хорошо совпадают с данными, полученными другими исследователями [21; 22] Для моделирования зеренной структуры отливки использовали модуль CAFE программы ProCast. При этом исходные параметры расчета САFE были заимствованы из работы [23].

Для уточнения теплофизических свойств сплава ВЖЛ14Н-ВИ определяли плотность (р), тепло-



Рис. 1. Эскиз тестовой отливки в разрезе Максимальный габаритный размер 690 мм

Fig. 1. Schematic cross-section of the test casting Maximum overall dimension: 690 mm

емкость (C_p), теплопроводность (λ) и температуропроводность ($\lambda = a\rho C_p$), а также зависимости этих параметров от температуры.

Плотность при t = 25 °С измеряли методом гидростатического взвешивания. Зависимость $\rho(t)$ рассчитывали с использованием коэффициента теплового расширения, полученного с помощью дилатометра DIL 402C (NETZSCH, Германия). Температуропроводность оценивали методом лазерной вспышки с помощью LFA 447 (NETZSCH). Теплоемкость определяли с помощью калориметра DSC 204F1 Phoenix (NETZSCH).

Результаты и их обсуждение

Отливка «корпус», полученная в условиях ПАО «ОДК-Кузнецов», представляет собой тело вращения и имеет максимальный диаметр около 685 мм и преобладающую толщину стенки 6 мм. На рис. 2 представлена макроструктура стенки отливки в плоскости сечения, проходящей через ось вращения отливки.

Видно, что размер зерен в структуре отливки достаточно сильно отличается для разных ее ча-

стей. При затвердевании массивных областей отливки, прилегающих к форме, образуется мелкозернистая структура, которая быстро переходит в крупнозернистую. Для тонких стенок отливки такое не наблюдается, и структура там достаточно однородная и мелкозернистая. Известно, что такая структура в поликристаллической отливке, в том числе из никелевого жаропрочного сплава, является наиболее предпочтительной, так как обеспечивает наилучшие механические свойства литой детали в соответствии с эффектом Холла— Петча [10].

Таким образом, скорость охлаждения металла в местах, где зерна сплава имеют минимальные размеры, была максимальна, и наоборот, области с наибольшим размером зерен затвердевали с наименьшей скоростью охлаждения. На практике прямое измерение этого показателя в затвердевающей отливке затруднительно, поэтому для определения скорости охлаждения металла в процессе кристаллизации сплава ВЖЛ14Н-ВИ в разных частях отливки было проведено моделирование процессов заливки и затвердевания сплава.



Рис. 2. Макроструктура стенки тестовой отливки (травлено)

1-9- области определения размеров зерен

Fig. 2. Grain structure of the test casting wall (etched)

1-9 – grain size measurement areas

Поскольку прямые измерения теплофизических параметров сплава ВЖЛ14Н-ВИ проводились в достаточно небольшом температурном промежутке — до 300 °С (обусловлено ограничениями измерительного оборудования), были рассчитаны температурные зависимости его теплофизических свойств с использованием термодинамической базы ProCast. Валидация расчетных данных проводилась путем сравнения полученных зависимостей с измеренными результатами. На рис. 3 показаны расчетные и измеренные температурные зависимости плотности, теплоемкости и теплопроводности для сплава ВЖЛ14Н-ВИ. Видно, что они достаточно близки. Для дальнейшего моделирования использовались расчетные данные.

На скорость охлаждения отливки в керамической оболочковой форме влияет большое количество внешних условий, которые были учтены при проведении моделирования [13]. На рис. 4 приведена зависимость размеров зерен от скорости охлаждения в интервале кристаллизации, определенной по результатам моделирования в местах, где проводилось измерение. На рис. 2 показано расположение точек, в которых определялась скорость охлаждения в стенке отливки.

При одинаковых толщинах стенок с увеличением скорости охлаждения размер зерна уменьшается. Относительно толстые стенки (т. 2 и 5 на рис. 2) не укладываются в зависимость, размер зерна в них почти одинаков, несмотря на разницу в скорости охлаждения. На рис. 5 представлены результаты расчета термического модуля (приведенной толщины) отливки [12] и распределение температуры по сечению отливки в момент заполнения металлом. Видно, что те области, в центре которых находятся точки 2 и 5, в момент заполнения их металлом имеют более низкую, чем соседние, температуру, близкую к температуре ликвидус. Кроме того, приведенная толщина этих зон отливки больше, чем у остальных на представленном сечении.



Таким образом, можно заключить, что зависимость размера зерна в отливке сложной формы от толщины стенки не всегда четко просматривается, когда сравниваются участки, имеющие разную



Рис. 4. Зависимость размера зерна в отливке «корпус» от скорости охлаждения в интервале кристаллизации Цифры *1–9* соответствуют точкам, обозначенным на рис. 2

Fig. 4. Grain size vs. cooling rate in the solidification interval for the casing-shaped test component

Points 1-9 correspond to the locations shown in Fig. 2

толщину стенки. В то же время можно проследить зависимость величины зерна от приведенной толщины в отливке в частях, где стенка имеет похожую толщину. Например, для зон 1, 9 и 3 (см. рис. 2) размер зерна последовательно увеличивается (см. рис. 4), при этом возрастает и приведенная толщина стенки отливки (см. рис. 5), что логично, поскольку это — отношение объема части отливки, для которой она вычисляется, к площади поверхности охлаждения этой части. Чем больше эта величина, тем медленнее теплоотвод и равномернее распределение температуры в затвердевающей отливке. Таким образом, размер зерна должен зависеть не столько от скорости охлаждения, сколько от величины переохлаждения, достигаемой в затвердевающей отливке перед фронтом затвердевания [24; 25]. На этом основано вычисление размера зерна в программе ProCast [20; 23].

На рис. 6 представлены результаты моделирования доли твердой фазы в отливке в начале затвердевания и непосредственно перед его окончанием. Видно, что в Y-образном сопряжении стенок образуется изолированный тепловой узел (поз. 4), что приводит к образованию в этом месте усадочной пористости, обнаруживаемой на шлифе. Наличие усадочных дефектов не влияет на размер зерен в местах их расположения (см. рис. 3). Необходимо отметить, что вскрытая зона пористости не определялась на производстве методами неразрушающего контроля отливок и была обнаружена только



Рис. 5. Термический модуль отливки (δ) — приведенная толщина стенки (a) и температура в момент заполнения формы (δ)

Fig. 5. Thermal modulus (δ) – equivalent wall thickness (*a*), and temperature at the moment of mold filling (δ)

Koltygin A.V., Nikitina A.A., Belova A.A. et al. Grain structure simulation in a large-scale casting made of VZhL14N-VI nickel-base superalloy



Рис. 6. Результаты моделирования: доля твердой фазы спустя 95 с (*a*) и 157 с (*б*) с начала заливки и структура в зоне 4 на полированном (пунктиром выделена область пористости, отдельными окружностями – визуально заметные поры) (*в*) и травленом (*г*) образцах

Fig. 6. Simulation results: solid phase fraction after 95 s (a) and 157 s (δ) from the start of pouring; structure in area 4 on a polished sample (a) (dashed outline indicates the porous region; individual pores are marked with circles) and on an etched sample (z)

после анализа результатов моделирования. Это показывает большой потенциал использования методов компьютерного моделирования литейных процессов для улучшения качества отливок.

Результаты моделирования зеренной структуры в отливке с помощью модуля САFE показаны на рис. 7, а его параметры — в таблице. Первоначальное моделирование (рис. 7, *a*) проводилось с использованием показателей, предложенных для жаропрочного никелевого сплава IN713C [23]. Очевидно, что исходные параметры моделирования для сплава ВЖЛ14Н-ВИ, имеющего другой состав и отливаемого в условиях, отличных от рассмотренных в работе [23], могут значительно отличаться, и результат моделирования может не коррелировать с наблюдаемой на практике картиной. Тем не менее из-за отсутствия достоверных сведений для сплава ВЖЛ14Н-ВИ были использованы данные, относящиеся к сплаву IN713C [23].

Как видно из рис. 7, *a*, размеры зерен, полученные в результате первого моделирования, гораздо крупнее, чем в реальной отливке. Тем не менее основные тенденции соответствуют реальной картине, наблюдаемой в отливке. Основными параметрами, влияющими на моделируемый размер зерна в отливке, являются средняя величина переохлаждения (Δt_{cp}), отклонение от нее ($\Delta t_{откл}$) и количество (максимальное число) зародышей зерен в расплаве (n_{max}), задаваемые раздельно для объема отливки и ее поверхности, контактирующей с формой [16].

Поскольку после первого моделирования зерна оказались крупнее наблюдаемых в отливке, но при этом характер изменения размера зерен в разных частях модели примерно соответствовал наблюдаемому в реальной отливке, в следующих итерациях исходные данные по переохлаждению не меняли, а количество зародышей зерен увеличили. Вероятнее всего, на практике будет затруднительно определить, сколько зародышей зерен на самом деле находится в сплаве, используемом в производственных условиях при формировании структуры отливки. Поэтому их количество, учитываемое при моделировании зеренной структуры отливки, необходимо подбирать, основываясь на сравнении результатов моделирования с данными, получаемыми для реальных сплавов. Для этого необходимо отдельное, достаточно ресурсоемкое исследование.

Результаты повторного моделирования приведены на рис. 7, $\delta - \epsilon$. Видно, что с увеличением количества зародышей в сплаве зерно в отливке измельчается.

Таким образом, можно подобрать комбинацию исходных параметров, позволяющих получить результаты, коррелирующие с данными для реальных отливок. В дальнейшем можно будет использовать эти значения в моделировании для

Основные параметры моделирования зеренной структуры отливки с использованием модуля CAFE, применявшиеся в работе

Вариант моделирования	$\Delta t_{\rm cp},{\rm K}$		$\Delta t_{\text{откл}}, \text{ K}$		$n_{\rm max}, {\rm m}^{-3}, {\rm m}^{-2}$	
	Объем	Поверхность	Объем	Поверхность	Объем	Поверхность
1 [23]	6,5	5,5	0,7	0,2	$5 \cdot 10^{7}$	$1 \cdot 10^4$
2					$1 \cdot 10^{7}$	$5 \cdot 10^4$
3					$5 \cdot 10^{7}$	1 · 10 ⁵
4					$1 \cdot 10^{8}$	$5 \cdot 10^{5}$

Key parameters in grain structure simulation with the CAFE module



Рис. 7. Результаты моделирования зеренной структуры отливки с использованием модуля CAFE Варианты моделирования *1* (*a*), *2* (*b*), *3* (*b*) и *4* (*c*) (см. таблицу)

Fig. 7. Results of grain structure simulation using the CAFE module Simulation cases: 1(a), 2(b), 3(e), and 4(z) (see table)

прогнозирования зерна в отливках. Однако подбор таких параметров требует дополнительных исследований на ряде отливок с последующем моделированием. Также следует отметить, что моделирование зеренной структуры в крупногабаритных отливках — очень ресурсоемкий и длительный процесс, для успешной реализации которого необходимо использование весьма мощных компьютерных систем.

Выводы

1. Размер зерна в крупногабаритных отливках из жаропрочных никелевых сплавов зависит от тепловых условий затвердевания отливки, прежде всего от скорости охлаждения, приведенной толщины и градиента температур, достигаемых в отливке в период затвердевания.

2. С помощью компьютерного моделирования с использованием программы ProCast можно определить скорость охлаждения в различных частях отливки и выявить ее влияние на размер зерна в стенках отливки, имеющих близкую толщину. При больших различиях в толщине стенок величина зерна зависит от большего количества факторов и не всегда коррелирует со скоростью охлаждения.

3. Для моделирования размера зерна в стенках крупногабаритных отливок из жаропрочных никелевых сплавов можно использовать модуль CAFE, однако необходимы предварительные исследования с целью определения параметров моделирования, прежде всего количества зародышей зерен. **4.** С помощью компьютерного моделирования процесса получения крупногабаритных отливок из жаропрочных никелевых сплавов с использованием программного пакета ProCast можно достаточно точно прогнозировать литейные дефекты усадочного происхождения в отливке.

Список литературы/References

- Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). М.: Наука и технологии, 2013. 264 с.
- Hassan B., Corney J. Grain boundary precipitation in Inconel 718 and ATI 718Plus. *Materials Science and Technology*. 2017;33(16):1879–1889. https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1333222
- Cemal M., Cevik S., Uzunonat Y., Diltemiz F. ALLVAC 718 Plus[™] superalloy for aircraft engine applications. In: *Recent Advances in Aircraft Technology*. Agarwal R. (Ed.). 2012. P. 75–96. https://doi.org/10.5772/38433
- Kirchmayer A., Pröbstle M., Huenert D., Neumeier S., Göken M. Influence of grain size and volume fraction of η/δ precipitates on the dwell fatigue crack propagation rate and creep resistance of the nickel-base superalloy ATI 718Plus. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2023;54:2219–2226.

https://doi.org/10.1007/s11661-023-07001-3

- Donachie M.J., Donachie S.J. Superalloys: A technical guide. 2nd ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002. 408 p.
- Chen Y.T., Yeh A.C., Li M.Y., Kuo, S.M. Effects of processing routes on room temperature tensile strength and elongation for Inconel 718. *Materials & Design*. 2017;119:235–243.

https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.069

- Geddes B., Leon H., Huang X. Superalloys: alloying and performance. Ohio, Materials Park: ASM International, 2010. 176 p.
- 8. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 392 p.
- Гадалов В.Н., Ворначева И.В., Паньков Д.Н., Бугорский И.А., Загидуллин Р.Р., Сабитов Л.С., Иванов А.А. Изучение влияния структуры жаропрочных никельхромовых сплавов на их механические свойства. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022;10:463—471.

https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-463-471

Gadalov V.N., Vornacheva I.V., Pankov D.N., Bugorsky I.A., Zagidullin R.R., Sabitov L.S., Ivanov A.A. Study of the influence of the structure of nickelchromium superalloys on their mechanical properties. *Izvestiya* Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2022;10:463–471. (In. Russ.).

https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-10-463-471

- Lv J. Effect of grain size on mechanical property and corrosion resistance of the Ni-based alloy 690. *Journal of Materials Science & Technology*. 2018;34:1685–1691. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.12.017
- Cantor B., O'Reilly K. Solidification and casting. 1st ed. CRC Press. 2002. 428 p. https://doi.org/10.1201/9781420033502
- Пикунов М.В. Плавка металлов. Кристаллизация сплавов. Затвердевание отливок. М.: МИСИС, 2005. 416 с.
- Никитина А.А., Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Белов В.Д. Влияние температуры оболочковой керамической формы перед заливкой и температуры заливки на дефекты в отливке «корпус внутренний камеры сгорания» из никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ14Н-ВИ. Цветные металлы. 2024;1:79—85. https://doi.org/10.17580/tsm.2024.01.10

Nikitina A.A., Bazhenov V.E., Koltygin A.V., Belov V.D. Effect of the temperature of the shell ceramic mold before pouring and the pouring temperature on defects in the casting "inner body of the combustion chamber" from nickel heat-resistant alloy VZhL14N-VI. *Tsvetnyye metally*. 2024;1:79—85. (In. Russ.).

https://doi.org/10.17580/tsm.2024.01.10

- Gandin Ch.A., Rappaz M.A. 3D Cellular automaton algorithm for the prediction of dendritic grain growth. *Acta Materialia*. 1997;45(5):2187–2195. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(96)00303-5
- Rappaz M., Gandin Ch.A. Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1993;41(2):3450—3460. https://doi.org/10.1016/0956-7151(93)90065-Z
- Kavoosi V., Abbasi S.M., Mirsaed S.M. Ghazi, Mostafaei M. Influence of cooling rate on the solidification behavior and microstructure of IN738LC superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;680:291–300. http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.04.099
- Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: Справ. изд.: Пер. с нем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия. 1988. 400 с.
- Баженов В.Е., Колтыгин А.В., Фадеев А.В. Использование программы ProCast для моделирования процесса получения отливок из сплава TNM-Bl на основе алюминида титана литьем в керамические формы. Известия вузов. Цветная металлургия. 2013;(6):9—13.

https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-6-9-13

Bazhenov V.E., Koltygin A.V., Fadeev A.V. The use of the ProCast software to simulate the process of investment

casting of alloy based on titanium aluminide TNM-B1 into ceramic molds. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals.* 2014;55(1):15–19.

https://doi.org/10.3103/S1067821214010039

- Yu J., Wang D., Li D., Tang D., Zhu G., Dong A., Shu D., Peng Y. Process parameter effects on solidification behavior of the superalloy during investment casting. *Materials* and Manufacturing Processes. 2019;34(15):1726–1736. https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1666989
- Guo J., Beckermann C., Carlson K., Hirvo D., Bell K., Moreland T., Gu J., Clews J., Scott S., Couturier G., Backman D. Microporosity prediction and validation for Nibased superalloy castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015;84:012003. https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012003
- Xu M., Lekakh S.N., Richards V.L. Thermal property database for investment casting shells. International *Journal* of *Metalcasting*. 2016;10(3):329–337. https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4

- Torroba A.J., Koeser O., Calba L., Maestro L., Carreño-Morelli E., Rahimian M., Milenkovic S., Sabirov I., LLorca J. Investment casting of nozzle guide vanes from nickel-based superalloys: Part I. Thermal calibration and porosity prediction. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2014;3(1):344–368. https://doi.org/10.1186/s40192-014-0025-5
- Szeliga D., Kubiak K., Burbelko A.A., Cygan R., Ziaja W. Modelling of grain microstructure of IN-713C castings. *Solid State Phenomena*. 2013;197:83–88. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.197.83
- Kermanpur A., Rappaz M., Varahram N., Davami P. Thermal and grain-structure simulation in a land-based turbine blade directionally solidified with the liquid metal cooling process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000;31(6):1293–1304.

https://doi.org/10.1007/s11663-000-0017-z

25. Dantzig J.A., Rappaz M. Solidification: Revised & Expanded. EPFL press, 2016. 700 p.

Информация об авторах

Андрей Вадимович Колтыгин — к.т.н., доцент кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов (ЛТиХОМ), Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС). https://orcid.org/0000-0002-8376-0480 E-mail: misistlp@mail.ru Анна Андреевна Никитина — учебный мастер 1-й категории кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС.

https://orcid.org/0000-0002-5399-0330 E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Анастасия Андреевна Белова — учебный мастер кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0002-6679-7126 E-mail: belova@ic-ltm.ru

Вячеслав Евгеньевич Баженов – к.т.н., доцент кафедры ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0003-3214-1935 E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Владимир Дмитриевич Белов – д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЛТиХОМ, НИТУ МИСИС. https://orcid.org/0000-0003-3607-8144 E-mail: vdbelov@mail.ru

Евгений Юрьевич Щедрин — главный металлург ПАО ОДК «Кузнецов». E-mail: ogmet@uec-kuznetsov.ru

Information about the authors

Andrey V. Koltygin – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of Foundry Technologies and Material Art Working (FT&MAW), National University of Science and Technology "MISIS" (NUST MISIS). https://orcid.org/0000-0002-8376-0480 E-mail: misistlp@mail.ru

Anna A. Nikitina – Laboratory Assistant, Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0002-5399-0330 E-mail: nikitina.misis@gmail.com

Anastasia A. Belova – Postgraduate Student, Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0002-6679-7126 E-mail: belova@ic-ltm.ru

Viacheslav E. Bazhenov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Prof., Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0003-3214-1935 E-mail: V.E.Bagenov@gmail.com

Vladimir D. Belov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of FT&MAW, NUST MISIS. https://orcid.org/0000-0003-3607-8144 E-mail: vdbelov@mail.ru

Eugene Yu. Shchedrin – Chief Metallurgist, Public Joint Stock Company "UEC-Kuznetsov". E-mail: ogmet@uec-kuznetsov.ru.

Вклад авторов

А.В. Колтыгин — формирование основной концепции, обработка результатов исследований, написание текста статьи.

А.А. Никитина – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

А.А. Белова – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

В.Е. Баженов – научное руководство, обработка результатов исследований, редактирование текста статьи.

В.Д. Белов – общее руководство, редактирование текста статьи.

Е.Ю. Щедрин – формулировка цели и задачи исследования, обеспечение ресурсами.

Contribution of the authors

A.V. Koltygin – development of the main concept, data analysis, manuscript writing.

A.A. Nikitina – experimental work, data analysis.

A.A. Belova – experimental work, data analysis.

V.E. Bazhenov – scientific supervision, data analysis, manuscript editing.

V.D. Belov – overall supervision, manuscript editing.

E.Yu. Shchedrin – formulation of research objectives and tasks, provision of resources.

Статья поступила в редакцию 10.09.2024, доработана 17.12.2024, подписана в печать 19.12.2024 The article was submitted 10.09.2024, revised 17.12.2024, accepted for publication 19.12.2024