

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Получение мелкозернистой структуры крупногабаритных лопаток из жаропрочного никелевого сплава IN792 / И.В. Кандаров, Д.Л. Панкратов, В.М. Пиксаев, Ф.Ф. Кашапов, Ф.А. Ишмуратов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 3 – С. 64–70. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.08

Please cite this article in English as:

Kandarov I.V., Pankratov D.L., Pixaev V.M., Kashapov F.F., Ishmuratov F.A. Obtaining a fine-grained structure of large-sized blades made of heat-resistant nickel alloy IN792. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 3, pp. 64-70. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 3, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.08

УДК 620.183.255: 620.184.3

**И.В. Кандаров¹, Д.Л. Панкратов²,
В.М. Пиксаев¹, Ф.Ф. Кашапов¹, Ф.А. Ишмуратов¹**

¹Технопарк авиационных технологий, Уфа, Российская Федерация

²Казанский (Приволжский) федеральный университет
Республика Татарстан, Казань, Российская Федерация

**ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ЛОПАТОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА IN792**

Жаропрочные сплавы широко используются в коммерческих целях в горячих секциях авиационных двигателей и наземных энергетических газовых турбин благодаря их превосходной прочности при повышенных температурах и замечательной горячей коррозионной стойкости. Для повышения ресурса газовой турбины, существуют различные технологические методы, одним из них является метод воздействия на структуру и свойства. Установлены зависимости получения мелкозернистой структуры сплава IN792 от технологических параметров литья, влияющих на макроструктуру. Цель исследования достигается путем решения следующих задач: установление зависимости влияния технологических параметров литья на макроструктуру, анализ влияния применения модификатора на макроструктуру. Приведены методы получения мелкозернистой структуры крупногабаритных лопаток (до 900 мм) из жаропрочного никелевого сплава IN792. Проведено исследование влияния модификатора на макроструктуру и экспериментально подтверждены положительные результаты. Исследована зависимость размера зерна и температуры формы при двух разных температурах заливок. Установлена зависимость технологических параметров литья на макроструктуру. Основываясь на анализе результатов двух методов получения мелкозернистой структуры, предложена методика формирования оптимальной мелкозернистой макроструктуры литой заготовки. В результате проделанной работы установлена зависимость параметров литья на процесс формирования рациональной мелкозернистой структуры заготовки лопатки из жаропрочного никелевого сплава IN 792. Установлено, что применение поверхностного модифицирования алюминием кобальта (марка АК-3 ТУ 1-595-1-495-02) позволяет получать более однородную макроструктуру и с меньшим размером зерна. Установлена зависимость размера зерна от степени переохлаждения расплава при разных его температурах заливки: при температуре 1520°C минимальный средний размер зерна, равный 10,5 мм, получен при степени переохлаждения 520°C (температура формы 1000°C), при дальнейшем понижении степени переохлаждения наблюдается рост размера зерен; при температуре 1420°C минимальный средний размер зерна, равный 7,4 мм, получен при степени переохлаждения 420°C (температура формы 1000°C), при дальнейшем понижении степени переохлаждения наблюдается рост размера зерен. Результаты, представленные в работе, применимы при изготовлении литых заготовок лопаток из жаропрочного сплава на никелевой основе.

Ключевые слова: макроструктура, зерно, модификатор, лопатка, литая заготовка, газовая турбина, IN792, температура заливки, жаропрочный никелевый сплав, скорость охлаждения, степень переохлаждения.

I.V. Kandarov¹, D.L. Pankratov², V.M. Pixaev¹, F.F. Kashapov¹, F.A. Ishmuratov¹¹Scientific and Industrial Association "Technopark of Aviation Technologies", Ufa, Russia²Kazan (Volga Region) Federal University Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

OBTAINING A FINE-GRAINED STRUCTURE OF LARGE-SIZED BLADES MADE OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY IN792

Heat-resistant alloys are widely used commercially in the hot sections of aircraft engines and ground-based power gas turbines due to their excellent strength at elevated temperatures and remarkable hot corrosion resistance. To increase the resource of a gas turbine, there are various technological methods, one of them is methods of influencing the structure and properties. The aim of the work is to establish the dependences of obtaining the fine-grained structure of the IN792 alloy on the technological parameters of casting that affect the macrostructure. The goal is achieved by solving the following tasks: determining the dependence of the influence of the technological parameters of casting on the macrostructure, studying the effect of the use of a modifier on the macrostructure. The article presents methods for obtaining a fine-grained structure of large-sized blades (up to 900mm) from a heat-resistant nickel alloy IN792. The effect of the modifier on the macrostructure was studied and positive results were experimentally confirmed. The dependence of grain size and mold temperature at two different pouring temperatures is investigated. The dependence of the technological parameters of casting on the macrostructure is established. Based on the analysis of the results of two methods for obtaining a fine-grained structure, a technique for forming an optimal fine-grained macrostructure of a cast billet is proposed. As a result of the work done, the dependence of the casting parameters on the process of forming a rational fine-grained structure of the blade blank made of heat-resistant nickel alloy IN 792 was established. It was found that the use of surface modification with cobalt aluminate (AK-3 grade TU 1-595-1-495-02) makes it possible to obtain a more homogeneous macrostructure and with a smaller grain size. The dependence of the grain size on the degree of supercooling of the melt at its different pouring temperatures is established: – at a temperature of 1520 °C, the minimum average grain size equal to 10.5 mm is obtained at a degree of supercooling of 520 °C (mold temperature of 1000 °C), with a further decrease in the degree of supercooling, an increase in the grain size is observed; – at a temperature of 1420 °C, the minimum average grain size equal to 7.4 mm was obtained at a degree of hypothermia of 420 °C (mold temperature of 1000 °C), with a further decrease in the degree of hypothermia, an increase in grain size is observed. The results presented in the work are applicable in the manufacture of cast blanks of blades made of a heat-resistant nickel-based alloy.

Keywords: macrostructure, grain, modifier, blade, cast billet, gas turbine, IN 792, pouring temperature, heat-resistant nickel alloy, cooling rate, degree of supercooling.

Введение

На данный момент в РФ не производят газовых турбин большой мощности. В 2018 г. Правительством РФ в целях обеспечения энергобезопасности и энергонезависимости принято решение о воссоздании в стране отечественного производства газовых турбин.

Современные газовые турбины состоят как минимум на 36 % из деталей и узлов на основе никелевого жаропрочного сплава. При этом основная составляющая этих сплавов приходится на литые лопатки турбины, связано это с условиями работы и ресурсом турбины в целом [1–3].

В настоящее время существует большое количество технологических методов воздействия на процесс формирования фазового состава и структуры сплавов, которые позволяют повысить служебные характеристики, тем самым обеспечив требуемую надежность и ресурс рабочих лопаток ГТУ. В связи с этим значительный интерес представляет проведение исследований для выявления возможностей различных технологических методов воздействия на структуру и свойства применительно к конкретному сплаву и к конкретной отливке [4].

Для изготовления крупногабаритных рабочих лопаток 4-й ступени используется жаропрочный никелевый сплав IN 792 (G-NiCr12Co8TiAlWMo).

Сплав IN 792 разработан для равноосного литья и из всех известных зарубежных жаропрочных никелевых сплавов этой серии обладает наиболее

благоприятным сочетанием комплекса механических и эксплуатационных свойств [5; 6]. IN 792 широко используют для изготовления лопаток, работающих при температуре до 950 °C.

Основные физико-механические свойства напрямую зависят от структуры и фазового состава сплава лопаток [7].

Основное требование, предъявляемое к литым лопаткам газовых турбин, – повышенные усталостные характеристики, добиться которых можно за счет получения однородной мелкозернистой структуры [8–10].

Оптимальными условиями для получения мелкозернистой структуры является максимальное число центров кристаллизации и малая скорость роста кристаллов. [11–13] Мелкозернистую макроструктуру литейных жаропрочных сплавов можно получить путем увеличения скорости охлаждения отливки. [14]. Но этот путь для литья лопаток неприемлем в связи с тем, что сложная конструкция отливок приводит к появлению в них высоких термических напряжений, являющихся причиной возникновения кристаллизационных трещин.

Целью работы является установление зависимостей получения мелкозернистой структуры сплава IN792 от технологических параметров литья, влияющих на макроструктуру.

Цель достигается путем решения **следующих задач:**

1. Установление зависимости влияния технологических параметров литья на макроструктуру.

2. Исследование влияния применения модификатора на макроструктуру.

Методика исследований

Плавка и заливка жаропрочного сплава на никелевой основе IN 792 (G-NiCr12Co8TiAlWMo) проводилась в вакуумной плавильно-заливочной установке ALD-150 (ПЗУ) с металлоемкостью до 150 кг.

Опытные заливки проводились в контейнере (опоке) с засыпкой электрокорунда. Фотография и эскиз контейнера с формой приведены на рис. 1. Прогрев формы производился в электрической камерной печи сопротивления с выкатным подом.

Контроль температуры прогрева керамического блока в опоке с засыпкой осуществлялся с помощью двух термопар, расположенных в верхней и нижней частях формы.

Технологические параметры опытных заливок заготовок лопаток указаны в табл. 1.

После получения опытных литых лопаток проводились исследования макроструктуры. Для оценки качества литые заготовки рабочей лопатки 4-й ступени разделены на 5 зон согласно рис. 2.

Результаты и их обсуждение

Влияние применения поверхностного модифицирования на формирование макроструктуры. Одним из способов измельчения

зерна на поверхности литых заготовок из жаропрочных сплавов на никелевой основе является применение поверхностного модифицирования алюминатом кобальта (марка АК-3 ТУ 1-595-1-495-02). Модификатор наносится на поверхность восковой модели путем окунания блока в бак с модификатором в составе суспензии [15].

Модификатор предназначен для получения регламентированной мелкозернистой макроструктуры отливок из жаропрочных сплавов за счет поверхностного модифицирования при кристаллизации в керамической оболочковой форме. На поверхности оболочковой формы создаются дополнительные центры кристаллизации, роль которых выполняют частицы алюмината кобальта.

Содержание модификатора составляет не более 12–15 % от массы связующего в баке [16]. После нанесения слоя суспензии с алюминатом кобальта происходит сушка на воздухе с обдувом продолжительностью не менее 60 мин.

Испытания проводились путем опытных заливок рабочих лопаток 4-й ступени при температуре расплава 1520 °С и температуре керамической формы 300 °С с применением модификатора и без такового.

После испытаний проводилось сравнительное исследование макроструктуры. Результаты исследования макроструктуры литых заготовок лопаток 4-й ступени показали:

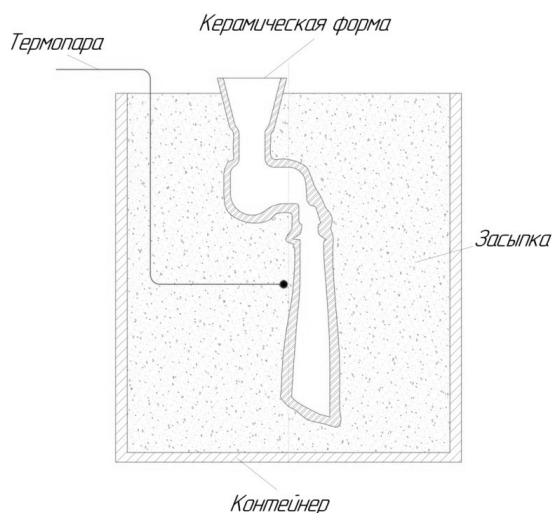


Рис. 1. Контейнер на выкатном поде камерной печи: эскиз и фотография

Таблица 1

Технологические параметры заливок

Температура заливки, °С	Время заливки, сек	Величина остаточного давления, мБар	Температура формы, °С
1520 ± 5	7-12	6·10 ⁻³	300, 500, 1000, 1100
1420 ± 5	7-12	6·10 ⁻³	300, 500, 1000, 1100

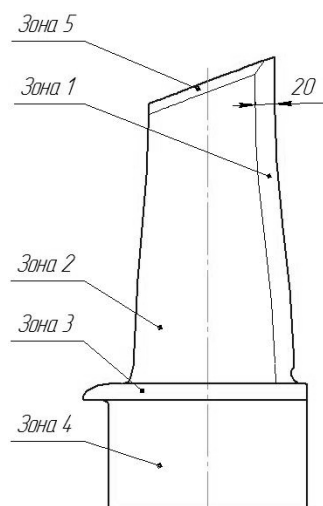
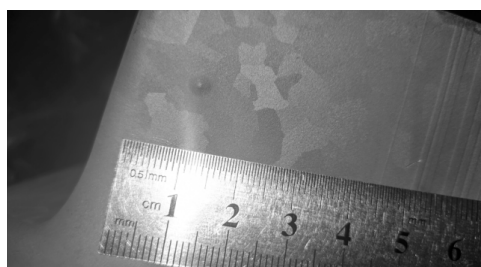
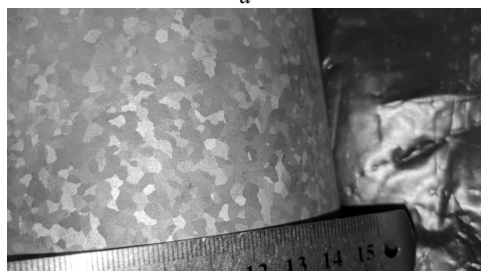


Рис. 2. Зоны отливки рабочей лопатки 4-й ступени



а



б

Рис. 3. Результаты исследования макроструктуры: а – макроструктура без применения модификатора, б – макроструктура с применением модификатора

1. Без применения модификатора макроструктура неоднородная (разнозернистая) как в разных зонах литой заготовки лопатки (зона пера лопатки и зона хвостовика), так и внутри каждой зоны. Размер зерна составил 18–30,8 мм, средний размер зерна – 24,4 мм (рис. 3, а). 2. С применением модификатора макроструктура более однородная между зонами и внутри каждой зоны литой заготовки лопатки. Размер зерна составил 10–14,2 мм, средний размер зерна – 12,1 мм (рис. 3, б).

Полученные результаты приведены на рис. 3 (показан переход зон 2–3).

Также было установлено: в зоне 1 зерна имеют вытянутую форму от выходной кромки к оси лопатки. В дальнейшем была достигнута равноосная структура в зоне 1 путем дополнительного местного утепления.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что применение поверхностного модифицирования, положительно влияет на макроструктуру за счет устранения не однородной макроструктуры, а также уменьшения среднего размера зерна с 24,4 мм до 12,1 мм.

Установление зависимости влияния технологических параметров на макроструктуру сплава. Для достижения наиболее оптимальных значений макроструктуры крупногабаритных рабочих лопаток из жаропрочного никелевого сплава IN792 необходимо выявить зависимость технологических параметров изготовления литых рабочих лопаток и размера зерна. Основным параметром, влияющим на формирование размера зерна, является степень переохлаждения. Изменение степени переохлаждения возможно за счет изменения температуры керамической формы перед заливкой и температуры заливки сплава [17].

Для установления влияния температуры керамической формы на макроструктуру были выбраны следующие температуры керамических форм: 300 °С, 500 °С, 1000 °С, 1100 °С, температура заливки сплава принята, исходя из общепринятой температуры на производстве 1520 ± 5 °С. Температуры керамической формы ниже 300 °С не учитывались, поскольку если сплав очень сильно переохладит, то число центров и скорость роста кристаллов равны нулю, жидкость не кристаллизуется, образуется аморфное тело.

Полученные результаты размеры зерна от изменения температуры керамической формы приведены в табл. 2.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод об изменении размера зерна в зависимости от изменения температуры керамической формы в засыпке. С увеличением температуры керамической формы размер зерна уменьшается, однако при повышении температуры формы выше 1000 °С – возрастает. Это связано с тем, что при данной температуре формы степень переохлаждения уменьшается, число зародышей уменьшается, а скорость кристаллизации при этом увеличивается. Наименьшие размеры зерен получают при температуре формы – 1000 °С.

Для дальнейшего изменения технологических параметров необходимо пересмотреть температуру заливки сплава в соответствии с расчетной. При заливке металла в литейную форму происходит его охлаждение. Для обеспечения заполнения металлом всех полостей формы его необходимо нагреть выше температуры ликвидус [18]. Сплав IN792 имеет температуру ликвидуса – 1315 °С и солидуса – 1240 °С. Расчетная формула представлена ниже:

Таблица 2

Апробация полученных результатов размеров зерен

Параметр	Температура заливки, °C							
	1520 ± 5				1420 ± 5			
	Температура формы, °C				Температура формы, °C			
Средний размер зерна, мм	300	900	1000	1100	300	900	1000	1100
	12,2	11,4	10,5	12,1	8,1	7,4	6,1	7,7

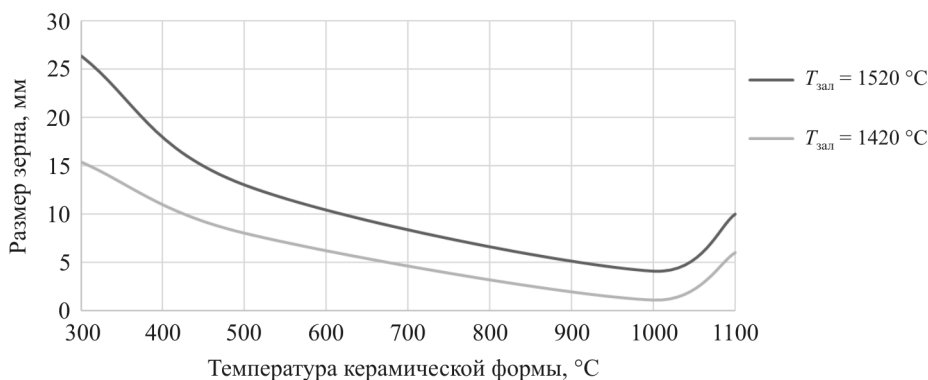


Рис. 4. График зависимости среднего размера зерна от температуры формы

$$t_{\text{зал}} = t_{\text{л}} + \Delta t,$$

где $t_{\text{л}}$ – температура ликвидус; Δt – перегрев металла над температурой ликвидус.

Величина перегрева зависит от конфигурации отливки, толщины стенки, типа формы, количества отливок в форме и других технологических параметров. Обычно для хорошего заполнения формы перегрев металла Δt составляет 50–100 °C.

Согласно зависимости Таммана [19; 20], для увеличения центров кристаллизации было принято уменьшить температуру заливки до 1420°C, при этом для обеспечения заполнения формы и точного повторения предыдущего опыта температуру нагрева керамической формы оставили без изменений – 300 °C, 500 °C, 1000 °C, 1100 °C. Полученные данные приведены в табл. 2.

По результатам проведенных опытных заливок с изменением температуры заливки сплава можно сделать вывод, что наименьший размер зерна получается при температуре формы 1000 °C, зависимости изменения технологических параметров и размера зерна представлены на рис. 4.

Заключение

В результате проделанной работы установлена зависимость параметров литья на процесс формирования рациональной мелкозернистой структуры заготовки лопатки из жаропрочного никелевого сплава IN 792. Установлено, что применение поверхностного модифицирования алюминатом кобальта (марка АК-3 ТУ 1-595-1-495-02) позволяет получать более однородную макроструктуру и с меньшим размером зерна.

Установлена зависимость размера зерна от степени переохлаждения расплава при разных его температурах заливки:

– при температуре 1520°C минимальный средний размер зерна, равный 10,5 мм, получен при степени переохлаждения 520°C (температура формы 1000°C), при дальнейшем понижении степени переохлаждения наблюдается рост размера зерен;

– при температуре 1420°C минимальный средний размер зерна, равный 7,4 мм, получен при степени переохлаждения 420°C (температура формы 1000°C), при дальнейшем понижении степени переохлаждения наблюдается рост размера зерен.

Результаты, представленные в работе, применимы при изготовлении литых заготовок лопаток из жаропрочного сплава на никелевой основе.

Библиографический список

1. Симс Ч., Хагел В., Жаропрочные сплавы Нью-Йорк – Лондон Сидней – Торонто: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.
2. Настека В.В., Новиков С.В., Смыслов А.М. К вопросу об эффективности импортозамещения в наукоемких областях производства газоперекачивающего оборудования // Вестник УГАТУ. – 2020. – № 1. – С. 55–65.
3. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.
4. Голубенцев А.В. Название работы: повышение усталостных характеристик рабочих лопаток ГТУ на основе совершенствования технологии литья и термической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15. – Рыбинск: Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. – 2016. – 175 с.
5. Geddes B., Leon H. Superalloys. Alloying and Performance. – USA: ASM International, 2010. – 184 p.

6. О структуре и свойствах некоторых жаропрочных никелевых сплавов / Г.В. Тягунов, Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, И.В. Вандышева, Н.А. Зайцева, В.С. Мушников // Вестник ЮУрГУ. – 2020. – № 2. – С. 57–70. DOI: 10.14529/met200206.

7. Исследование структуры и свойств образцов из жаропрочного сплава Inconel 738, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM) / М.О. Дмитриева, А.А. Мельников, А.М. Головач, О.С. Бондарева, В.Г. Смелов, А.В. Сотов, А.В. Агаповичев // Вектор науки. – 2020. – № 1. – С. 23–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-1-23-31

8. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов / М.А. Горбовец, И.А. Ходинев, В.А. Каранов, В.Д. Юшин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 3. – С. 96–104.

9. Лейкин А.Е. Материаловедение: учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1971. – 416 с.

10. Барышев Е.Е., Тягунов А.Г., Степанова Н.Н. Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 199 с.

11. Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов. – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.

12. Влияние термической обработки исходного расплава на структуру и свойства кристаллических слитков или отливок / П.С. Попель, В.Е. Сидоров, И.Г. Бродова [и др.] // Расплавы. – 2020. – № 1. – С. 1–34.

13. Голынец С.А., Горбовец М.А., Каранов В.А. Оценка влияния размеров образцов на механические свойства при растяжении жаропрочных титановых и никелевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2018. – № 3 (63). – Ст. 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-86-94

14. Жеманюк П.Д., Лысенко Н.А., Клочихин В.В. Влияние состава и технологических факторов на структуру и свойства никелевых сплавов // Материаловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 9. – С. 19–23.

15. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – 2-е изд. – М.: Наука, 2006. – 632 с.

16. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2016. – С. 10–11.

17. Волков Г.М., Зуев В.М. Материаловедение: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 400 с.

18. Основы повышения жаропрочности литейных сложнолегированных сплавов на никелевой основе / В.Н. Гадалов, Ю.В. Скрипкина, А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов, А.А. Калинин, И.А. Макарова, Е.А. Филатов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 583–593. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-583-593

19. Получение мелкозернистых твердых сплавов системы wс-со (обзор) / Н.Н. Трофименко, И.Ю. Ефимочкин, Р.М. Дворецков, Р.В. Батиенков // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1. – С. 92–100. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-92-100

20. Гаврилин И.В. Плавление и кристаллизация металлов и. – Владимир: Влад. гос. ун-т, 2000. – 260 с.

References

1. Sims Ch., Khagel' V., Zharoprochnye splavy N'iu-Iork – London Sidnei – Toronto: per. s angl. [Heat-resistant alloys]. Moscow: Metallurgii, 1976, 568 p.

2. Nasteka V.V., Novikov S.V., Smyslov A.M. K voprosu ob effektivnosti importozameshcheniia v naukoemkikh oblastiakh proizvodstva gazoperekachivaiushchego oborudovaniia [On the Efficiency of Import Substitution in Science-Intensive Areas of Production of Gas-Pumping Equipment]. *Vestnik UGATU*, 2020, no. 1, pp. 55–65.

3. Getsov L.B. Materialy i prochnost' detalei gazovykh turbin [Materials and strength of gas turbine components]. Moscow: Nedra, 1996, 591 p.

4. Golubentsev A.V. Nazvanie raboty: povyshenie ustalostnykh kharakteristik rabochikh lopatok GTU na osnove sovershenstvovaniia tekhnologii lit'ia i termicheskoi obrabotki [Title of Work: Improving the Fatigue Characteristics of Engine Blades Based on Improved Casting and Heat Treatment Technology]. Abstract PhD thesis. Rybinsk, 2016, 175 p.

5. Geddes B., Leon H. Superalloys. Alloying and Performance. USA: ASM International, 2010, 184 p.

6. Tiagunov G.V., Baryshev E.E., Tiagunov A.G., Vandyшева I.V., Zaitseva N.A., Mushnikov V.S. O strukture i svoistvakh nekotorykh zharoprochnykh nikelovykh splavov [On the structure and properties of some heat-resistant nickel alloys]. *Vestnik IuUrGU*, 2020, no. 2, pp. 57–70. DOI: 10.14529/met200206.

7. Dmitrieva M.O., Mel'nikov A.A., Golovach A.M., Bondareva O.S., Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V. Issledovanie struktury i svoistv obraztsov iz zharoprochnogo splava Inconel 738, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo splavleniia (SLM) [Study of the structure and properties of Inconel 738 heat-resistant alloy samples obtained by selective laser melting (SLM)]. *Vektor nauki*, 2020, no. 1, pp. 23–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-1-23-31

8. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Karanov V.A., Iushin V.D. Vliianie vida nagruzheniia na mnogotsiklovuiu ustalost' zharoprochnykh splavov [Influence of the type of loading on the multi-cycle fatigue of heat-resistant alloys]. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3, pp. 96–104.

9. Leikin A.E. Materialovedenie: uchebnik dlia mashinostroitel'nykh spetsial'nostei vuzov [Materials Science]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1971, 416 p.

10. Baryshev E.E., Tiagunov A.G., Stepanova N.N. Vliianie struktury raspлава na svoistva zharoprochnykh nikelovykh splavov v tverdom sostoianii [Influence of melt structure on solid-state properties of heat-resistant nickel alloys]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2010, 199 p.

11. Materialovedenie: uchebnik dlia mashinostroitel'nykh vuzov [Materials Science]. 2nd. Moscow: Mashinostroenie. 1980, 493 p.

12. Popel' P.S., Sidorov V.E., Brodova I.G. i dr. Vliianie termicheskoi obrabotki iskhodnogo raspлава na strukturu i svoistva kristallicheskiikh slitkov ili otливоk [Influence of initial melt heat treatment on the structure and properties of crystalline ingots or castings]. *Raspлаvy*, 2020, no. 1, pp. 1–34.

13. Golynets S.A., Gorbovets M.A., Karanov V.A. Otsenka vliianiia razmerov obraztsov na mekhanicheskie

svoistva pri rastiazhenii zharoprochnykh titanovykh i nikelovykh splavov [Assessment of the influence of sample size on the tensile mechanical properties of heat-resistant titanium and nickel alloys]. *Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. Zhurnal*, 2018, no. 3 (63), st. 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-86-94

14. Zhemaniuk P.D., Lysenko N.A., Klochikhin V.V. Vliianie sostava i tekhnologicheskikh faktorov na strukturu i svoistva nikelovykh splavov [Influence of composition and technological factors on the structure and properties of nickel alloys]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2001, no. 9, pp. 19–23.

15. Liteye lopatki gazoturbinnnykh dvigatelei: splavy, tekhnologii, pokrytiia [Cast blades for gas turbine engines: alloys, technologies, coatings]. Ed. E.N. Kablova. 2nd. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.

16. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E. Metallurgiya liteinykh zharoprochnykh splavov: tekhnologiya i oborudovanie [Metallurgy of cast heat-resistant alloys: Technology and equipment]. Ed. E.N. Kablova. Moscow: VIAM, 2016, pp. 10–11.

17. Volkov G.M., Zuev V.M. Materialovedenie: uchebnik dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedenii [Materials Science]. Moscow: Izdatel'skii tsentr Akademii, 2008, 400 p.

18. Gadlov V.N., Skripkina Iu.V., Gvozdev A.E., Kutepov S.N., Kalinin A.A., Makarova I.A., Filatov E.A. Osnovy povysheniia zharoprochnosti liteinykh slozhnolegirovannykh splavov na nikelovoi osnove [Fundamentals of Increasing Heat Resistance of Foundry Complex Alloys on a Nickel Basis]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2021, no. 5, pp. 583–593. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-583-593

19. Trofimenko N.N., Efimochkin I.I., Dvoretsov R.M., Batiukov R.V. Poluchenie melkozemistykh tverdykh splavov sistemy wc-co (obzor) [Production of fine-grained hard alloys of the wc-co system]. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, pp. 92–100. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-92-100

20. Gavrilin I.V. Plavlenie i kristallizatsiia metallov [Melting and crystallization of metals and]. Vladimirskii gosudarstvennyi universitet, 2000, 260 p.

Поступила: 14.07.2022

Одобрена: 17.08.2022

Принята к публикации: 20.08.2022

Сведения об авторах

Кандаров Ирек Вилевич (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, директор, Научно-производственная ассоциация «Технопарк авиационных технологий» (Российская Федерация, 450027, г. Уфа, ул. Трамвайная, 5, корп. 1, e-mail: kandarov@mail.ru).

Панкратов Дмитрий Леонидович (Казань, Россия) – профессор, доктор технических наук, доцент, Набережночелнинский институт (филиал) КФУ (Российская Федерация, 423812, г. Набережные Челны, пр. Мира, 68/19, e-mail: pankratovdl@gmail.com).

Пиксаев Василий Михайлович (Уфа, Россия) – начальник отдела технологии литья Научно-производственная ассоциация «Технопарк авиационных технологий» (Российская Федерация, 450027, г. Уфа, ул. Трамвайная, 5, корп. 1, e-mail: vasilypiksaev@mail.ru).

Кашапов Фидайль Флюрович (Уфа, Россия) – начальник конструкторского сектора отдела технологии литья Научно-производственная ассоциация «Технопарк авиационных технологий» (Российская Федерация, 450027, г. Уфа, ул. Трамвайная, 5, корп. 1, e-mail: kashapov.fidail@mail.ru).

Ишмуратов Фидан Ахмадеевич (Уфа, Россия) – конструктор Научно-производственная ассоциация «Технопарк авиационных технологий» (Российская Федерация, 450027, г. Уфа, ул. Трамвайная, 5, корп. 1, e-mail: biofiolight@yandex.ru).

About the authors

Irek V. Kandarov (Ufa, Russia) – Candidate of Technical Sciences, Director, Scientific and Production Association "Technopark of Aviation Technologies" (Build. 1, 5, str. Tramway, Ufa, 450027, Russian Federation, e-mail: kandarov@mail.ru).

Dmitry L. Pankratov (Kazan, Russia) – Professor, Doctor of Sciences (Associate Professor), Naberezhnye Chelny Institute (branch) KFU " (68/19, Mira ave., Naberezhnye Chelny, 423812, Russian Federation, e-mail: pankratovdl@gmail.com).

Vasily M. Pixaev (Ufa, Russia) – Head of the Casting Technology Department, Scientific and Production Association "Technopark of Aviation Technologies" (Build. 1, 5, str. Tramway, Ufa, 450027, Russian Federation, e-mail: vasilypiksaev@mail.ru).

Fidail F. Kashapov (Ufa, Russia) – Head of the design sector of the Casting Technology Department Scientific and Production Association "Technopark of Aviation Technologies" (Build. 1, 5, str. Tramway, Ufa, 450027, Russian Federation, e-mail: kashapov.fidail@mail.ru).

Fidan A. Ishmuratov (Ufa, Russia) – Designer of the Scientific and Production Association "Technopark of Aviation Technologies" (Build. 1, 5, str. Tramway, Ufa, 450027, Russian Federation, e-mail: biofiolight@yandex.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.