УДК 621.745.4

ВЛИЯНИЕ ВОЗВРАТА СОБСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС6У. ЧАСТЬ 2. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА ЖС6У, ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗВРАТА СОБСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА*

Колтыгин А.В., к.т.н., доцент кафедры «Литейные технологии и художественная
обработка материалов» (misistlp@mail.ru)

Баженов В.Е., к.т.н., доцент кафедры «Литейные технологии и художественная
обработка материалов» (V.E.Bagenov@gmail.com)

Базлов А.И., инженер лаборатории «Перспективные энергоэффективные
материалы» (andreibazlov@gmail.com)

Базлова Т.А., к.т.н., доцент кафедры «Литейные технологии и художественная
обработка материалов» (tbazlova@mail.ru)

Белов В.Д., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Литейные технологии и художественная
обработка материалов» (vdbelov@mail.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Во второй части статьи рассматривается влияние количества возврата собственного производства на структуру и механические свойства сплава ЖС6У-ВИ. Поскольку использование возврата сопряжено с возможностью загрязнения сплава неметаллическими включениями и угаром легирующих компонентов, влияние его на структуру и механические свойства должно быть существенным. Изучены выплавленные в вакуумной дуговой печи цилиндрические образцы диаметром 12 мм, отлитые в медную изложницу, из чистого исходного сплава ЖС6У-ВИ без использования возврата, а также с использованием 50 и 100 % в шихте специально подготовленного возврата. Исследование структуры осуществляли с использованием оптической микроскопии на шлифах, приготовленных из поперечных сечений образцов после травления. Исследования проводили на образцах, отожженных при 1210 °С в течение 4 ч. Сплав, полученный целиком из возврата, содержит несколько большее количество неметаллических включений в структуре по сравнению с отлитым из первичного сплава. Для образца, выплавленного из 100 % возврата, уровень опасности включений равен 3 (ASTM E 45-97) при их среднем размере $28,4 \pm 0,2$ мкм. При этом отмечается наличие единичных крупных включений размером не более 70 мкм. Однако это не влияет на полученные механические свойства сплава. Механические свойства после термической обработки ($\sigma_b = 1090 - 1100$ МПа и $\delta = 9 - 11$ %), полученные на образцах, выплавленных с применением возврата 50 и 100 % от массы шихты, полностью удовлетворяют требованиям ТУ1-92-177-91, предъявляемым к сплаву ЖС6У-ВИ. В процессе затвердевания большая часть крупных включений концентрируется в поверхностных зонах отливок, что затрудняет их механическую обработку, вследствие чего использование в шихте 100 % возврата без его предварительной переработки не рекомендуется. Приемлемые результаты были достигнуты при применении 50 % очищенного возврата собственного производства.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, возврат собственного производства, ЖС6У, плавка, шихта.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-525-530

ВВЕДЕНИЕ

Одним из популярных решений в направлении снижения себестоимости газотурбинных двигателей (ГТД) является применение возврата жаропрочных никелевых сплавов (ЖС) для получения отливок для ГТД, в частности лопаток, причем количество возврата в плавке достигает 100 % [1 – 6].

* Статья подготовлена по материалам работы, выполняемой в рамках постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г. Госконтракт № 02.G25.31.0163.

Возврат ЖС в виде элементов литниковой системы и литейного брака имеет загрязнения, которые могут переходить в металл при переплавке, что требует дополнительных технологических операций по подготовке шихты к плавке и рафинированию расплава [7 – 9]. Вредными для ЖС считаются оксидные, нитридные и карбидные неметаллические включения. Однако наиболее часто в структуре ЖС встречаются оксиды. Экзогенные неметаллические включения наиболее опасны, так как могут иметь большие размеры (иногда несколько миллиметров в диаметре) [10].

В то же время ЖС, полученный из возврата, может полностью удовлетворять требованиям, предъявляемым к первичному сплаву и может быть использован для производства лопаток ГТД [11, 12]. Поэтому сейчас существуют технологии переработки отходов ЖС, позволяющие получать качественный сплав для использования его при производстве лопаток ГТД [13]. Однако размер зерна в отливке, механические свойства, количество примесей, получаемые при переплаве ЖС, сильно зависят от технологии плавки и условий литья [11, 13 – 15].

Во второй части работы исследовалось влияние количества возврата в шихте на структуру, загрязненность металла и механические свойства сплава ЖС6У-ВИ с целью определения допустимого количества возврата, позволяющего получать годные лопатки ГТД.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования было отлито три образца, полученных вакуумно-дуговым переплавом:

- первый – из чистого (первичного) сплава ЖС6У-ВИ производства АО «СМК» (г. Ступино, Россия);
- второй – из 50 % чистого сплава ЖС6У-ВИ и 50 % металлических отходов производства лопаток ГТД из того же сплава;
- третий – из 100 % металлических отходов производства лопаток ГТД.

Методика получения образцов и использованное оборудование описаны в первой части работы [16]. Полученные образцы подвергались термической обработке в муфельной лабораторной печи на воздухе при температуре 1210 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением образцов в потоке воздуха. Впоследствии из них методом искровой резки изготавливались плоские образцы на разрыв толщиной 1,2 мм, которые шлифовали с двух сторон на наждачной бумаге Р600 и Р1200

до толщины 1 мм, после чего использовали для испытания механических свойств.

Исследование структуры сплавов проводилось с использованием оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer. D1m. Травление для выявления дендритной структуры и неметаллических включений в сплаве осуществляли смесью кислот (30 мл азотной кислоты, 0,5 мл соляной кислоты, 70 мл уксусной кислоты) [17]. Для выявления границ зерен травление проводили реактивом Марбле (20 мг Cu_2SO_4 , 100 мл соляной кислоты, 100 мл этилового спирта) [18].

Загрязненность образцов неметаллическими включениями оценивали с помощью определения уровня опасности включений по методу Low Inclusion Content (метод D), описанному в стандарте ASTM E 45-97 [19] путем анализа зон шлифа размером 0,71×0,71 мм.

Твердость по Виккерсу (HV10) определяли на универсальном твердомере NEMESIS 9001 фирмы INNOVATEST при нагрузке 10 кгс. Длительность нагружения составляла 12 с. Механические испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине Instron 5569.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании трех образцов, отлитых в одинаковых условиях, установлено, что сплав, полученный целиком из возврата, содержит несколько большее количество неметаллических включений в структуре по сравнению со сплавом, отлитым из первичного сплава. Однако их размеры и общее содержание не велико (рис. 1).

Используя шлиф, приготовленный из образца, полученного из 100 % возврата (рис. 1, б), определили уровень опасности включений (Severity Level). Для образца, выплавленного из 100 % возврата, уровень опасности включений равен 3 при среднем размере

Рис. 1. Микроструктура образцов, залитых в медную форму, изготовленных из первичного сплава (а) и 100 % возврата (б) (травлено), стрелками показаны неметаллические включения

Fig. 1. Microstructure of the samples casted into a copper mold, produced from virgin alloy (a) and produced from 100 % of scrap (b) (etched), arrows show nonmetallic inclusions

включений $28,4 \pm 0,2$ мкм. При этом отмечается наличие единичных крупных включений размером не более 70 мкм. В то же время в образце, выплавленном целиком из чистого сплава ЖС6У-ВИ, неметаллические включения практически отсутствуют (рис. 1, а).

Распределение неметаллических включений в структуре сплава, полученного из 100 % возврата, равномерное, конгломерации частиц отсутствуют, что очень важно для обеспечения хороших механических свойств поликристаллических ЖС на основе никеля [20].

Измерение твердости сплавов в литом и термообработанном состоянии показало, что при использовании возврата в качестве шихтового материала твердость сплава не изменяется (рис. 2). Твердость в литом состоянии колебалась на уровне 470 HV, в термообработанном состоянии она понизилась и составила примерно 390 HV.

Структура образцов, выплавленных из 100 % первичного сплава, из первичного сплава + 50 % возврата и из 100 % возврата практически не отличается. Из-за интенсивного теплоотвода при затвердевании в медной форме сплав имеет выраженную направленную структуру, зерна сплава вытянуты от поверхности образца к его центру. Равноосные кристаллы практически отсутствуют.

Влияние количества возврата в шихте на размер зерна в полученных образцах установлено не было (рис. 3). Средний размер зерна находится на уровне 200 мкм. В процессе плавки и литья сплавов никаких дополнительных воздействий, направленных на измельчение зерна, не проводилось.

Механические свойства сплава определяли после термической обработки в соответствии с ТУ1-92-177-91 при комнатной температуре. По этому стандарту сплав ЖС6У-ВИ после отжига при 1210 °С и последующего охлаждения на воздухе должен иметь предел прочности не ниже 830 МПа и относительное удлинение не

Рис. 2. Твердость сплава ЖС6У-ВИ в литом и термообработанном состоянии

Fig. 2. Hardness of ShS6U-VI alloy in as-cast and heat-treated state

ниже 3 % при комнатной температуре. Все испытанные образцы, независимо от исходного материала, применявшегося для их приготовления, удовлетворяют этим условиям. Механические свойства образцов сплава не снижаются при применении возврата в качестве шихтового материала относительно образцов, полученных из первичного сплава (рис. 4). Относительное удлинение возрастает с увеличением количества возврата в шихте, несмотря на загрязнение образцов неметаллическими включениями, обнаруженное ранее (см. рис. 1). Данный эффект, возможно, объясняется увеличением однородности сплава в жидком состоянии и удалением из него нерегламентированных примесей, влияющих на пластичность. Положительный эффект высокотем-

Рис. 3. Размер зерна образцов, залитых в медную форму, после термической обработки (1210 °С, 4 ч + охлаждение в потоке воздуха), выплавленных без использования возврата, с использованием 50 % возврата и целиком из возврата

Fig. 3. Grain size of the samples casted into a copper mold after heat-treatment (1210 °C, 4 h + air cooling), melted without scrap, using 50 % of scrap and 100 % of scrap

Рис. 4. Результаты механических испытаний образцов сплава ЖС6У-ВИ после термической обработки

Fig. 4. Tensile test results of ShS6U-VI alloy samples after heat-treatment

пературного переплава ЖС известен и описан в работах [10, 21].

Изучение изломов не выявило различий между сплавами, выплавленными с использованием возврата в шихте и без него. На рис. 5 показан излом образца, выплавленного из 100 % возврата собственного производства, снятый во вторичных и отраженных электронах. Видны светлые мелкие частицы карбидов, равномерно распределенные по поверхности излома. Крупных неметаллических включений, провоцирующих преждевременное разрушение сплава, обнаружено не было (рис. 5, а). Рельеф излома хорошо виден во вторичных электронах (рис. 5, б). Излом вязкий, разрушение проходит сквозь зерна сплава. Другие образцы имеют изломы, аналогичные представленному на рис. 5.

Полученные результаты являются следствием примененного способа плавки и заливки сплава. Использование дуговой печи с нерасходуемым электродом и плавка в медном водоохлаждаемом тигле создают условия для выхода загрязнений, присутствующих в возврате сплава, на поверхность металла. Этот эффект описывается в работах [7, 10]. Такой способ плавки создает в расплаве большой градиент температур, направленный снизу вверх. Это способствует вытеснению неметаллических включений на поверхность металла, что и наблюдалось в процессе плавки. Такого же результата можно добиться и плавкой в индукторе при достаточном для удаления неметаллических включений в шлак времени выдержки расплава в жидком состоянии [19].

Неметаллические частицы, скапливаясь на поверхности образцов, в значительной мере осложняют механическую обработку отливок. В частности, отмечена повышенная трудоемкость приготовления образцов для испытания механических свойств из сплавов, изготовленных с применением возврата, относительно образцов, полученных из чистого сплава. В реальном производстве это не может повлиять на качество литой детали, поскольку крупные неметаллические включения будут сосредотачиваться в прибыльной части отливки и элементах литниковой системы, расположенных в верхней части формы, однако их обрезка возможно осложнится.

Таким образом, рафинирование сплава в процессе переплава позитивно отразилось на его свойствах. Однако использование 100 % возврата в качестве шихты затрудняет процесс механической обработки отливок в части отделения элементов литниково-питающей системы, поэтому количество возврата в шихте необходимо ограничивать. В данном случае хорошие результаты были получены при использовании в шихте 50 % возврата собственного производства.

Выводы

Использование в шихте до 100 % отходов производства лопаток ГТД позволяет, после специальной

Рис. 5. Фрактограмма сплава ЖС6У-ВИ, выплавленного из 100 % возврата собственного производства, один участок показан в отраженных (а) и вторичных (б) электронах

Fig. 5. Fracture of ShS6U-VI alloy melted using 100% of scrap; one part is shown in backscattered (a) and in secondary (b) electrons

подготовки этих отходов к плавке, получить сплав, соответствующий по структуре чистому сплаву ЖС6У-ВИ. Наличие в сплавах, приготовленных с применением отходов производства лопаток ГТД, повышенного содержания мелких неметаллических включений не влияет на размер зерна сплава.

Образцы, залитые в медную форму, полученные вакуумно-дуговым переплавом из чистого сплава ЖС6У-ВИ и сплава с добавлением возврата производства лопаток ГТД, имеют одинаковые твердость в литом и термообработанном состоянии и механические свойства после ТО. При этом использование отходов в шихте не только не снижает, но почти вдвое повышает относительное удлинение сплава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия. – 2-е изд. – М.: Наука, 2006. – 632 с.
2. Кишкин С.Т., Строганов Г.Б., Логунов А.В. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе. Разработка и исследования. – М.: Машиностроение, 1987. – 116 с.
3. Зеленюк А.Н., Наумик В.В., Елькин А.В. Использование технологического возврата при производстве отливок из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ12Э-ВИ // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2011. № 1 (22). С. 198 – 202.
4. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Организация производства литых прутковых заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Литейное производство. 2011. № 10. С. 2 – 6.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б. С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. № 10–11. С. 23 – 32.

6. Binczyk F., Ślężiona J., Mikuszewski T. Effect of repeated remelting on the chemical composition and structure of nickel alloys // Archives of foundry engineering. 2010. Vol. 10. No. 1. P. 189 – 194.
7. DeBarbadillo J.J. Nickel–base superalloys; physical metallurgy of recycling // Metallurgical Transactions A. 1983. Vol. 14. Issue. 2. P. 329 – 341.
8. Richards N.L., Chaturvedi M.C. Effect of minor elements on weldability of nickel base superalloys // International Materials Reviews. 2000. Vol. 45. Issue 3. P. 109 – 129.
9. Morscheiser J., Thönnessen L., Gehrmann B., Friedrich B. The influence of the slag composition on the desulfurization of Ni–based superalloys // Proceedings of the 2011 Int. Symposium on Liquid Metal Processing and Casting: Nancy, France. September 25 – 28. 2011. LMPC 2011. P. 89 – 96.
10. Ключихин В.В., Жеманюк П.Д., Наумик В.В., Цивирко Э.И. Влияние условий кристаллизации на качество жаропрочных сплавов, выплавленных с использованием литейного возврата // Литейное производство. 2015. № 6. С. 2 – 5.
11. Зеленюк А.Н., Елькин А.В., Наумик В.В. Исследование качества мерных слитков, полученных из 100 % технологического возврата, рафинированного методом температурно-временной обработки // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2012. № 1. С. 45 – 48.
12. Prasad V.S., Rao A.S., Prakash U.V. etc. Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting // ISIJ International. 1996. Vol. 36. No. 12. P. 1459 – 1464.
13. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В. и др. Особенности технологии выплавки и разливки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № SP2. С. 68 – 78.
14. Zhang Z.W., Niu Y.J., Tian J.J. etc. The effect of remelting on the microstructure and mechanical properties of a nickel superalloy // Materials Science Forum. 2016. Vol. 849. P. 492 – 496.
15. Cheng J.-Q., Hu X.-J., Gu Y. Development and application of molds for producing large superalloy vacuum electrodes // Foundry. 2016. Vol. 65. No. 9. P. 917 – 919.
16. Колтыгин А.В., Баженов В.Е., Базлов А.И. и др. Влияние возврата собственного производства на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. Часть 1. Анализ структуры и фазового состава сплава ЖС6У, полученного с применением возврата собственного производства // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 360 – 365.
17. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: Справ. изд. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – 120 с.
18. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: Справ. изд. / Пер. с нем. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1988. – 398 с.
19. Manjili M.H., Halali M. Removal of non-metallic inclusions from nickel base superalloys by electromagnetic levitation melting in a slag // Metallurgical and Materials Transactions B. 2018. Vol. 49. Issue 1. P. 61–68.
20. Zhang T., Jiang J., Shollock B.A. etc. Slip localization and fatigue crack nucleation near a non-metallic inclusion in polycrystalline nickel-based superalloy // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 641. August. P. 328 – 339.
21. Барышев Е.Е., Костина Т.К., Тягунов А.Г. и др. Влияние обработки расплава на структуру жаропрочного сплава ЖС6У в жидком состоянии и процессе его кристаллизации // Высоко-температурные расплавы. 1997. № 1. С. 26 – 31.

Поступила в редакцию 6 января 2019 г.

После доработки 6 января 2019 г.

Принята к публикации 3 апреля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. Vol. 62. No. 7, pp. 525–530.

EFFECT OF SCRAP USING IN CHARGE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ZhS6U NICKEL-BASED SUPERALLOY. PART 2. MACROSTRUCTURE ANALYSIS AND MECHANICAL PROPERTIES OF ZhS6U PREPARED WITH SCRAP

A.V. Koltygin, V.E. Bazhenov, A.I. Bazlov, T.A. Bazlova, V.D. Belov

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. The second part of the article considers influence of the scrap amount on structure and mechanical properties of ZhS6U-VI nickel-based superalloy. As the use of scrap is associated with the possibility of alloy contamination by nonmetallic inclusions and loss of alloying elements, the influence of scrap on alloy structure and mechanical properties is in great importance. The samples with diameter of 12 mm were melted in a vacuum arc furnace and were casted into a copper mold from the virgin ZhS6U-VI alloy without scrap and from alloys with 50 % and 100 % of scrap. The alloys structures were investigated using optical microscopy on etched metallographic sections that were cut from the samples' cross-sections. The studies were carried out on the as-cast samples and the samples after solution heat treatment for 4 hours at 1210 °C. The slightly higher nonmetallic inclusions content were observed in the structure of the alloy melted with scrap in comparison with virgin alloy melted without scrap. For the sample that was melted from 100 % of scrap the inclusions secure level is 3 (ASTM E 45-97) with an average size of inclusions of $28.4 \pm 0.2 \mu\text{m}$. Herewith the presence of single large inclusions with a size of not more than 70 microns was noted. However, it has no effect on the

alloy mechanical properties. Mechanical properties after heat treatment (ultimate strength (UTS) = 1090 – 1100 MPa and elongation (El) = 9 – 11 %) were obtained on the samples melted using 50 and 100 % of scrap and fully correspond to the TU1-92-177-91 standard for ZhS6U-VI nickel-base superalloy. During solidification most of the large nonmetallic inclusions are concentrated under casting surface, which makes their machining difficult. Because of that the use of 100 % scrap without its preliminary processing is not recommended. Acceptable results were achieved when the 50 % of scrap was used.

Keywords: nickel-based superalloys, scrap, ZhS6U, melting, charge.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-525-530

REFERENCES

1. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnikh dvigatelei: splavy, tekhnologiya, pokrytiya* [Casted gas turbine blades: alloys, technology, coatings]. Moscow: Nauka, 2006, 632 p. (In Russ.).
2. Kishkin S.T., Stroganov G.B., Logunov A.V. *Liteinye zharoprochnye splavy na nikelvoi osnove. Razrabotka i issledovaniya* [Casting heat-resistant nickel-based superalloys. Development and research]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 116 p. (In Russ.).
3. Zelenyuk A.N., Naumik V.V., El'kin A.V. Using scrap in production of VZhL12E-VI alloy castings. *Visnik Donbas'koi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii*. 2011, no. 1 (22), pp. 198–202. (In Russ.).

4. Sidorov B.B., Rigin V.E., Kablov D.E. Organization of cast bar production from modern casting nickel-based superalloys. *Liteinoe proizvodstvo*. 2011, no. 10, pp. 2–6. (In Russ.).
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomborg B.S. Strategic development directions of structural materials and technologies for their processing for aircraft nowadays and in future. *Avtomaticheskaya svarka*. 2013, no. 10–11, pp. 23–32. (In Russ.).
6. Binczyk F., Śleziona J., Mikuszewski T. Effect of repeated remelting on the chemical composition and structure of nickel alloys. *Archives of foundry engineering*. 2010, vol. 10, no. 1, pp. 189–194.
7. DeBarbadillo J.J. Nickel–base superalloys; physical metallurgy of recycling. *Metallurgical Transactions A*. 1983, vol. 14, no. 2, pp. 329–341.
8. Richards N.L., Chaturvedi M.C. Effect of minor elements on weldability of nickel base superalloys. *International Materials Reviews*. 2000, vol. 45, Issue 3, pp. 109–129.
9. Morscheiser J., Thönnessen L., Gehrmann B., Friedrich B. The influence of the slag composition on the desulfurization of Ni–based superalloys. *Proceedings of the 2011 Int. Symposium on Liquid Metal Processing and Casting: Nancy, France. September 25–28, 2011*. LMPC 2011, pp. 89–96.
10. Klochikhin V.V., Zhemanyuk P.D., Naumik V.V., Tsivirko E.I. Influence of solidification conditions on the quality of superalloys melted using foundry scrap. *Liteinoe proizvodstvo*. 2015, no. 6, pp. 2–5. (In Russ.).
11. Zelenyuk A.N., El'kin A.V., Naumik V.V. Investigation of the quality of weighted ingots, obtained using 100% of scrap refined by the method of temperature-time treatment. *Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*. 2012, no.1, pp. 45–48. (In Russ.).
12. Prasad V.S., Rao A.S., Prakash U.V., Rao R., Rao P.K., Gupta K.M. Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting. *ISIJ International*. 1996, vol. 36, no. 12, pp. 1459–1464.
13. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Features of the modern melting and casting technology of cast heat-resistant nickel-based superalloys. *Vestnik MG TU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye*. 2011, no. SP2, pp. 68–78. (In Russ.).
14. Zhang Z.W., Niu Y.J., Tian J.J., An N., Gao Y., Wang C., Shi S.F. The effect of remelting on the microstructure and mechanical properties of a nickel superalloy. *Materials Science Forum*. 2016, vol. 849, pp. 492–496.
15. Cheng J.-Q., Hu X.-J., Gu Y. Development and application of molds for producing large superalloy vacuum electrodes. *Foundry*. 2016, vol. 65, no. 9, pp. 917–919.
16. Koltygin A.V., Bazhenov V.E., Bazlov A.I., Bazlova T.A. Belov V.D. Effect of scrap using in charge on the structure and properties of ZhS6U nickel-based superalloy. Part 1. Microstructure analysis and phase composition of ZhS6U alloy prepared with scrap. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 360–365. (In Russ.).
17. Kovalenko V.S. *Metallograficheskie reaktivy: Sprav. izd.* [Metallographic etchants: Handbook]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 120 p. (In Russ.).
18. Beckert M., Klemm H. *Sposoby metallograficheskogo travleniya: Sprav. izd.* [Methods of metallographic etching]. Trans. from Germ. Moscow: Metallurgiya, 1988, 398 p. (In Russ.).
19. Manjili M.H., Halali M. Removal of non-metallic inclusions from nickel base superalloys by electromagnetic levitation melting in a slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018, vol. 49, no. 1, pp. 61–68.
20. Zhang T., Jiang J., Shollock B.A., Britton T.B., Dunne F.P.E. Slip localization and fatigue crack nucleation near a non-metallic inclusion in polycrystalline nickel–based superalloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, vol. 641, August, pp. 328–339.
21. Baryshev E.E., Kostina T.K., Tyagunov A.G., Savina L.G., Pavlinich S.P., Mysik R.K., Semenova I.P. Influence of high temperature treatment on structure of ZhS6U superalloy in liquid state and during solidification. *Vysokotemperaturnye rasplavy*. 1997, no. 1, pp. 26–31. (In Russ.).

Acknowledgements. The article was prepared on the basis of the work carried out in the framework of Russian Government Decree no. 218 of April 9, 2010. Government Contract no. 02.G25.31.0163.

Information about the authors:

A.V. Koltygin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Foundry Technology and Art Processing of Materials” (misistlp@mail.ru)

V.E. Bazhenov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Foundry Technology and Art Processing of Materials” (v.e.bagenov@gmail.com)

A.I. Bazlov, Engineer of the Laboratory “Advanced Energy Efficient Materials” (andreibazlov@gmail.com)

T.A. Bazlova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Foundry Technology and Art Processing of Materials” (tbazlova@mail.ru)

V.D. Belov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Foundry Technology and Art Processing of Materials” (vdbelov@mail.ru)

Received January 6, 2019

Revised January 6, 2019

Accepted April 4, 2019