

УДК 621.74

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛИТОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛИТКА ВАКУУМНО-ИНДУКЦИОННОЙ ВЫПЛАВКИ ИЗ СПЛАВА INCONEL 718 В УСЛОВИЯХ ПАО «РУСПОЛИМЕТ»

*Демченко А.И.¹, мастер основного производства (a.demchenko@ruspolimet.ru)
Корзун Е.Л.¹, к.т.н., доцент, начальник отдела НИОКР (e.korzun@ruspolimet.ru)
Чернышов Е.А.², д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии
и оборудование» (nil_st@nntu.ru)*

¹ ПАО «Русполимет»

(607018, Россия, Нижегородская обл., Кулебаки, ул. Восстания, 1)

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

(603155, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. Выполнен анализ технологических процессов выплавки и разливки цилиндрических слитков из сплава Inconel 718, полученных в вакуумно-индукционной печи (ВИП) на ПАО «Русполимет». Показано, что существующая технология не обеспечивает получения плотного слитка требуемого качества из-за наличия пористости в осевой зоне, а также ликвации на макроуровне таких элементов, как хром, никель, ниобий. Полученные результаты показали необходимость проведения корректировки параметров разливки и затвердевания слитков ВИП из сплава Inconel 718, не изменяя основных технических параметров производства (тип печи – вакуумно-индукционная печь ВИП емкостью 3 т; материал футеровки печи – керамика на основе оксида алюминия Al_2O_3 ; тип изложницы – цилиндрическая изложница под слиток диам. 410 мм, диаметр кристаллизатора для вакуумно-дугового переплава – 450 мм), чтобы получить качественный плотный слиток. С использованием программы Thermo-Calc (версия 2017a) уточнены температуры солидус для равновесного процесса затвердевания и для неравновесного процесса, которые составили 1211 и 1091 °С соответственно. На основании полученных результатов с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) скорректированы скорость разливки путем уменьшения диаметра разливочного стакана с 32 до 28 мм и температура разливки с 1470 до 1460 °С. По скорректированной технологии выплавлена партия слитков. Из слитка первой партии отобраны поперечные темплеты для определения химического состава и продольные – для проведения металлографического анализа. Выполненные металлографические исследования свидетельствуют о снижении пористости осевой зоны слитка и уменьшении ликвации на макроуровне. На основании полученных результатов предложено внести в технологию разливки соответствующие изменения. Показано, что компьютерное моделирование металлургических процессов разливки и кристаллизации металла дает возможность разработать технологию, позволяющую получить качественный слиток уже на первом переделе, избежав при этом появление продукции, не удовлетворяющей требованиям заказчика.

Ключевые слова: никелевый жаропрочный сплав Inconel 718, вакуумно-индукционная печь, разливка, цилиндрический слиток, макроструктура, пористость, температура разливки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-257-262

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в мире наблюдается рост потребности в жаропрочных сплавах на хромоникелевой основе, изделия из которых обладают сопротивлением к высокотемпературной коррозии и используются при производстве деталей турбинных двигателей для самолетов и других отраслей в нефтяной, химической и атомной промышленности [1, 2]. Существующая технология получения слитков из сплава Inconel 718 базируется на выплавке в вакуумно-индукционной печи (ВИП) [3] с последующим переплавом в вакуумно-дуговой (ВДП) или электрошлаковой (ЭШП) печах [4, 5]. Причинами широкого распространения сплава Inconel 718 являются его хорошая свариваемость, устойчивость к трещинообразованию при высоких температурах [6], хорошая обрабатываемость и высокие механические свойства [4]. При этом осно-

вы качества металла закладываются уже на стадии его выплавки, где основными критериями получения качественных слитков выступают однородность химического состава металла и макроструктура слитков, которые и определяют свойства металла. Сортаментом продукции из сплава Inconel 718, получаемым в ВИП ПАО «Русполимет», являются цилиндрические слитки диам. от 285 до 600 мм, предназначенные для последующего переплава в ЭШП или ВДП.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Высокие механические свойства сплава Inconel 718 достигается [7] за счет легирующих элементов, таких как хром, молибден, вольфрам, ниобий, алюминий и титан, а также микролегирующих присадок, таких как бор, углерод, магний. В работах [1, 8] показано, что ввод бора в небольшом (тысячные доли процента)

количестве приводит к существенным изменениям свариваемости и механических свойств. Несмотря на понимание исследователями влияния каждого легирующего элемента на свойства сплава в отдельности, имеется немного данных об их взаимодействии при одновременном использовании. Поэтому концентрация этих элементов должна находиться в узком (селективном) диапазоне. Единственным агрегатом, позволяющим предотвратить взаимодействие расплава с атмосферой воздуха и обеспечить стабильность химического состава, является ВИП [7]. Имеются данные [9] о возможности испарения примесей цветных металлов из жидкого расплава, таких как свинец, висмут, теллур, селен, медь и других.

В работах [3, 7, 10] выполнен анализ применяемых огнеупоров в ВИП для выплавки жаропрочных сплавов. Показано, что наиболее оптимальной является футеровка на основе оксида алюминия Al_2O_3 , которая позволяет минимизировать химические реакции восстановления материала активными компонентами расплава. Кроме того, ее высокая огнеупорность позволяет провести перегрев расплава, который снижает вредное влияния примесей [11], вносимых вследствие повторных вовлечений отходов сплава.

Для рафинирования расплава от неметаллических включений разливка металла производится через промежуточный ковш, содержащий фильтры и перегородки, позволяющие уловить включения размером более 15 мкм. Выбор режима разливки металла является ключевым в получении плотного однородного слитка хорошего качества [12, 13].

В зависимости от вида конечной продукции и требуемого качества металла, на сегодняшний день переплав слитков-ВИП (расходуемых электродов) производится в ВДП либо в ЭШП [4, 7]. При электрошлаковом переплаве происходит очистка расплава от неметаллических включений благодаря увеличению удельной площади взаимодействия расплавленного металла с рафинирующим шлаком по сравнению с агрегатом печь-ковш, а также обеспечивается направленная кристаллизация слитка, способствующая получению более плотной структуры. Процесс вакуумно-дугового переплава способствует частичному удалению примесей цветных металлов и растворенных газов, а также частичному снижению ликвации в слитке и снижению количества неметаллических включений. Для достижения повышенных служебных свойств металла перед вакуумно-дуговым переплавом иногда проводят [7] электрошлаковый переплав – так называемый триплекс процесс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Слитки-ВИП (расходуемые электроды) из сплава Inconel 718 выплавляли в вакуумно-индукционных печах, разливку проводили по двум вариантам технологии (см. ниже) через специальный промежуточный

ковш [14], футерованный керамикой с содержанием оксида алюминия Al_2O_3 более 85 %. Ниже приведены основные параметры разливки и охлаждения слитков-ВИП (расходуемых электродов) из сплава Inconel 718 диам. 410 мм:

Вариант технологии	1	2
Линейная скорость разливки, мм/мин	920	805
Время охлаждения слитка в аргоне, мин	30	30
Время охлаждения слитка на воздухе, мин	90	135
Температура разливки, °С	1470	1460

Для оценки формирования структуры слитка отобрали продольные темплеты (рис. 1). Выполненный металлографический анализ показал наличие либо осевой пористости [15] и V-образной неоднородности характерной для удлиненных слитков [16], вызванной первичной ликвацией [17], либо газовых пузырей (предположительно азота), механизм образования которых описан в работе [18].

Для оценки развития ликвационных процессов отобрали поперечные темплеты из-под прибыльной части слитка в соответствии с нормативными документами ПАО «Русполимет». Наблюдали отклонение по содержанию некоторых элементов от значений в конечной пробе жидкого металла, отобранной перед началом разливки (см. таблицу). Отклонений по содержанию таких элементов, как сера, фосфор и углерод не наблюдали.

Известно, что в сплаве Inconel 718 возможно развитие ликвации ниобия [9, 19] и бора [8]. В то же время недостаточно данных о ликвации хрома, никеля, молибдена. Мы предположили, что в нашем случае ликвация рассматриваемых элементов связана с параметрами разливки.

Полученные слитки подвергали абразивной зачистке поверхности, а далее переплавляли на ВДП-2,5 в кристаллизатор диам. 450 мм. При вакуумно-дуговом переплаве слитков-ВИП (расходуемых электродов) наблюдали нестабильность переплава, характеризующуюся колебаниями силы тока и напряжения, косвенно



Рис. 1. Макроструктура слитка ВИП из сплава Inconel 718, разлитого по варианту 1

Fig. 1. Macrostructure of VIM bar from the Inconel 718 alloy, casted according to the variant 1

Средние отклонения химического состава от целевых значений в пределах одного поперечного темплета

Average deviations of the chemical composition from the target values within a single transverse template

Показатель	Легирующий элемент						
	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	B
Среднее относительное отклонение от значений конечной пробы, % (по массе)	0,40	0,70	0,20	0,05	0,10	0,25	0,002
Погрешность определения содержания элементов, % (по массе)	0,15	0,30	0,10	0,03	0,05	0,12	0,001

связанных с наличием пор в электроде (рис. 2), а также падениями уровня вакуума.

Полученные результаты показали необходимость проведения корректировки параметров разливки и затвердевания слитков в ВИП из сплава Inconel 718.

Одним из эффективных методов определения этих параметров является компьютерное моделирование с использованием программного пакета Thermo-Calc (версия 2017a). Поскольку решающее значение на формирование физической неоднородности слитка оказывает разность температур ликвидус и солидус, а также перепад температур в двухфазной области [20, 21], уточнены температуры солидус для равновесного процесса затвердевания и для неравновесного процесса (который учитывает обогащение жидкой фазы на фронте кристаллизации такими элементами, как углерод, азот, бор), которые составили 1211 и 1091 °С соответственно.

С целью снижения осевой пористости и уменьшения химической неоднородности металла проведено компьютерное моделирование процесса разливки и за-

твердевания слитка, на основании результатов которого были скорректированы скорость разливки путем уменьшения диаметра разливочного стакана с 32 до 28 мм и температуры разливки на 10 °С.

Моделирование проводили с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), которая использует для решения поставленной задачи метод конечных элементов. Для этого объем трехмерной математической модели разбивается на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции, причем значение функции на границах элементов заранее неизвестно и является ее решением. Итогом результатом расчета является трехмерное представление отливки (слитка, формы и т.п.) с отображением температурных полей, доли жидкой фазы, значением усадки в зависимости от времени заливки. Программа учитывает снижение температуры солидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc (версия 2017a), в процессе кристаллизации слитка, что происходит за счет изменения химического состава

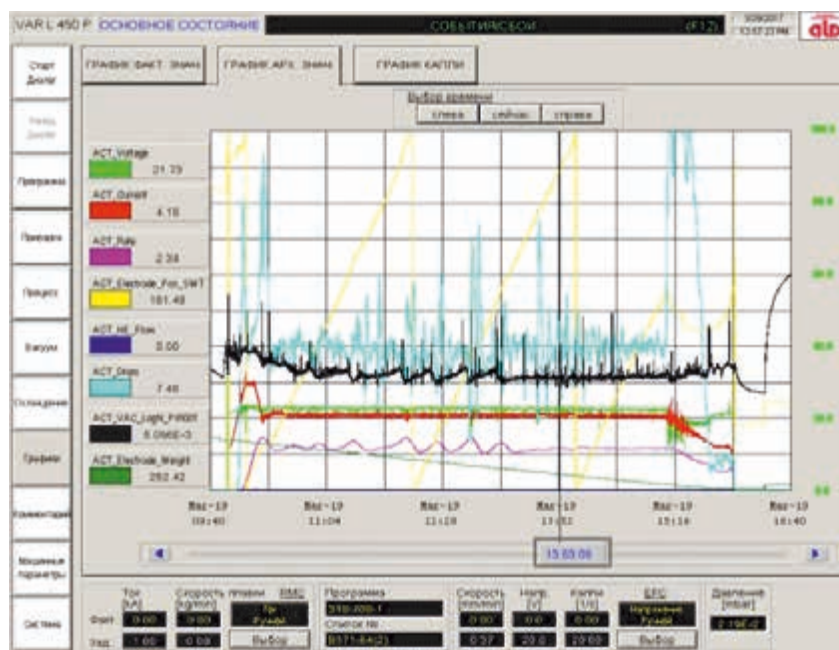


Рис. 2. Компьютерный вид диаграммы переплава расходоуемого электрода из сплава Inconel 718, разлитого по варианту 1

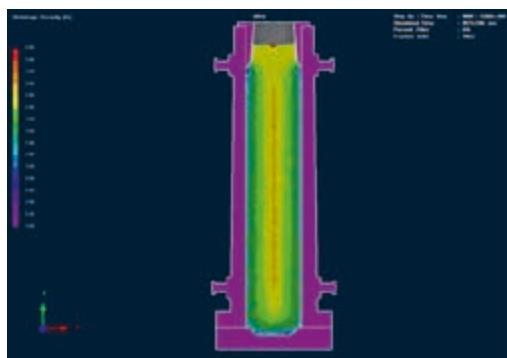
Fig. 2. Diagram of remelting of consumable electrode from the Inconel 718 alloy, casted according to the variant 1

ва в сторону снижения количества тугоплавких компонентов. Результаты моделирования формирования структуры слитков, рассчитанные для двух вариантов технологии, представлены на рис. 3. Слиток, отлитый по первому варианту технологии, имеет в продольном сечении несколько зон с различной пористостью, а слиток, разлитый по второму варианту технологии, имеет зону с характерной для цилиндрического слитка пористостью в центральной части.

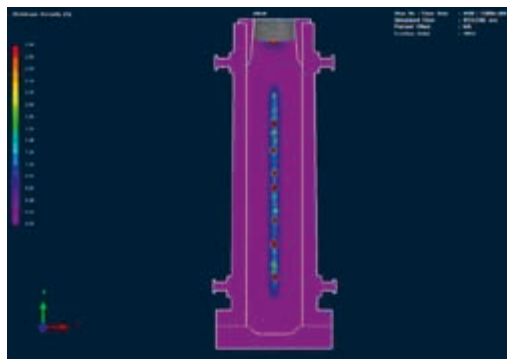
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с результатами, полученными в процессе компьютерного моделирования, были скорректированы параметры разливки и затвердевания слитков (снижены скорость разливки с 920 до 805 мм/мин и температура разливки на 10 °С, увеличено время охлаждения слитка на воздухе с 90 до 135 мин) и выплавлена партия слитков по измененным параметрам. От одного из слитков отобрали продольные темплеты (рис. 4).

Как видно (рис. 4), в осевой зоне слитка, отлитого по варианту 2 после корректировки параметров разливки, почти полностью отсутствует осевая неоднородность, что свидетельствует о корректности выбранных параметров.



а



б

Рис. 3. Результаты моделирования процесса формирования структуры слитков Inconel 718, разлитых по вариантам 1 (а) и 2 (б)

Fig. 3. Results of the modeling of structure forming of the Inconel 718 bars, casted according to the variants 1 (a) and 2 (b)



Рис. 4. Макроструктура слитка Inconel 718, разлитого по варианту 2

Fig. 4. Macrostructure of the Inconel 718 bar, casted according to variant 2

Были отобраны поперечные темплеты для определения химического состава сплава. Наблюдали снижение ликвации, проявившееся в уменьшении относительного отклонения содержания легирующих элементов от значений в конечной пробе жидкого металла. Средние отклонения химического состава от целевых значений в пределах одного поперечного темплета для слитков, разлитых по второму варианту технологии, представлены ниже:

Легирующий элемент	Среднее относительное отклонение от значений конечной пробы, % (по массе)
Cr	0,250
Ni	0,400
Mo	0,100
Al	0,050
Ti	0,050
Nb	0,150
B	0,001

Выводы

Расчетным путем с использованием компьютерной программы Thermo-Calc (версия 2017a) определены температуры солидус для процессов равновесного и неравновесного затвердеваний, которые составили 1211 и 1091 °С соответственно. Это позволило снизить температуру разливки металла с 1470 до 1460 °С. На основании результатов компьютерного моделирования произведена корректировка скорости разливки путем уменьшения диаметра сталеразливочного стакана с 32 до 28 мм, что позволило снизить ликвацию и осевую пористость. Показано, что слитки-ВИП (расходуемые электроды), разлитые по скорректированным на основании результатов компьютерного моделирования параметрам (скорости и температуры разливки), имеют более плотную структуру, что привело к стабилизации процесса ВДП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Xiao L., Chen D.L., Chaturvedi M.C. Effect of Boron on the Low-Cycle Fatigue Behavior and Deformation Structure of Inconel 718 at 650 °C // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004. November. Vol. 35. Issue 11. P. 3477 – 3487.
- Eich A., Franz H., Scholz H., Kemmer H., Brückmann G. Gaseous Treatment in Vacuum Induction Degassing (VID) unit for low carbon alloys. 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging, 2012. P. 1 – 6.
- Choudhury A., Kemmer H., Donachie M., Donachie S., Erickson G.L. Vacuum Induction Melting // *ASM Handbook*. Vol. 15. Handbook Committee, 2008. Vol. 15. P. 1 – 8.
- Edward A. Loria. Recent Developments in the Progress of Superalloy 718 // *JOM*. 1992. June. P. 33 – 36.
- Bartosinski M., Magee John H., Friedrich B. Improving the chemical homogeneity of austenitic and martensitic stainless steels during nitrogen alloying in the pressure electro slag remelting (PESR) process [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.metallurgie.rwthachen.de/old/images/pages/publikationen/aertosinskimae_id_4297.pdf. (дата обращения: 03.05.2018 г.).
- Kronovsky G.A., Sieslak M.J., Headley T.J., Romig A.D., Hammett Jr., Hammett W.F. Inconel 718: A solidification diagram // *Metallurgical Transactions A*. 1989. Vol. 20. Issue 10. P. 2149 – 2158.
- Alok Choudhury. State of the Art of Superalloy Production for Aerospace and Other Application Using VIM/VAR or VIM/ESR // *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. No. 5. P. 563 – 574.
- Talukder Alam, Peter J. Felfer, Mahesh Chaturvedi, Leigh T. Stephenson, Matthew R. Kilburn, Julie M. Cairney. Segregation of B, P, and C in the Ni-Based Superalloy, Inconel 718 // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 43A. P. 2183 – 2191.
- Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
- Линчевский Б.В. Вакуумная индукционная плавка. – М.: Металлургия, 1975. – 240 с.
- Баум Б.А., Ларионов В.Н., Коваленко Л.В., Тягунов Г.В., Кулешова Е.А., Барышев Е.Е., Третьякова Е.Е., Колотухин Э.В. Ресурсосбережение и улучшение служебных характеристик отливок из жаропрочных никелевых сплавов посредством высокотемпературной обработки расплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://viam.ru/public/files/1991/1991-200908.pdf>. (дата обращения: 03.05.2018 г.).
- Ефимов В.А. Теоретические основы разливки стали. – Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1960. – 180 с.
- Еронько С.П., Быковских С.В. Разливка стали: технология, оборудование. – Киев: Техника, 2003. – 216 с.
- INTECO special melting technologies GmbH. Справочник по эксплуатации. 8600 Bruck an der Mur AUSTRIA. – 660 с.
- Liu W.C., Yao M., Chen Z.L., Wang S.G. Niobium segregation in Inconel 718 // *Journal of Materials Science*. 1999. Vol. 34. Issue 11. P. 2583 – 2586.
- Швед Ф.И. Слиток вакуумного дугового переплава. – Челябинск: ООО Изд-во Татьяна Лурье, 2009. – 428 с.
- Дефекты стали / Под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
- Галкин А.Н. Исследование влияния теплофизических условий затвердевания и формы слитка для полых заготовок на его строение и распределение неметаллических включений: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.16.02. – Волгоград, 2015. – 18 с.
- Капуткина Е.А. Атлас дефектов стали / Под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.
- Зубарев К.А., Котельников Г.И., Титова К.О., Семин А.Е., Михайлов М.А. Прогнозирование температуры ликвидус сложнелегированных сплавов на основе никеля // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 9. С. 644 – 649.
- Валуев Д.В. Разливка и кристаллизация стали и сплавов. – Томск: изд. Томского политехнического университета, 2009. – 235 с.

Поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.
После доработки 12 сентября 2018 г.
Принята к публикации 25 января 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 4, pp. 257–262.

QUALITY IMPROVEMENT OF CAST CYLINDRICAL BAR OF VACUUM INDUCTION MELTING FROM INCONEL 718 ALLOY AT PJSC “RUSPOLIMET”

A.I. Demchenko¹, E.L. Korzun¹, E.A. Chernyshov²

¹JSC “Ruspolimet”, Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The analysis of technological processes of smelting and casting of cylindrical bars from Inconel 718 alloy, obtained in a vacuum induction furnace at PJSC “Ruspolimet”, was performed. The existing technology does not ensure the production of a sound bar of the required quality due to the presence of porosity in the axial zone, and also due to liquation at the macro level of elements such as chromium, nickel, niobium. The results have shown the need to adjust the parameters of casting and solidification of bars from the Inconel 718 alloy. The task to get high-quality sound bar was set without changing the main technical parameters of production, namely: type of furnace – vacuum induction furnace with capacity of 3 tons; material of the furnace lining – ceramics based on aluminum oxide Al₂O₃; type of the casting mold – cylindrical mold for bar diameter of 410 mm; diameter of crystallizer for vacuum-arc remelting – 450 mm. With the use of the Thermo-Calc program (version 2017a), the solidus temperatures for the equilibrium solidification process and for the non-equilibrium process were clarified, which were 1211 °C and 1091 °C, respectively. Based on the results obtained, the casting speed (SCMLP) system

corrects casting speed by reducing the diameter of the casting nozzle from 32 to 28 mm and casting temperature by reducing it from 1470 to 1460 °C. According to the corrected technology, a batch of bars has been smelted. From the bar of the first batch, transverse templates were selected to determine the chemical composition and longitudinal templates for metallographic analysis. Metallographic studies have been carried out that suggest a decrease in porosity of axial zone of the bar and a decrease in phase separation at the macro level. Based on the results obtained, the authors proposed to introduce appropriate changes in casting technology. It is shown that computer modeling of metallurgical processes of metal casting and crystallization allows developing a technology of obtaining a high-quality bar already at the first redistribution, while avoiding appearance of products that do not meet customer requirements.

Keywords: nickel heat-resistant alloy Inconel 718, vacuum induction furnace, casting, cylindrical bar, macrostructure, porosity, casting temperature.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-257-262

REFERENCES

- Xiao L., Chen D.L., Chaturvedi M.C. Effect of boron on the low-cycle fatigue behavior and deformation structure of Inconel 718 at

- 650 °C. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004, November, vol. 35, no. 1, pp. 3477–3487.
2. Eich A., Franz H., Scholz H., Kemmer H., Brückmann G. Gaseous treatment in vacuum induction degassing (VID) unit for low carbon alloys. *1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging*, 2012, pp. 1–6.
 3. Choudhury A., Kemmer H., Donachie M., Donachie S., Erickson G.L. Vacuum induction melting. *ASM Handbook*. Vol. 15. Handbook Committee, 2008, pp. 1–8.
 4. Edward A. Loria. Recent developments in the progress of Superalloy 718. *JOM*. 1992, June, pp. 33–36.
 5. Bartosinski M., Magee John H., Friedrich B. *Improving the chemical homogeneity of austenitic and martensitic stainless steels during nitrogen alloying in the pressure electro slag remelting (PESR) process*. Electronic resource. Available at URL: http://www.metallurgie.rwthachen.de/old/images/pages/publikationen/aertosinski-mae_id_4297.pdf. (Accessed 03.05.2018).
 6. Kronovsky G.A., Sieslak M.J., Headley T.J., Romig A.D., Hammetter Jr., Hammetter W.F. Inconel 718: A solidification diagram. *Metallurgical Transactions A*. 1989, vol. 20. Issue 10, pp. 2149–2158.
 7. Alok Choudhury. State of the art of superalloy production for aerospace and other application using VIM/VAR or VIM/ESR. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 5, pp. 563–574.
 8. Talukder Alam, Peter J. Felfer, Mahesh Chaturvedi, Leigh T. Stephenson, Matthew R. Kilburn, Julie M. Cairney. Segregation of B, P, and C in the Ni-based superalloy, Inconel 718. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 43A, pp. 2183–2191.
 9. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinykh dvigatelei* [Cast blades of gas turbine engines]. Moscow: MISSIS, 2001, 632 p. (In Russ.).
 10. Linchevskii B.V. *Vakuumnaya induktsionnaya plavka* [Vacuum induction melting]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 240 p. (In Russ.).
 11. Baum B.A., Larionov V.N., Kovalenko L.V., Tyagunov G.V., Kuleshova E.A., Baryshev E.E., Tret'yakova E.E., Kolotukhin E.V. *Resursosberezhenie i uluchshenie sluzhebnykh kharakteristik otlivok iz zharoprochnykh nikelovykh splavov posredstvom vysokotemperaturnoi obrabotki rasplavov* [Resource saving and improvement of service properties of castings of heat-resistant nickel alloys by means of high-temperature treatment of alloys] Electronic resource. Available at URL: <https://viam.ru/public/files/1991/1991-200908.pdf>. (Accessed 03.05.2018). (In Russ.).
 12. Efimov V.A. *Teoreticheskie osnovy razlivki stali* [Theoretical foundations of steel casting]. Kiev: Izd-vo Akademii nauk Ukrainkoii SSR, 1960, 180 p. (In Russ.).
 13. Eron'ko S.P., Bykovskikh S.V. *Razlivka stali: tekhnologiya, oborudovanie* [Steel casting: technology, equipment]. Kiev: Tekhnika, 2003, 216 p. (In Russ.).
 14. *INTECO special melting technologies GmbH. Operation Guide*. 8600 Bruck an der Mur AUSTRIA, 660 p.
 15. Liu W.C., Yao M., Chen Z.L., Wang S.G. Niobium segregation in Inconel 718. *Journal of Materials Science*. 1999, vol. 34, no. 11, pp. 2583–2586.
 16. Shved F.I. *Slitok vakuumnogo dugovogo pereplava* [Bar of vacuum arc remelting]. Chelyabinsk: OOO "Izd-vo Tat'yany Lur'e", 2009, 428 p. (In Russ.).
 17. *Defekty stali* [Steel defects]. Novokshchenova S.M., Vinograd M.I. eds. Moscow: Metallurgiya, 1984, 199 p. (In Russ.).
 18. Galkin A.N. *Issledovanie vliyaniya teplofizicheskikh uslovii zatverdevaniya i formy slitka dlya polykh zagotovok na ego stroenie i raspredelenie nemetallicheskih vklyuchenii: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.16.02* [Investigation of the influence of thermophysical conditions of solidification and bar shape for hollow billets on its structure and distribution of non-metallic inclusions: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Volgograd, 2015, 18 p. (In Russ.).
 19. Kaputkina E.A. *Atlas defektov stali* [Atlas of steel defects]. Bernshtein M.L. ed. Moscow: Metallurgiya, 1979, 188 p. (In Russ.).
 20. Zubarev K.A., Kotelnikov G.I., Titova K.O., Semin A.E., Mikhailov M.A. Prediction of liquidus temperature of nickel-based complex alloyed steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 644–649. (In Russ.).
 21. Valuev D.V. *Razlivka i kristallizatsiya stali i splavov* [Casting and crystallization of steel and alloys]. Tomsk: izd. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 235 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.I. Demchenko, Master of main Production
(a.demchenko@ruspolymet.ru)

E.N. Korzun, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of R & D Department
(e.korzun@ruspolymet.ru)

E.A. Chernyshov, Dr. Sci. Eng., Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment"
(nil_st@nntu.ru)

Received February 22, 2018

Revised September 12, 2018

Accepted January 25, 2019