

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЛИТЕЙНЫХ ОТХОДОВ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА

Тягунов А.Г., к.т.н., заведующий кафедрой полиграфии и веб-дизайна

*Барышев Е.Е., д.т.н., заведующий кафедрой безопасности
жизнедеятельности (e.e.baryshev@urfu.ru)*

Тягунов Г.В., д.т.н., профессор кафедры безопасности жизнедеятельности

Костина Т.К., к.т.н., доцент кафедры физики

Шмакова К.Ю., к.т.н., доцент кафедры физики

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

Аннотация. В настоящее время при производстве металлургических сплавов все больше используются металлургические отходы. Накопление объема и повышение возраста возврата влияет на загрязненность шихты нежелательными элементами и неметаллическими включениями, что неизбежно приводит к резкому ухудшению структуры и свойств отливки. Данное обстоятельство сказывается на характере поллитерм физических свойств расплава и, соответственно, необходимых температурно-временных параметрах плавки жаропрочного сплава. В работе изучены температурные зависимости удельного электросопротивления, кинематической вязкости и поверхностного натяжения жидких жаропрочных композиций на основе системы Ni–Nb–Cr–Mo. Для сплава ЭП902 установлены критические температуры, нагрев до которых приводит к необратимым интенсивным изменениям в направлении улучшения состояния расплава. Обнаружена взаимосвязь между количеством литейных отходов в шихте с видом и особенностями температурных зависимостей физико-химических свойств расплава. Показано, что увеличение количества литейных отходов при переплаве приводит к повышению критических температур. Изучено влияние состояния расплава на процесс кристаллизации и структуру твердого металла. Процесс затвердевания сплава ЭП902 исследован методом дифференциального термического анализа. Показано, что процесс кристаллизации начинается с выделения твердого раствора на основе γ -фазы, а завершается формированием эвтектики на основе интерметаллида Ni_3Nb . Нагрев расплава выше критических температур приводит к увеличению переохлаждения и практически не влияет на эвтектическую температуру. На основании результатов изучения физико-химических свойств жидкого металла и процесса его кристаллизации предложены режимы высокотемпературной обработки расплава, которые позволяют существенно улучшить качество отливок из жаропрочных сплавов типа ЭП902, содержащих значительное количество литейных техногенных отходов в шихте. Осуществлены механические испытания образцов опытных плавов, проведенных по оптимальному режиму высокотемпературной обработки расплава (ВТОР). Применение ВТОР для плавов с 50 %-ным содержанием литейных отходов в шихте позволило получить у отливок уровень прочностных и пластических свойств, превосходящий технические условия, а также стабилизировать их значения от плавки к плавке.

Ключевые слова: жидкий металл, физико-химические свойства, температурные зависимости, структура, кристаллизация, шихта, литейные отходы, обработка расплава, качество металла.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-222-227

Многолетний опыт металлургического производства свидетельствует, что одним из важнейших резервов уменьшения структурной и химической неоднородности литого металла, повышения качества металлопродукции электросталеплавильного производства является совершенствование технологии процесса выплавки и получение равновесного, максимально однородного расплава перед кристаллизацией [1–3]. Это подтверждают и экспериментальные исследования строения и свойств промышленных металлических расплавов. В зависимости от температуры нагрева, жидкий металл может находиться в неравновесном и равновесном состояниях, что сказывается на его строении и свойствах как в жидком, так и закристаллизованном состоянии [1–6]. Однако в настоящее время в большинстве

случаев кристаллизация промышленного металла происходит из неравновесного состояния, что усиливает химическую и физическую неоднородность твердого металла, снижает его служебные характеристики, приводит к значительным отклонениям качества от плавки к плавке.

Существуют разные способы перевода расплава в равновесие: электромагнитное перемешивание, воздействие ультразвуком, высокочастотные и низкочастотные механические колебания и т. п. [1–3]. Наиболее доступным способом получения равновесного расплава служит тепловое воздействие, названное высокотемпературной обработкой расплавов [2].

Поскольку процесс перехода системы в состояние равновесия в результате ее нагрева происходит немо-

нотонно и сильно ускоряется при достижении критических температур, нагрев металла до этих температур является главной особенностью новых прогрессивных технологий. При охлаждении подготовленного таким образом жидкого металла, его исходная (неравновесная) структура не восстанавливается, т. е. перед кристаллизацией строение расплава оказывается равновесным или близким к нему и существенно отличается от исходного.

По мере использования сплавов в промышленности и увеличения объема их выплавки, в производстве все больше используются металлургические отходы. Существует много различных способов переработки отходов литейного производства [7 – 18]. К ним относятся химическая экстракция легирующих элементов из никелевой матрицы [7, 8], переплав на металлургических предприятиях [9 – 11], применение специальных переплавов [12], регламентированное использование некоторой части возврата при литье заготовок [13 – 18]. Накапливание объема и повышение возраста возврата влияет на загрязненность шихты нежелательными элементами и неметаллическими включениями. Это неизбежно приводит к некоторому, а иногда и резкому ухудшению структуры и свойств отливки [3, 14, 15], должно сказаться на характере политерм физических свойств расплава и, соответственно, необходимых температурно-временных параметрах плавки жаропрочного сплава.

Сплав ЭП902 является среднелегированной жаропрочной композицией на никелевой основе. Особенности легирования сплава (наличие 6 – 7 % Nb, 0,5 – 1,2 % Al, отсутствие в сплаве титана) позволяют получать детали плавкой в открытых индукционных печах [19].

Исследованы политермы кинематической вязкости, плотности и поверхностного натяжения жидкого металла. Анализ политерм изученных свойств позволил установить следующее.

Температурная зависимость кинематической вязкости при нагреве до аномальной температуры $t_{ан}$ подчиняется классическому экспоненциальному закону (рис. 1). В этом случае политермы нагрева и охлаждения совпадают. При достижении температуры выше $t_{ан}$ на политерме обнаруживается скачок абсолютных значений ν , заканчивающийся при критической температуре $t_{к}$. Последующее охлаждение приводит к гистерезису политерм вязкости $\Delta\nu$. Величина несовпадения политерм нагрева и охлаждения $\Delta\nu$ не изменяется при нагреве до 1800 °С, что свидетельствует о перестройке структуры ближнего порядка расплава в интервале температур $t_{ан} - t_{к}$.

Политермы удельного электросопротивления сплава ЭП902 (см. рис. 1) в целом характерны для класса жаропрочных сплавов. При нагреве до определенной температуры $t_{ан}$ происходит резкое увеличение значения ρ , которое достигает максимального уровня при

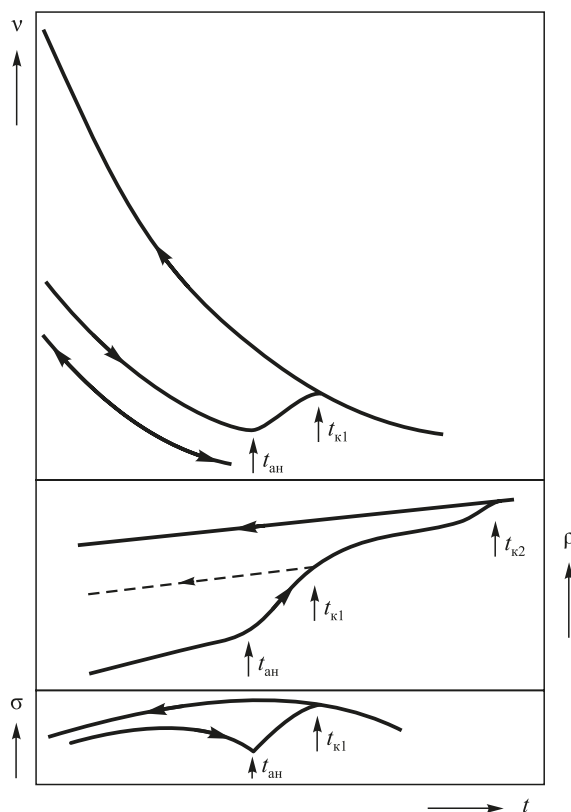


Рис. 1. Характер температурных зависимостей кинематической вязкости ν , удельного электросопротивления ρ и поверхностного натяжения σ сплава ЭП902

Fig. 1. Character of the temperature dependences of kinematic viscosity ν , the electrical resistivity ρ and surface tension σ of EP902 alloy

критической температуре. Дальнейший нагрев характеризуется лишь небольшим изменением термического коэффициента dp/dt , а при охлаждении появляется гистерезис политерм.

Исследование поверхностного натяжения (см. рис. 1) показало, что аномальное изменение структуры происходит в температурном интервале, установленном при изучении политерм ρ и ν . На температурной зависимости наблюдается изменение коэффициента термического расширения, а также гистерезис политерм.

В целом обнаруженные аномальные изменения физических свойств обусловлены интенсивным разрушением неравновесных атомных ассоциаций, наследуемых расплавом от шихтовых материалов, и свидетельствуют о переходе жидкого металла в равновесное состояние [2, 3, 19, 20].

На основании данных об аномальных температурных интервалах и продолжительности изотермических выдержек при них разработаны три варианта режимов высокотемпературной обработки расплава. В процессе освоения технологии учитывали особенности производства сплавов в открытых индукционных печах, в частности такие факторы, как наведение шлака после расплавления шихты, ввод раскислителей по ходу плавки, разливка из печи через промежуточный чайниковый

ковш в предварительно прокаленные формы, состояние футеровки печи и ковша, качество материалов тигля и формы, температурный контроль по ходу плавки, а также использование в шихте до 50 % возврата собственного производства.

Введение в шихту при плавке сплава ЭП902 отходов собственного производства показало, что значения критических температур зависят от их количества. Так, с увеличением доли отходов до 50 % критическая температура возрастает на 40 – 50 °С.

Изучено влияние состояния расплава на процесс кристаллизации и структуру твердого металла. Процесс затвердевания сплава ЭП902 исследован методом дифференциального термического анализа. Кристаллизация сплава начинается с выделения кристаллов твердого никелевого раствора на основе γ -фазы. При последующем охлаждении начинает выделяться двойная эвтектика на основе γ - и γ' -фаз. Для сплава ЭП902 γ' -фаза имеет состав Ni_3Nb . На последних стадиях кристаллизации выделяются тройная и более сложные эвтектики. Несколько ниже температуры солидус из γ -твердого раствора выделяются мелкодисперсные частицы вторичной γ' -фазы игольчатой морфологии.

Многочисленные плавки, проведенные с учетом перечисленных технологических факторов и режимов высокотемпературной обработки расплава (ВТОР), показали возможность получения сплава ЭП902, соответствующего по качеству требованиям технических условий. Результаты механических испытаний образцов опытных плавки сплава ЭП902, проведенных по оптимальному режиму ВТОР, приведены в табл. 1. При этом измельчается зерно (рис. 2), достигается благоприятная микроструктура, а также некоторое повышение уровня прочностных характеристик при комнатной и рабочей температурах, играющих важную роль при производстве металлоизделий, например стальных труб и листов [21 – 30].

Исследования показали, что основной причиной низкой пластичности и ударной вязкости, а также нестабильности свойств сплава от плавки к плавке является наличие литейных дефектов, наблюдаемых на изломах испытанных образцов.

Влияние условий выплавки на механические свойства сплава ЭП902 при разных температурах

Table 1. Influence of the melting conditions on mechanical properties of EP902 alloy at different temperatures

Температура испытаний, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	a_k , Дж/см ²
Режим традиционной технологии выплавки					
20	845	720	6,9	12,7	4,20
700	750	708	4,5	10,5	3,10
Режим опытной технологии выплавки					
20	916	779	10,6	19,4	4,90
700	798	687	5,0	13,4	4,05

С целью выявления природы таких дефектов на сканирующем микроскопе выполнен поэлементный микроанализ дефектных участков излома. В отличие от химического состава матрицы сплава, обнаружено большое количество титана в дефектной области, а также вольфрам, никель и хром. Отсутствие элементов, входящих в состав раскислителей и шлака, а именно кальция, церия и магния, позволяет сделать вывод о том, что технологический процесс выплавки в открытой индукционной печи и литья не вносит существенного вклада в образование дефектов.

Однако поэтапный анализ всего производственного процесса показал возможный путь появления в сплаве титана, не входящего в марочный состав. Использование в шихте неконтролируемого металлолома, а затем накопление титана от плавки к плавке за счет возврата собственного производства в виде обрезки прибыльной части привело к образованию труднорастворимых соединений с участием титана и ухудшению качества литья.

Разрушение труднорастворимых соединений происходит, по данным изучения температурных зависимостей физических свойств расплава, при второй критической температуре, близкой к 1850 °С [2]. Нагрев

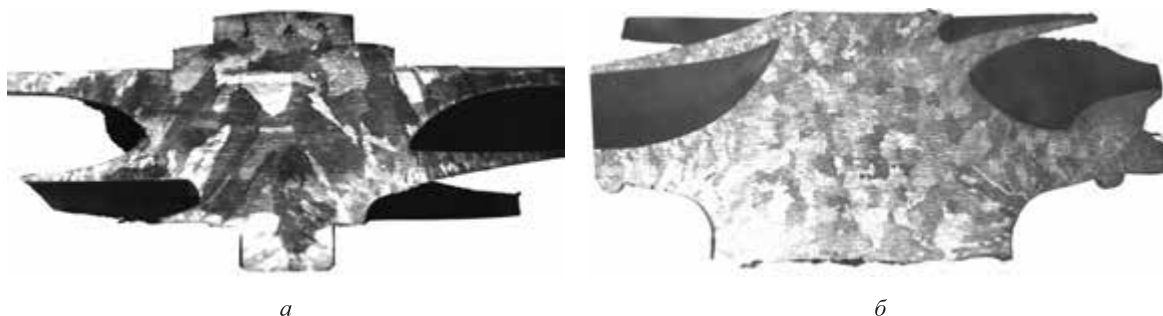


Рис. 2. Макроструктура отливок из сплава ЭП902, полученных по традиционной (а) и опытной (б) технологии

Fig. 2. Macrostructure of the castings made of EP902 alloy obtained using the traditional (a) and experimental (b) technologies

расплава до такой температуры на многих производствах либо технически неосуществим, либо экономически исключительно нецелесообразен.

Учитывая, что структурные изменения основы сплава ЭП902, т. е. легированного γ -твердого раствора, осуществляется в интервале температур $t_{ан} - t_{кл}$ (~1650 – 1700 °С), рекомендуемый нагрев по оптимальной технологии ВТОР не должен превышать этих значений.

При проведении опытных плавов замечено измельчение сложных дефектных образований, при этом за счет индукционного перемешивания расплава наблюдается их более равномерное распределение в литом металле.

Исследования структуры изломов и их поэлементный микроанализ показали, что в образцах опытной технологии присутствуют лишь единичные и небольшие по размерам дефектные области, содержащие титан, либо они отсутствуют, но только в плавках, не содержащих титан в шихте.

Результаты механических испытаний образцов опытных плавов, проведенных по оптимальному режиму ВТОР, приведены в табл. 2. Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что опытная технология приводит к существенному повышению уровня свойств относительно регламентируемых значений.

Таким образом, оптимизация режимов высокотемпературной обработки при выплавке сплава ЭП902 позволяет значительно уменьшить дефектность литого металла, повысить и стабилизировать уровень механических свойств, а также стабилизировать их значения от плавки к плавке.

Выводы. Предложены мероприятия по использованию техногенных металлургических отходов при про-

изводстве высококачественных прецизионных сплавов. Для этого изучены температурные зависимости физических свойств жидких жаропрочных композиций на основе системы Ni–Nb–Cr–Mo. Для сплава ЭП902 установлены критические температуры, нагрев до которых приводит к необратимым интенсивным изменениям в направлении улучшения состояния расплава. Обнаружена взаимосвязь между количеством литейных отходов в шихте с видом и особенностями температурных зависимостей физико-химических свойств расплава. С возрастанием количества отходов повышаются критические температуры, свидетельствующие о переходе расплава в равновесное состояние. Использование высокотемпературной обработки расплава позволяет существенно улучшить качество отливок из жаропрочных сплавов типа ЭП902, содержащих значительное количество литейных техногенных отходов в шихте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еланский Г.Н., Еланский Д.Г. Строение и свойства металлических расплавов. – М.: МГММИ, 2006. – 228 с.
2. Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Цепелев В.С. Жидкие металлы. Стали и сплавы. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 358 с.
3. Барышев Е.Е., Тягунов А.Г., Степанова Н.Н. Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных сплавов в твердом состоянии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 199 с.
4. Yin F.S., Sun X.F., Guan H.R., Hu Z.Q. Effect of thermal history on liquid structure of cast nickel-base superalloy M963 // Journal of Alloys and Compounds. 2004. Vol. 364. P. 225 – 228.
5. Gao Z., Hu R., Zhang T. etc. Structure transitions near liquidus and the nucleation of undercooled melt of Ni-Cr-W superalloy // Physica B. 2014. Vol. 454. No. 1. P. 8 – 14.
6. Liu L., Zhen B.L., Banerji A. etc. Effect of melt homogenisation temperature on the cast structure of IN 738 superalloy // Scripta Metallurgica et Materialia. 1994. Vol. 30. P. 593 – 598.
7. DeBarbadillo J.J. Nickel-base superalloys; physical metallurgy of recycling // Metallurgical Transaction A. 1983. Vol. 14. No. 2. P. 329 – 341.
8. Srivastava R.R., Kim M.-S., Lee J.-C. etc. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges // Journal of Materials Science. 2014. Vol. 49. No. 14. P. 4671 – 4686.
9. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Kablo D.E. Highly efficient technologies and modern equipment for obtaining semifinished products made of heat-resistant foundry alloys for use as charge materials // Metallurgist. 2012. Vol. 56. No. 5–6. P. 329 – 335.
10. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Processing superalloy foundry waste generated at engine building and repair plants: Experience of the all-russia research institute of aviation materials // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 1–2. P. 69 – 74.
11. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Resources-saving technology for recycling of grade waste products cast from superalloys // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 5–6. P. 360 – 366.
12. Prasad V.V.S., Rao A.S., Prakash U. etc. Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting // ISIJ International. 1996. Vol. 36. No. 12. P. 1459 – 1464.
13. Yu J.J., Sun X.F., Lou J.X. etc. Recycled Applications of a single crystal superalloy // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 239–242. P. 1422 – 1427.
14. Rahimi R., Ahmabadi M.N. Recycling of reverted IN738LC with references to mechanical properties and control of chemical composition // TMS Annual Meeting. 2012. P. 417 – 424.

Таблица 2

Влияние условий выплавки и количества литейных отходов в шихте на механические свойства сплава ЭП902

Table 2. Influence of melting conditions and the amount of foundry waste in charge on the mechanical properties of EP902 alloy

Количество литейных отходов в шихте, %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	a_k , Дж/см ²
Режим традиционной технологии выплавки					
0	845	720	6,9	12,7	4,2
50	750	708	4,5	10,5	1,1
Режим опытной технологии выплавки					
0	916	779	10,6	19,4	4,9
50	860	687	8,8	17,4	4,1
Требования технических условий					
–	800	600	8	15	3,0

15. Utada S., Joh Y., Osawa M. etc. High temperature properties of a single crystal superalloy PWA1484 directly recycled after turbine blade use // *Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys*. 2016. Vol. 2016. P. 589 – 599.
16. Utada S., Joh Y., Osawa M. etc. Direct recycle of used single crystal superalloy turbine blades // *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*. Tokyo. 2015. P. 1039 – 1043.
17. Man Y.-L., Wang Y.-F., Yu X.-F. etc. Effects of reverts on initial melting temperature and stress-rupture life of K417G superalloy // *Zhuzao/Foundry*. 2015. Vol. 64. No. 3. P. 251 – 255.
18. Yang Y.H., Yu J.J., Sun X.F. etc. Effect of revert addition on microstructure and mechanical properties of M951 Ni-base superalloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 532. P. 6 – 12.
19. Tyagunov A.G., Baryshev E.E., V'yukhin V.V. etc. Increasing the quality of the EP902 alloy using its properties in the liquid and solid states // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014. Vol. 12. P. 992 – 994.
20. Dong J., Qu W., Wang D. etc. Effect of temperature of melt superheat treatment on microstructure and mechanical properties of recycled Ni-base superalloy K417 // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2010. Vol. 39. No. 8. P. 1480 – 1483.
21. Шинкин В.Н. Расчет кривизны стального листа при правке на восьмироликовой машине // *Черные металлы*. 2017. № 2. С. 46 – 50.
22. Шинкин В.Н. Расчет изгибающих моментов стального листа и реакций опор рабочих роликов при правке на восьмироликовой машине // *Черные металлы*. 2017. № 4. С. 49 – 53.
23. Шинкин В.Н. Расчет параметров листогибочных несимметричных трехвалковых вальцов при производстве стальных труб // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 285 – 291.
24. Шинкин В.Н. Разрушение стальных труб большого диаметра при дефекте раскатной пригар // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 6. С. 436 – 442.
25. Шинкин В.Н. Упрощенный метод расчета изгибающих моментов стального листа и реакций рабочих роликов в многороликовой правильной машине // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 777 – 784.
26. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 13. P. 33 – 37.
27. Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge // *CIS Iron and Steel Review*. 2017. Vol. 13. P. 44 – 47.
28. Тягунов А.Г., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В. и др. Систематизация политерм физических свойств металлических расплавов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 4. С. 310 – 317.
29. Тягунов А.Г., Вьюхин В.В., Тягунов Г.В. и др. Влияние концентрации хрома на процесс структурообразования жидких хромоникелевых сплавов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 8. С. 565 – 570.
30. Тягунов А.Г., Барышев Е.Е., Тягунов Г.В., Михайлов В.Б. Эффективная технология производства жаропрочных сплавов ЭП220 и ЭП929 с использованием высокотемпературной обработки расплава // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. Т. 56. № 9. С. 26 – 29.

Поступила в редакцию 11 декабря 2017 г.
 После доработки 18 января 2018 г.
 Принята к публикации 21 февраля 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 3, pp. 222–227.

USING MELT HIGH-TEMPERATURE TREATMENT FOR PROCESSING FOUNDRY WASTES OF HEAT-RESISTANT ALLOY

*A.G. Tyagunov, E.E. Baryshev, G.V. Tyagunov, T.K. Kostina,
K.Yu. Shmakova*

**Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia**

Abstract. At present time, metallurgical wastes are used in metallurgical alloys production more and more. The volume accumulation and increase of return age effect on charge pollution by undesirable elements and nonmetallic inclusions. As a result, structure and properties of the casting inevitably get worse. This circumstance must influence on polytherm's character of physical properties of the melt, necessary temperature and time parameters of the heat-resistant alloy's melting accordingly. We have researched the temperature dependences of electrical resistance and kinematic viscosity of liquid heat-resistant composites based on Ni–Nb–Cr–Mo systems. The critical temperatures were determined for the EP902 alloy. Heating up to these temperatures leads to irreversible changes in direction of the melt improving. Interaction was found between the amount of foundry waste and features of temperature dependences of the melt physico-chemical properties. An increase in the amount of foundry waste using in remelting results in the critical temperatures increasing. Influence of the melt conditions on crystallization process and on the structure of hard metal has been studied. The process of alloy EP902 solidification was researched by differential thermal analysis method. It has shown that the crystallization process starts with extraction of solid solution on the base of γ -phases and ends with forming of the eutectic based on the Ni₃Nb intermetallic compound. Heating of the melt over the critical temperature leads to an increase of supercooling and does not effect on the eutectic temperature. The processing mode of the high temperature melt treatment was proposed based on the research results of physico-chemical properties

of the liquid metal and process of the melt crystallization. It allows obtaining the highest quality of casting of heat-resistant EP902 alloy, which contains significant amount of foundry waste in the charge. The mechanical tests were implemented for experimental samples melted out by the optimal mode of high-temperature melt treatment (HTTM). Application of HTTM for the melts, contained 50 % of foundry waste in charge, allows obtaining the level of strength and plastic properties exceeding the technical requirements, stabilizing and combining it from melt to melt.

Keywords: liquid metal, physico-chemical properties, temperature dependence, structure, crystallization, charge, foundry wastes, melt treatment, metal quality.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-3-222-227

REFERENCES

1. Elanskii G.N., Elanskii D.G. *Stroenie i svoistva metallicheskih rasplavov* [Structure and properties of metallic melts]. Moscow: MGVI, 2006, 228 p. (In Russ.).
2. Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Tsepelev V.S. *Zhidkie metally. Stali i splavy* [Liquid metals. Steels and alloys]. Ekaterinburg: UrFU, 2016, 358 p. (In Russ.).
3. Baryshev E.E., Tyagunov A.G., Stepanova N.N. *Vliyanie struktury rasplava na svoistva zharoprochnykh splavov v tverdom sostoyanii* [Influence of the melt structure on properties of heat-resistance alloys in solid state]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2010, 199 p. (In Russ.).
4. Yin F.S., Sun X.F., Guan H.R., Hu Z.Q. Effect of thermal history on liquid structure of cast nickel-base superalloy M963. *Journal of Alloys and Compounds*. 2004, vol. 364, pp. 225–228.

5. Gao Z., Hu R., Zhang T., Wang J., Li J. Structure transitions near liquidus and the nucleation of undercooled melt of Ni-Cr-W superalloy. *Physica B*. 2014, vol. 454, no. 1, pp. 8–14.
6. Liu L., Zhen B.L., Banerji A., Reif W., Sommer F. Effect of melt homogenisation temperature on the cast structure of IN 738 superalloy. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1994, vol. 30, pp. 593–598.
7. DeBarbadillo J.J. Nickel-base superalloys; physical metallurgy of recycling. *Metallurgical Transaction A*. 1983, vol. 14, no. 2, pp. 329–341.
8. Srivastava R.R., Kim M.-S., Lee J.-C., Jha M.K., Kim B.-S. Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of Materials Science*. 2014, vol. 49, no. 14, pp. 4671–4686.
9. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Kablo D.E. Highly efficient technologies and modern equipment for obtaining semi-finished products made of heat-resistant foundry alloys for use as charge materials. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 5–6, pp. 329–335.
10. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Processing superalloy foundry waste generated at engine building and repair plants: Experience of the all-russia research institute of aviation materials. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 1–2, pp. 69–74.
11. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Resource-saving technology for recycling of grade waste products cast from superalloys. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5–6, pp. 360–366.
12. Prasad V.V.S., Rao A.S., Prakash U., Rao V.R., Rao P.K., Gupt K.M. Recycling of superalloy scrap through electro slag remelting. *ISIJ International*. 1996, vol. 36, no. 12, pp. 1459–1464.
13. Yu J.J., Sun X.F., Lou J.X., Lang H.X., Guan H.R., Hu Z.Q. Recycled Applications of a single crystal superalloy. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 239–242, pp. 1422–1427.
14. Rahimi R., Ahmadabadi M.N. Recycling of reverted IN738LC with references to mechanical properties and control of chemical composition. *TMS Annual Meeting*. 2012, pp. 417–424.
15. Utada S., Joh Y., Osawa M., Yokokawa T., Kobayashi T., Kawagishi K., Suzuki S., Harada H. High temperature properties of a single crystal superalloy PWA1484 directly recycled after turbine blade use. *Superalloys 2016: Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys*. 2016, vol. 2016, pp. 589–599.
16. Utada S., Joh Y., Osawa M., Yokokawa T., Kobayashi T., Kawagishi K., Suzuki S., Harada H. Direct recycle of used single crystal superalloy turbine blades. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo*. 2015, pp. 1039–1043.
17. Man Y.-L., Wang Y.-F., Yu X.-F., Ni W., Wang X.-Y., Yang G. Effects of reverts on initial melting temperature and stress-rupture life of K417G superalloy. *Zhuzao/Foundry*. 2015, vol. 64, no. 3, pp. 251–255.
18. Yang Y.H., Yu J.J., Sun X.F., Jin T., Guan H.R., Hu Z.Q. Effect of revert addition on microstructure and mechanical properties of M951 Ni-base superalloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2012, vol. 532, pp. 6–12.
19. Tyagunov A.G., Baryshev E.E., V'yukhin V.V., Kostina T.K., Kolotukhin E.V. Increasing the quality of the EP902 alloy using its properties in the liquid and solid states. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 12, pp. 992–994.
20. Dong J., Qu W., Wang D., Lou L., Yang K., Sun X. Effect of temperature of melt superheat treatment on microstructure and mechanical properties of recycled Ni-base superalloy K417. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2010, vol. 39, no. 8, pp. 1480–1483.
21. Shinkin V.N. Calculation of steel sheet's curvature for its flattening in the eight-roller straightening machine. *Chernye Metally*. 2017, no. 2, pp. 46–50.
22. Shinkin V.N. Calculation of bending moments of steel sheet and support reactions under flattening on the eight-roller straightening machine. *Chernye Metally*. 2017, no. 4, pp. 49–53.
23. Shinkin V.N. Calculation of parameters of the asymmetrical three-roller sheet-bending rolls in steel pipes production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 4, pp. 285–291. (In Russ.)
24. Shinkin V.N. Destruction of large-diameter steel pipes at rolled burnt on defect. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 436–442. (In Russ.)
25. Shinkin V.N. Simplified method for calculation of bending moments of steel sheet and reactions of working rollers in multiroll straightening machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 777–784. (In Russ.)
26. Shinkin V.N. Calculation of technological parameters of O-forming press for manufacture of large-diameter steel pipes. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 33–37.
27. Shinkin V.N. Mathematical model of technological parameters' calculation of flanging press and the formation criterion of corrugation defect of steel sheet's edge. *CIS Iron and Steel Review*. 2017, vol. 13, pp. 44–47.
28. Tyagunov A.G., Baryshev E.E., Tyagunov G.V., Mushnikov V.S., Tsepelev V.S. Systematization of physical properties polytherms of metallic melts. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 4, pp. 310–317. (In Russ.)
29. Tyagunov A.G., V'yukhin V.V., Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Akshentsev Y.N. Effect of chromium concentration on the structure formation process of liquid chrome-nickel alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 8, pp. 565–570. (In Russ.)
30. Tyagunov A.G., Baryshev E.E., Tyagunov G.V., Mikhailov V.B. Efficient technology of superalloys EP220 and EP929 production using high-temperature melt preparing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 9, pp. 26–29. (In Russ.)

Information about the authors:

A.G. Tyagunov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Printing and Web-Design

E.E. Baryshev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Leading Researcher, Head of the Chair of Life Safety (e.e.baryshev@urfu.ru)

G.V. Tyagunov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Life Safety
T.K. Kostina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics

K.Yu. Shmakova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics

Received December 11, 2017

Revised January 18, 2018

Accepted February 21, 2019