

УДК 669.14:621.74.042

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКА ОКСИДА ИТТРИЯ КАК УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗЫ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ*

Чуманов В.И., к.т.н., старший научный сотрудник кафедры «Техника и технологии
производства материалов» (chumanovvi@susu.ru)

Чуманов И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии
производства материалов» (chumanoviv@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте
(456217, Россия, Челябинская обл., Златоуст, ул. Тургенева 16)

Аннотация. Представлен анализ необходимости работ по совершенствованию составов имеющихся конструкционных материалов ответственного назначения в направлении создания металломатричных материалов, в которых объединена высокопластичная металлическая основа и тугоплавкие высокопрочные высокомодульные наполнители. Для сплавов на основе железной матрицы предпочтительными являются дисперсные частицы оксида иттрия (Y_2O_3) из-за их стабильности при температурах пирометаллургических процессов и инертности в отношении компонентов сплава. Рассмотрена технология получения новых материалов за счет введения дисперсных частиц в жидкий расплав при разливке с использованием машины центробежного литья для получения полый (трубной) заготовки. Показана возможность повышения механических и эксплуатационных свойств металломатричных материалов в сравнении с мономатериалом. Приведены результаты термодинамического моделирования высокотемпературных процессов, происходящих в системе оксид иттрия – металлическая матрица (расплав). Моделирование проведено с использованием программного комплекса FactSage. В качестве моделирующего состава матричного материала использовали состав, соответствующий стали марки 12X18H10T. Расчеты выполнены из соотношения 1 г добавки оксида иттрия на 100 г матричного металлического расплава. Из результатов моделирования можно сделать вывод, что введенный дисперсный порошок оксида иттрия не взаимодействует с компонентами сплава, не диссоциирует и не претерпевает аллотропических превращений. Показана целесообразность проведения экспериментов по получению отливок центробежного литья с применением оксида иттрия в качестве упрочняющей фазы с целью возможного повышения радиационной стойкости. Обозначены направления разработки наиболее эффективной технологии создания металлических материалов на основе железной матрицы, дисперсно-упрочненной оксидом иттрия.

Ключевые слова: расплав, упрочняющая фаза, центробежное литье, оксид иттрия, коррозионностойкие стали.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-499-503

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач, стоящих перед металлургией и машиностроением, является разработка и внедрение новых металлосберегающих технологий, которые могли бы служить основой получения новых металлических материалов с улучшенными функциональными свойствами. В этом плане несомненно большой интерес представляют литейные технологии, которые благодаря простоте реализации и возможности получения изделий близких к конечной продукции позволяют существенно снизить затраты на последующую металлообработку [1, 2].

В последние годы актуальность приобретают работы по созданию принципиально новых материалов, в которых искусственно объединены высокопластичные металлические матрицы и тугоплавкие высокопрочные высокомодульные наполнители [3 – 5]. При таком со-

четании фаз достигается значительное повышение несущих способностей улучшенного таким образом материала: высокая износостойкость и задиростойкость, стойкость против абразивного изнашивания, а также воздействию различных видов излучения. Армирующие наполнители с резко отличной от основной матрицы твердостью не только повышают износостойкость металлических материалов, но и играют роль поддерживающих опор, могут существенно снизить потери на трение и расширить диапазон нагружения [6]. Для ряда сталей [7] движение дислокаций тормозится введением в металлическую матрицу дисперсных термодинамически стабильных неметаллических (керамических) частиц, а, как известно, движение дислокаций аналогично движению вакансий. По данным работы [8] в железной и никелевой матрице наиболее стабильными являются частицы оксида иттрия (Y_2O_3).

Получение мелкодисперсной оксидной фазы в металле традиционными методами, а главное ее равномерное распределение не представляется возможным. При традиционной схеме жидкий металл – слиток при введении иттрия в жидкий расплав с содержанием

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках федеральной целевой программы по соглашению № 05.608.21.0276 от 04.12.2019 г. (уникальный идентификатор RFMEFI60819X0276).

кислорода 0,08 – 0,10 % включения оксида Y_2O_3 будут образовываться в жидком металле и иметь размеры от нескольких до десятков микрометров, что является неприемлемым. Не решают эту проблему и традиционные технологии порошковой металлургии, когда оксидные дисперсоиды смешиваются с порошками металлов и полученная смесь компактируется и спекается. При этом сохраняется исходный размер оксидных частиц и те ограничения, которые несет в себе порошковая металлургия (трудность изготовления заготовок больших размеров, большое количество используемого порошка при его высокой стоимости, использование специального оборудования с контролируемой атмосферой и др.) [9 – 11].

ТЕХНОЛОГИИ С ВВЕДЕНИЕМ ОКСИДА ИТТРИЯ

В настоящее время проблема решается только с переходом на технологию механического легирования (МЛ) [12]. Технология предполагает, что смесь порошков различных металлов подвергается совместному высокоэнергетическому помолу с преобладающим механизмом трения. В процессе такого помола происходит измельчение частиц порошка (вплоть до нанокластерного размера) и взаимная твердофазная диффузия металлов друг в друга. В нанокластерах термодинамически наиболее выгодным соединением становится твердый раствор, в который переходят имеющиеся в металле соединения типа интерметаллидов, силицидов и карбидов [13]. При последующем нагреве компактированных порошков эти соединения выпадают из раствора в виде наноразмерных частиц (преципитатов).

В работе [14] было установлено, что при МЛ в твердом металле может растворяться и такой термодинамически прочный оксид, как Y_2O_3 , с последующим выделением его нанокластерных преципитатов. При этом возможно укрупнение (коалесценция) нанопреципитатов в результате растворения мелких частиц и роста более крупных, что в конечном итоге сводит на нет все достоинства технологии МЛ.

Опробована технология повышения механических свойств металлических материалов за счет введения дисперсных частиц в жидкий расплав при разливке с использованием машины центробежного литья [15 – 17]. Эта технология, при достаточной простоте ее реализации, позволяет получать стабильные результаты с использованием карбида титана, карбида вольфрама, карбида кремния, а также используя дисперсные частицы различной плотности получать градиентные материалы. Оксид иттрия обладает плотностью 5,046 г/см³, близкой к плотности металлических материалов на основе железа. Следовательно, при реализации технологической схемы, представленной в работе [15], оксид иттрия должен находиться на внешней (рабочей) стороне цилиндрической отливки. При небольшой толщине

стенки заготовки возможно его распределение и на внутренней поверхности.

Усилить эффект от введения дисперсных частиц возможно при использовании дополнительной внутренней механической раскатки, т.е. термомеханического упрочнения. Подобная обработка позволит получить более высокие значения механических свойств (более 300 МПа при температуре 970 К), более высокую радиационную стойкость к нейтронному облучению, более высокую сопротивляемость коррозии по отношению к теплоносителям при повышенных температурах. Это подтверждают работы [18, 19] по проведению глубокой пластической деформации: в ходе экспериментальных исследований получены прутки из стали марки 08X18H10T с размером зерна 300 – 600 нм, при этом механические свойства и микротвердость стали увеличиваются более чем в два раза по сравнению с исходными значениями.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

СТАБИЛЬНОСТИ ОКСИДА ИТТРИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ

С целью разработки наиболее эффективной технологии создания металлических материалов на основе железной матрицы дисперсно-упрочненной оксидом иттрия необходимо создание сквозных технологических схем и инновационных технологий, включающих в себя как литейные технологии с введением упрочняющей фазы, так и термомеханическое упрочнение. Для этого необходимо экспериментально изучить влияние различных параметров (температуры, концентрации, скорости разливки и вращения печи, усилия раскатки, режимы термической обработки и др.) на ход процесса и его результаты. Для термодинамического моделирования высокотемпературных процессов, происходящих в системе оксид иттрия – металлическая матрица (расплав), и температур рекристаллизации целесообразно использовать программный комплекс FactSage [20, 21]. Программное обеспечение FactSage 7.0 обозначает возможные направления процессов, протекающих при реализации разрабатываемых в ходе исследований технологических процессов.

Для моделирования использовали материал следующего состава: 0,1 % С; 1,5 % Мn; 0,5 % Si; 18,0 % Cr; 10,0 % Ni; 0,5 % Ti; 69,25 % Fe. Добавляли 1 г оксида Y_2O_3 на 100 г металлического расплава. Результаты моделирования равновесных фазовых составов металла с добавкой оксида иттрия в зависимости от температуры и моделирования неравновесной кристаллизации (модель Шейла-Гулливера) металла с добавкой оксида иттрия представлены на рис. 1, 2 (где $\lg x$ – десятичный логарифм от концентрации фазы). Расчеты проводили с учетом возможности существования фаз переменного состава в виде твердых и жидких растворов, а также с учетом отклонения условий кристаллизации от идеальности.

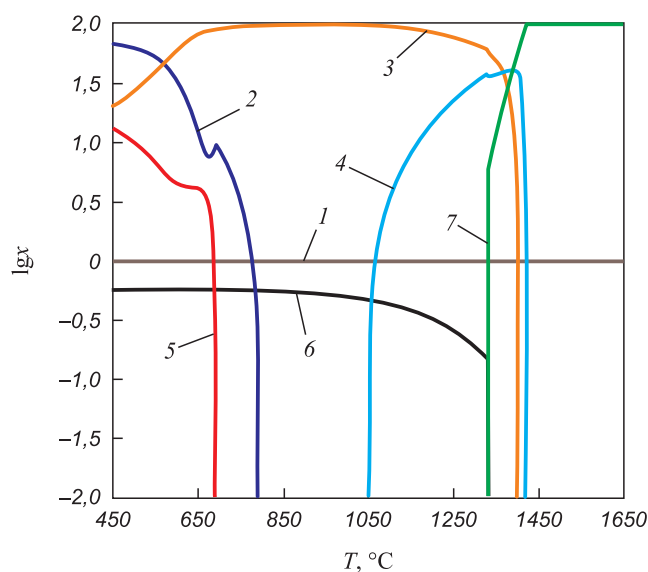


Рис. 1. Результаты моделирования равновесного фазового состава стали марки 12X18H10T с добавкой 1 г оксида иттрия на 100 г расплава в зависимости от температуры:
1 – Y_2O_3 ; 2 – α -Fe; 3 – γ -Fe; 4 – δ -Fe; 5 – сигма;
6 – твердый раствор на основе TiC; 7 – металлический расплав

Fig. 1. Results of modeling the equilibrium phase composition of 12Cr18Ni10Ti steel with an addition of 1 g of yttrium oxide per 100 g of melt depending on temperature:
1 – Y_2O_3 ; 2 – α -Fe; 3 – γ -Fe; 4 – δ -Fe; 5 – sigma;
6 – TiC-based solid solution; 7 – metal melt

В построении зависимости изменения фазового состава сплава (рис. 1) и неравновесной кристаллизации от температуры основной акцент делали на оксидной

фазе сплава. Моделирование проводили для температур, при которых осуществляется центробежная отливка заготовок, что позволяет с большей или меньшей точностью предполагать фазовый состав изучаемого сплава. Такое обстоятельство позволяет прогнозировать поведение дисперсных оксидов.

Представлены различные фазы системы, характерные для стали марки 12X18H10T в зависимости от температуры. Линиями обозначены границы существования фаз. Наибольший практический интерес представляет центральная часть графика (через диаграмму проходит линия, характеризующая массу оксида иттрия в системе). Исследуемая фаза почти не взаимодействует с компонентами сплава, не диссоциирует и не претерпевает аллотропических превращений.

На рис. 2 представлены результаты расчета модели неравновесной кристаллизации (модели Шейла-Гулливера) для исходного расплава без добавок оксида иттрия и с добавкой эталонным составом. Линия, соответствующая определенной фазе, в месте пересечения с осью температуры отмечает точку начала кристаллизации фазы. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что оксид иттрия присутствует в расплаве в виде кристаллической фазы. При этом увеличивается содержание α -Fe (ОЦК фазы) в сравнении с моделью для расплава без присадки оксида иттрия.

Выводы

Анализ моделирования показал, что в процессе получения металломатричных материалов методом цент-

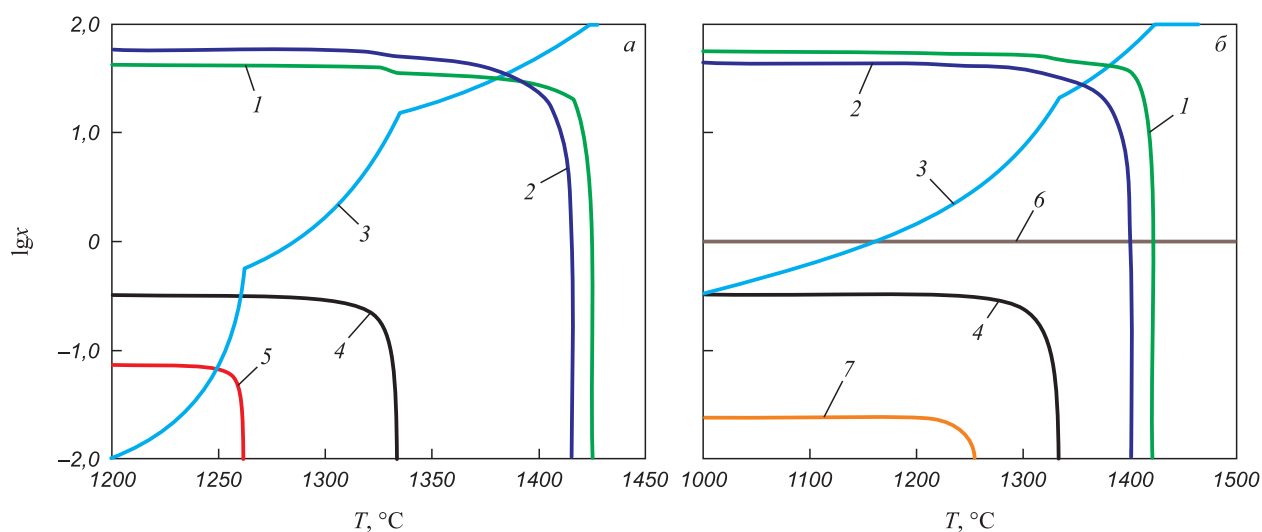


Рис. 2. Результаты моделирования неравновесной кристаллизации фазового состава стали марки 12X18H10T в зависимости от температуры (модель Шейла-Гулливера):

a – исходный расплав; *б* – металл с добавкой 1 г оксида иттрия на 100 г расплава;
1 – α -Fe; 2 – γ -Fe; 3 – металлически расплав; 4 – твердый раствор на основе TiC; 5 – $Me_{23}C$; 6 – Y_2O_3 ; 7 – Cr_4C

Fig. 2. Results of modeling of nonequilibrium crystallization of the phase composition of 12Kh18N10T steel depending on temperature (Scheil-Gulliver model):

a – initial melt; *б* – metal with an addition of 1 g of yttrium oxide per 100 g of melt;
1 – α -Fe; 2 – γ -Fe; 3 – metal melt; 4 – TiC-based solid solution; 5 – $Me_{23}C$; 6 – Y_2O_3 ; 7 – Cr_4C

робежного литья не происходит взаимодействия оксида иттрия с металлическим расплавом. Не установлено диссоциации соединения при условиях протекания рассматриваемых процессов. Можно сделать заключение о целесообразности проведения экспериментов по получению отливок центробежного литья с применением оксида иттрия как упрочняющей фазы с целью возможного повышения радиационной стойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вальтер А.И., Протопопов А.А. Основы литейного производства. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 333 с.
2. Одарченко И.Б., Некрасов Г.Б. Основы технологии литейного производства. Плавка, заливка металла, кокильное литье. – М.: Высшая школа, 2013. – 225 с.
3. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. Исследование влияния модифицирования металла нанопорошковыми материалами на качество сортовой непрерывнолитой заготовки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 57 – 63.
4. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting // Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 706. P. 409 – 418.
5. Иванов И.И., Демидик А.Н. Ферритные дисперсно-упрочненные стали горячей зоны реакторов на быстрых нейтронах // Вопросы атомной науки и техники. 2001. № 4. С. 65 – 68.
6. Singla S., Grewal J.S., Kang A.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 256 – 266.
7. Портной Н.И., Бабич Б.И., Светлов И.Л. Композиционные материалы на никелевой основе. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
8. Белянчиков Л.Н. Рациональная технология получения коррозионно-стойкой ферритной стали с нанокластерным оксидным упрочнением для атомной энергетики // Электрометаллургия. 2011. № 9. С. 9 – 16.
9. Порошковая металлургия и напыление покрытий / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
10. Анциферов В.Н., Перельман В.Е. Механика процессов пресования порошковых и композиционных материалов. – М.: ИД «Грааль», 2001. – 631 с.
11. Harris I.R., Williams A.J. Grain boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties. – London: IOM Communications Ltd., 2001. – 328 p.
12. Benjamin J.S., Mercer P.D. Dispersion strengthened superalloys mechanical alloying // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1970. Vol. 1. No. 10. P. 2943 – 2951.
13. Badmos A.V., Bhadeshia H.K.D.H. The evolution of solutions: thermodynamic analysis of mechanical alloying // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 1997. Vol. 28A. P. 2189 – 2194.
14. Olier P., Mabaplate J., Mathon M.H. etc. Structural and chemical characterisations of ODS ferritic steels produced by mechanical extrusion. – In: Proceedings Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, 10-14 October 2010, Florence, Italia, 2010. P. 151 – 158.
15. Пат. 2443505 РФ. Способ получения стальной трубной заготовки / Чуманов В.И., Аникеев А.Н., Чуманов И.В.; заявл. 06.10.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
16. Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers // Metallurgist. 2011. Vol. 55. No. 5-6. P. 439 – 443.
17. Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V.I. etc. Study and Analysis of the Structural Constituents of Billets Hardened by Fine-Grained Particles and Formed by Centrifugal Casting // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012. No. 6. P. 540 – 543.
18. Найзабеков А.Б., Панин Е.А., Лежнев С.Н. и др. Исследование влияния радиально-сдвиговой прокатки на микроструктуру и механические свойства нержавеющей стали марки 08X18H10T. – В кн.: Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний. Сб. материалов юбилейной международной научно-практической конференции. № 7. – Рудный: Изд-во Рудненского индустриального института, 2019. С. 197 – 204.
19. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Arbuz A.S. etc. Computer modeling of radial-shear rolling of austenitic stainless steel AISI-321 // Machines. Technologies. Materials. 2018. Vol. 12. No. 12. P. 497 – 500.
20. Bale C.W., Belisle E., Chartrand P. etc. FactSage thermochemical software and databases – recent developments // Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2009. Vol. 33. P. 295 – 311.
21. Bale C.W., Bélisle E., Chartrand P., Decterov S.A. etc. FactSage thermochemical software and databases, 2010 – 2016 // Calphad – Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2016. Vol. 55. P. 35 – 53.

Поступила в редакцию 21 января 2020 г.
После доработки 28 января 2020 г.
Принята к публикации 3 марта 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. No. 7, pp. 499–503.

POSSIBILITY OF USING YTTRIUM OXIDE POWDER AS A STRENGTHENING PHASE FOR CENTRIFUGAL CASTING OF CORROSION-RESISTANT STEELS

V.I. Chumanov, I.V. Chumanov

Zlatoust branch of the South Ural State University, Zlatoust, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The authors have made an analysis of necessity to improve the composition of the existing structural materials for critical purposes in the direction of creating metal matrix materials, which combine a highly plastic metal base and refractory high-strength high-modulus fillers. For iron matrix alloys, dispersed yttrium oxide (Y_2O_3) particles are preferred because of their stability at pyrometallurgical process temperatures and inertness to alloy components. The technology of obtaining new materials by introducing dispersed particles into a liquid melt during casting using a centrifugal casting machine to obtain a hollow

(pipe) billet is considered. The possibility of increasing the mechanical and operational properties of metal matrix materials in comparison with monomaterial is shown. The article describes results of the thermodynamic modeling of high-temperature processes occurring in the yttrium oxide – metal matrix (melt) system. Modeling was carried out using the FactSage software package. A composition corresponding to 12Cr18Ni10Ti steel was used as the modeling composition of the matrix material. The calculations were made according to the ratio of 1 g of yttrium oxide additive per 100 g of matrix metal melt. From the simulation results it is possible to conclude that the introduced dispersed yttrium oxide powder does not interact with the alloy components, does not dissociate, and does not undergo allotropic transformations. The expediency of conducting experiments on the production of centrifugal castings using yttrium oxide as a hardening phase with the

aim of a possible increase in radiation resistance is shown. Directions are indicated for developing the most effective technology for creating metallic materials based on an iron matrix dispersed-hardened by yttrium oxide.

Keywords: melt, hardening phase, mechanical alloying, centrifugal casting, yttrium oxide, corrosion resistant steels.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-499-503

REFERENCES

1. Val'ter A.I., Protopopov A.A. *Osnovy liteinogo proizvodstva* [Basics of foundry technology]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2019, 333 p. (In Russ.).
2. Odarchenko I.B., Nekrasov G.B. *Osnovy tekhnologii liteinogo proizvodstva. Plavka, zalivka metalla, kokil'noe lit'e* [Basics of foundry technology. Melting, metal casting, chill casting]. Moscow: Vysshaya shkola, 2013, 225 p. (In Russ.).
3. Komshukov V.P., Cherepanov A.N., Protopopov E.V. etc. Influence study of metal modification with nanopowder materials on continuously cast rod billet quality. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 8, pp. 57–63. (In Russ.).
4. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 706, pp. 409–418.
5. Ivanov I.I., Demidik A.N. Ferritic dispersion hardened steels of the hot zone of fast nuclear reactors. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*. 2001, no. 4, pp. 65–68. (In Russ.).
6. Singla S., Grewal J.S., Kang A.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth. *Procedia Materials Science*. 2014, vol. 5, pp. 256–266.
7. Portnoi N.I., Babich B.I., Svetlov I.L. *Kompozitsionnye materialy na nikel'noi osnove* [Nickel-based composite materials]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p. (In Russ.).
8. Belyanchikov L.N. Rational technology for producing corrosion-resistant ferritic steel with nanocluster oxide hardening for nuclear energy. *Elektrometallurgiya*. 2011, no. 9, pp. 9–16. (In Russ.).
9. Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. etc. *Poroshkovaya metallurgiya i napylenie pokrytii* [Powder metallurgy and coating spraying]. Moscow, 1987, 792 p. (In Russ.).
10. Antsiferov V.N., Perel'man V.E. *Mekhanika protsessov pressovaniya poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of the processes of pressing powder and composite materials]. Moscow: ID Graal', 2001, 631 p. (In Russ.).
11. Harris I.R., Williams A.J. *Grain boundaries: Their Character, Characterisation and Influence on Properties*. London: IOM Communications Ltd., 2001, 328 p.
12. Benjamin J.S., Mercer P.D. Dispersion strengthened superalloys mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1970, vol. 1, no. 10, pp. 2943–2951.
13. Badmos A.V., Bhadeshia H.K.D.H. The evolution of solutions: thermodynamic analysis of mechanical alloying. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 1997, vol. 28A, pp. 2189–2194.
14. Olier P., Mabaplate J., Mathon M.H. etc. Structural and chemical characterisations of ODS ferritic steels produced by mechanical extrusion. In: *Proceedings Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, 10-14 October 2010, Florence, Italia*, 2010, pp. 151–158.
15. Chumanov V.I., Anikeev A.N., Chumanov I.V. *Sposob polucheniya stal'noi trubnoi zagotovki* [Method of obtaining a steel pipe billet]. Patent RF no. 2443505. *Byulleten' izobretenii*. 2012, no. 6. (In Russ.).
16. Chumanov I.V., Chumanov V.I., Anikeev A.N. Preparation of precipitation-strengthened hollow billets for rotary dispersers. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 5-6, pp. 439–443.
17. Chumanov I.V., Kareva N.T., Chumanov V.I. etc. Study and analysis of the structural constituents of billets hardened by fine-grained particles and formed by centrifugal casting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 2012, no. 6, pp. 540–543.
18. Naizabekov A.B., Panin E.A., Lezhnev S.N. etc. Study of the effect of radial-shear rolling on microstructure and mechanical properties of 08Cr18Ni10Ti stainless steel. In: *Sovremennyye innovatsii v oblasti nauki, tekhnologii i integratsii znaniy. Sb. materialov yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, no. 7* [Modern Innovations in Science, Technology and Knowledge Integration. Proceedings of the Anniversary Int. Sci. – Pract. Conf., no. 7]. Rudnyi: Izd-vo Rudnenskogo industrial'nogo instituta, 2019, pp. 197–204. (In Russ.).
19. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Arbuz A.S. etc. Computer modeling of radial-shear rolling of austenitic stainless steel AISI-321. *Machines. Technologies. Materials*. 2018, vol. 12, no. 12, pp. 497–500.
20. Bale C.W., Belisle E., Chartrand P. etc. FactSage thermochemical software and databases – recent developments. *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2009, vol. 33, pp. 295–311.
21. Bale C.W., Belisle E., Chartrand P., Decterov S.A. etc. FactSage thermochemical software and databases, 2010 – 2016. *Calphad – Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2016. vol. 55, pp. 35–53.

Funding. The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education in the framework of the federal target program under agreement No. 05.608.21.0276 of December 4, 2019 (unique identifier RFMEFI60819X0276).

Information about the authors:

I.V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Technique and Technology of Materials Production” (chumanoviv@susu.ru)

V.I. Chumanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Technique and Technology of Materials Production” (chumanovvi@susu.ru)

Received January 21, 2020

Revised January 28, 2020

Accepted March 2, 2020