

УДК 669.046.516

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭКЗОГЕННЫХ НАНОФАЗ ОКСИДА ЦИРКОНИЯ С ОЛОВОМ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ¹

©2023 г. С.Н. Анучкин, А.А. Александров, К.С. Филиппов

*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва
E-mail: AnuchkinSN@yandex.ru**Поступила в редакцию 6 июня 2022 г.**После доработки 10 октября 2022 г. принята к публикации 31 октября 2022 г.*

Исследованы процессы взаимодействия экзогенных наночастиц тугоплавких соединений ZrO_2 с модельными жаропрочными никелевыми сплавами, содержащими олово. Показано, что в лабораторных условиях степень удаления олова из металла после введения наночастиц ZrO_2 зависела от длительности изотермической выдержки и составляла 11—18 отн.%. Определено содержание разных форм циркония после опытов и показано, что количество ZrO_2 , удалившегося из металла на границу раздела фаз Ме/(огнеупор, шлак, газ), составило в среднем 50 отн.%.

Ключевые слова: наночастицы; оксид циркония; примеси цветных металлов; жаропрочные никелевые сплавы; олово.

Развитие нанотехнологий и их применение в металлургии позволяют реализовать новые нетрадиционные способы улучшения свойств металла за счет использования нанопорошков [1], а также расширить понимание процессов кристаллизации металлических расплавов [2]. Одним из перспективных направлений улучшения свойств сплавов триады железа является использование экзогенных наноразмерных частиц тугоплавких фаз (НЧТФ) как реагентов для рафинирования расплавов от вредных примесей и инокулирования в процессах кристаллизации металла.

В настоящее время в металлургии триады железа ультрадисперсные или наноразмерные порошки используются в основном либо в роли модификаторов, влияющих на кристаллизацию расплава, либо в качестве эффективных добавок для улучшения свойств металла при изготовлении дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей. Имеется большое число литературных источников по вопросам инокулирования сталей различных марок [3—5], чугунов [6—8] и жаропрочных никелевых сплавов [9—13]. Так, в работах [3, 4] приведены данные о ле-

гировании нано- и микродисперсными частицами ZrO_2 стали 08X18H10T при вакуумно-дуговом переплаве и получении ДУО сталей. Отмечены измельчение зеренной структуры стали и повышение значений пределов прочности и текучести по сравнению с исходной сталью при содержании частиц ZrO_2 до 0,3 мас.%. В исследовании влияния размера частиц на распределение ZrO_2 в слитке металла показано, что распределение в объеме расплава наноразмерных частиц ZrO_2 более равномерное, чем конгломератов ZrO_2 микроразмеров. В работах [9, 10] при исследовании влияния наночастиц TiN и TiC_xN_y на механические свойства жаропрочных сплавов ЖС-6К и Inconel 718 отмечено, что срок службы сплава ЖС-6К в условиях циклической нагрузки при 600 °С возрастал в 2,7 раза, при 975 °С — на 40%, а относительное удлинение увеличивалось более чем в два раза. После модифицирования сплава Inconel 718 его длительная прочность при 650 °С увеличивалась в 1,5—2 раза, число циклов до разрушения при 482 °С — более чем в три раза. Обзор аналогичных работ представлен в публикациях [14—16].

Таким образом, приведенные данные подтверждают актуальность использования НЧТФ в расплавах железа и никеля для повышения служебных свойств изделий. В то

¹Работа выполнена по государственному заданию № 075-00715-22-00.

же время в этих работах недостаточно полно рассмотрены физико-химические закономерности взаимодействия наночастиц с компонентами металлического расплава, а полученные результаты существенно разнятся в зависимости от выбранной системы НЧТФ-расплав. Также в работах о модифицирующих добавках недостаточно изучены вопросы о длительности выдержки расплава после ввода НЧТФ, о их взаимодействии с вредными примесями в расплавах и возможное влияние этого взаимодействия на перераспределение НЧТФ в металле. Например, в работе [17] предположили, что при переходе в металл сварочной ванны НЧТФ адсорбируют на своей поверхности ПАВ — кислород, серу или другие соединения. По мнению авторов, под влиянием циркуляционного течения сформированные комплексы НЧТФ-ПАВ распределяются в периферийной области сварочной ванны и в охлажденном слое эти комплексы формируют кластеры, служащие дополнительными центрами кристаллизации, что способствует как модифицированию наплавленного металла, так и повышению его эксплуатационных свойств.

Следует также отметить, что весьма обширна научная литература, посвященная адсорбционному взаимодействию НЧТФ с разными веществами в водных и органических растворах. Например, адсорбцию анионного ПАВ из водного раствора на поверхности наночастиц оксидов алюминия и железа исследовали в работе [18]. При этом показано, что наиболее вероятным механизмом является адсорбция молекул ПАВ всей своей длиной на начальной стадии процесса, а на последующих стадиях происходит самоассоциация ПАВ с образованием полумицеллярных агрегатов.

На основании анализа литературных данных нами ранее [14] предложена и экспериментально подтверждена гипотеза о взаимодействии НЧТФ с ПАВ металлического расплава с последующим адсорбционным механизмом удаления ПАВ из металла. В общем виде механизм удаления ПАВ представили схематично следующим образом: при введении в жидкий металл (дисперсионная система) экзогенных НЧТФ (дисперсная фаза) на образующейся межфазной границе частица/расплав (лиофильная или лиофобная) происходят перераспределение ПАВ и их адсорбция на поверхность наночастиц. В ре-

зультате образуются ансамбли $Me+(НЧТФ-ПАВ)$. Концентрационный градиент ПАВ вызывает перемещение ансамблей в расплаве, их возможное объединение или деградацию и дальнейшее удаление под влиянием сил адсорбционной природы на границы раздела фаз $Me/(огнеупор, шлак, газ)$. Таким образом, одна часть ансамблей удаляется из металла, т.е. реализуется процесс рафинирования металла от вредных ПАВ, а другая часть воздействует в дальнейшем на процессы кристаллизации и механические характеристики металла.

Шихта современных плавильных агрегатов содержит значительные количества примесей цветных металлов (ПЦМ), удаление которых — сложная физико-химическая и техническая проблемы [19], требующие нестандартного решения. Так например, поверхностно-активные свойства ПЦМ в расплавах никеля [20, 21] определяют их использование для рафинирования расплавов от ПЦМ. Использование экзогенных НЧТФ как реагентов для очищения расплавов от ПЦМ по адсорбционному механизму — одно из перспективных направлений рафинирования.

Ранее авторы [16] исследовали гетерофазное взаимодействие экзогенных наночастиц ZrO_2 ($d_{cp} = 55$ нм) с ПАВ — оловом в модельных расплавах Ni-Sn. Достигнута степень удаления олова 14—20 отн.%. В работе [22] авторы исследовали гетерофазное взаимодействие наночастиц ZrO_2 (55 нм) с ПАВ — оловом в модельных многокомпонентных никелевых сплавах (Ni-Co-Cr-Mo-W-Re), состав которых соответствовал окислительно-му периоду при плавке жаропрочных сплавов. Показано, что степень удаления олова 15—28 отн.% зависела от легирующих элементов и длительности выдержки металла в жидком состоянии.

Настоящая работа является продолжением цикла исследований по изучению взаимодействия НЧТФ с модельными двойными и многокомпонентными никелевыми расплавами. Цель работы — исследование гетерофазного взаимодействия оксидных НЧТФ ZrO_2 с ПАВ-ПЦМ — Sn в жаропрочных никелевых сплавах промышленного производства и изучение кинетики этого взаимодействия.

Материалы и методика исследования. Наночастицы ZrO_2 получали плазмохимическим методом. Процесс синтеза происходил при взаимодействии порошка хлорида цир-

кония с воздушной плазмой. Удельную поверхность анализировали методом БЭТ (Брунауэр, Эммет, Теллер) на анализаторе Micrometrics TriStar 3000; она составила 19,14 м²/г. Средний размер частиц ZrO₂ (БЭТ) составил $d_{\text{ср}} = 55$ нм. Подробно анализ наночастиц ZrO₂ представлен в [16]. Введение НЧТФ в жидкий расплав реализовали в виде брикета композиционного материала, приготовленного из смеси порошков НЧТФ ZrO₂ и Ni. Анализ порошка никеля показал наличие 80% частиц размером 5—25 мкм. Приготовление смеси порошков Ni(97,5 мас.%) + ZrO₂(2,5 мас.%) осуществляли в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 6 в среде аргона в течение 1 ч. Содержание циркония после обработки определили на атомно-эмиссионном спектро-скопе с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) фирмы Horiba Jobin Yvon (ULTIMA 2). Оно составило 1,65 мас.% Zr (или 2,23 мас.% ZrO₂). Стоит отметить, что в аналогичных смесях с более высокими содержаниями ZrO₂ рентгенофазовым анализом (Rigaku Ultima 4) подтверждалось присутствие оксида циркония в форме бадделеита. С целью рафинирования полученного порошка от кислорода (адсорбированного и в форме оксида никеля) проведен восстановительный отжиг в среде водорода при 800 °С в течение 1 ч при расходе водорода 25 л/ч.

После обработки смесь порошков подвергли одноосному прессованию при давлении 35 МПа и дегазации в среде аргона при 300 °С с последующим хранением в вакууме при 25 °С. Все эти процедуры проведены для уменьшения содержания газовых примесей при контакте компакта с атмосферой.

В качестве модельных выбраны жаропрочные никелевые сплавы промышленного производства ЖС32 и ЖС36. Состав данных сплавов представлен в таблице. С целью исследования гетерофазного взаимодействия НЧТФ ZrO₂ с оловом его содержание в металле увеличили до 0,0385 мас.% в сплаве ЖС32 и 0,0428 мас.% в сплаве ЖС36. Использовали олово марки ОВЧ-000.

Эксперименты по изучению гетерофазного взаимодействия НЧТФ ZrO₂ с ПАВ-ПЦМ — Sn проводили в вакуумно-индукционной печи (ВИП) со специальным коническим индуктором [23]. Опыты выполнены в среде He +10% H₂ (восстановительная среда) при избыточном давлении 0,2 МПа. Данные усло-

Химический состав (мас.%) жаропрочных никелевых сплавов ЖС32 и ЖС36

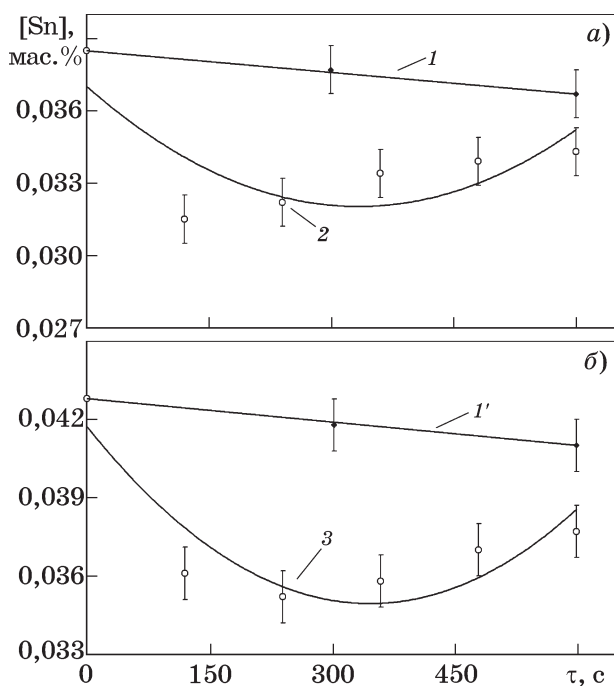
Элемент	ЖС 32	ЖС 36
Ni	Осн.	Осн.
Cr	4,54	3,81
Al	4,31	5,47
Mo	1,10	1,26
W	8,13	11,42
Co	8,78	8,27
Re	3,35	2,01
Ta	4,21	—
Nb	1,47	1,04
Ti	—	1,13
Si	0,14	0,061
Fe	—	0,12
C	0,222	0,014
B	0,013	—
La	—	0,02
Y	0,403	0,005
Mg	0,002	—
Ca	0,0002	0,005
S	0,0003	0,0005
O	0,0005	0,0016
N	0,0002	0,0004
P	0,0065	0,0017

вия выбраны для лабораторных исследований с целью уменьшения возможного испарения олова [16] и влияния газовой фазы на гетерофазное взаимодействие НЧТФ с ПАВ-ПЦМ.

Брикет, содержащий НЧТФ ZrO₂, вводили в специальном контейнере без нарушения герметичности печи с последующей изотермической выдержкой от 120 до 600 с в зависимости от опыта. Содержание НЧТФ в расплаве после введения брикета составило 0,1 мас.%. Средняя температура металла 1580 °С. Содержание олова после опытов определяли методом АЭС-ИСП.

Результаты опытов и их обсуждение. Провели опыты с четырьмя типами сплавов: ЖС32; ЖС32-ZrO₂($d_{\text{ср}} = 55$ нм); ЖС36 и ЖС36-ZrO₂(55 нм). Результаты представили в виде зависимости содержания олова от длительности выдержки $[\text{Sn}] = f(\tau)$ и формулы для степени удаления олова $\alpha_{\text{Sn}} = ([\text{Sn}]_{\text{исх}} - [\text{Sn}]_{\text{кон}})/[\text{Sn}]_{\text{исх}}$, отн. %.

Анализ результатов, представленных на фиг. 1, показал, что, во-первых, введение в рас-



Фиг. 1. Изменение содержания олова в жаропрочных сплавах ЖС32 (а) и ЖС36 (б) в зависимости от длительности изотермической выдержки: 1, 1' — опыты без введения НЧТФ; 2 — расплав ЖС32-ZrO₂ (55 нм); 3 — расплав ЖС36-ZrO₂ (55 нм)

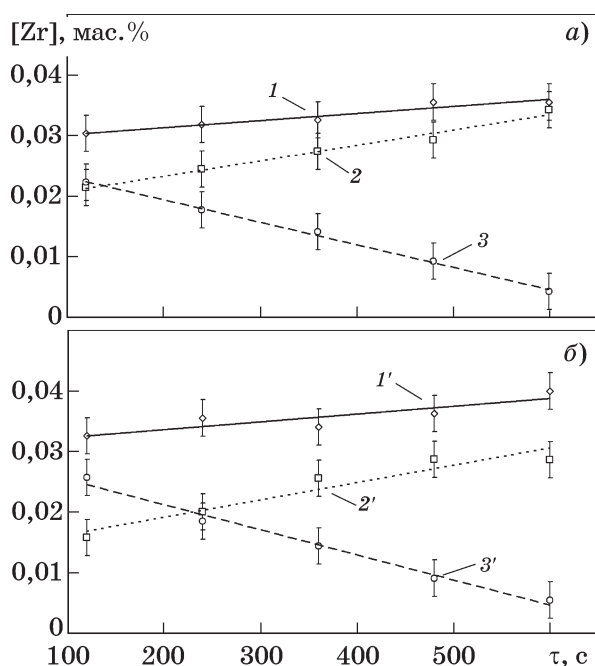
плав НЧТФ ZrO₂ при изотермической выдержке 120—600 с привело к снижению содержания [Sn] и значения α_{Sn} в сплавах ЖС32 и ЖС36 составили соответственно 11—18 и 12—17 отн.%. С учетом опытов без введения НЧТФ (см. фиг. 1) данные зависимости могут указывать на гетерофазное взаимодействие НЧТФ ZrO₂ с оловом в расплаве и их удаление в виде ансамблей. Во-вторых, обработка данных методом наименьших квадратов при описании их полиномиальной функцией (для сплава ЖС32 $[\text{Sn}] = 0,0370 - 2,99 \cdot 10^{-5}\tau + 4,49 \cdot 10^{-8}\tau^2$ и для сплава ЖС36 $[\text{Sn}] = 0,0417 - 3,91 \cdot 10^{-5}\tau + 5,63 \cdot 10^{-8}\tau^2$) показала наличие экстремума, что может служить доказательством возможных процессов десорбции ПАВ—Sn. Из сравнения полученных данных следует, что в жаропрочных сплавах при плавках в лабораторных условиях наблюдается более интенсивное удаление олова без введения НЧТФ по сравнению с двойными сплавами [16]. Кроме того, степень удаления олова имеет наибольшие значения на начальных этапах плавки. Это указывает на влияние легирующих элементов при длительных выдержках на изменение структуры ансамблей и десорбции олова с поверхности наночастиц. В связи с этим рас-

смотрели раскислительную способность легирующих элементов в данных сплавах.

Согласно литературным данным в системах Ni-Al, Ni-Ti, Ni-La, Ni-Y и Ni-C при содержании легирующих элементов, сопоставимых с их содержанием в жаропрочных сплавах (см. таблицу), данные элементы могут обладать большей раскислительной способностью по сравнению с цирконием в системе Ni-Zr [24—27]. Поэтому рассмотрели возможность восстановления циркония из оксида циркония данными элементами по реакции $\text{ZrO}_2 + [\text{R}] = [\text{Zr}] + \text{R}_x\text{O}_y$ (где R = Al, C, Ti, La и Y) [24—29], принимая при этом во внимание образование таких соединений, как ZrC. С учетом литературных данных [24—29] об изменении энергий Гиббса реакций восстановления и об активностях раскислителей в указанных системах преобладающими реакциями восстановления предположительно являются реакции с лантаном и углеродом. Таким образом, после введения НЧТФ ZrO₂ в жаропрочные сплавы возможно частичное или полное восстановление циркония из ZrO₂, что приведет к изменению структуры ансамблей, десорбции олова и его обратному переходу в расплав (см. фиг. 1).

С применением метода АЭС-ИСП определили содержания разных форм циркония [30]: в виде «легко-» и «трудновскрываемых» соединений. При этом предположили, что «легковскрываемые» соединения — либо цирконий, растворенный в металле, либо неоксидные включения, а его «трудновскрываемые» соединения — это цирконий в виде ZrO₂ или в составе сложных оксидов. При анализе учитывалось возможное влияние на определение циркония как основных легирующих компонентов (Cr, Ti, Al, Mo, Nb, Ta, W), так и микролегирующих добавок и примесей (Si, Fe, Mg, B, Sn). Исследовано влияние матричных элементов на аналитические сигналы металлов. При изучении взаимных влияний определяемых элементов установлено, что при содержании элементов на уровне 0,1—10 ppm данные влияния не проявляются. Для ускорения разложения проб использовали современные системы: СВЧ-минерализатор «Минотавр-2» и микроволновую систему MARS 5. Автоклавное растворение с использованием модуля MARS 5 оказалось наиболее эффективным.

Анализ результатов, представленных на фиг. 2, показал, что, во-первых, при исходном



Фиг. 2. Изменение содержания циркония в сплавах ЖС32 (а) и ЖС36 (б) в зависимости от длительности изотермической выдержки: 1, 1' — цирконий, удалившийся из металла на границы раздела фаз; 2, 2' — цирконий в металле в виде «легковскрываемых» соединений; 3, 3' — цирконий в металле в виде «трудновскрываемых» соединений

содержании циркония в металле 0,074 мас. % (в форме ZrO_2) его количество, удалившееся предположительно в виде ансамблей из металла на границу раздела фаз $Me/(огнеупор, шлак, газ)$, в обоих сплавах составляет в среднем 50 отн. %. Во-вторых, длительность изотермической выдержки в ВИП не оказывает существенного влияния на долю удаленного из металла циркония (см. кр. 1 и 1' на фиг. 2). В-третьих, наблюдается существенное изменение состава неудалившихся частиц. Уже при минимальной выдержке в 120 с соотношение содержаний циркония в виде легко- и трудновскрываемых соединений составляет 1:1 (сплав ЖС32) и 1:1,5 (сплав ЖС36), что указывает на влияние легирующих элементов сплава и на изменение состава оксидных частиц даже при незначительных выдержках. При длительных выдержках в 600 с количество легкоискрываемых соединений составляет 89 отн. % в сплаве ЖС32 и 84 отн. % в сплаве ЖС36, что подтверждает данные литературного анализа восстановления оксида циркония элементами расплава.

Все это еще раз указывает, что наночастицы, обладающие избыточной поверхност-

ной энергией, будут взаимодействовать с элементами расплава, приводя к изменению состава включений и к десорбции олова с поверхности наночастиц. Из сравнения данных по изменению содержания олова и циркония следует, что содержание олова возрастает с увеличением длительности выдержки, а доля удалившегося циркония остается неизменной. Это позволяет предположить, что в результате взаимодействия оксида циркония с элементами расплава могут образовываться сложные шпинелевидные соединения, которые остаются на границе раздела фаз (например, в шлаковой фазе), а олово после десорбции переходит в расплав. Поэтому для достижения наибольшего влияния наночастиц необходимо, чтобы момент их введения в жидкий металл соответствовал минимальному значению времени выдержки до кристаллизации.

Сравнили значения степени удаления олова с результатами, полученными для модельных двойных [16] и многокомпонентных [22] никелевых расплавов, для которых экспериментальные значения получены по описанной выше методике и с использованием аналогичных НЧТФ ZrO_2 ($d_{cp} = 55$ нм). Средние значения степени удаления олова после введения НЧТФ составили: в системе² Ni-Sn(0,0460) — 17 отн. %; в углеродистом сплаве I (Ni-Co(9)-Cr(5)-Mo(1)-W(8,5)-Re(4)-C(0,17)-Sn(0,0532)) — 21 отн. % и в безуглеродистом сплаве II (Ni-Co(9)-Cr(4)-Mo(1)-W(11,6)-Re(2)-Sn(0,0487)) — 23 отн. %. При этом стоит отметить, что в системе Ni-Sn и сплаве II не наблюдалось существенного изменения степени удаления олова при увеличении длительности изотермической выдержки расплава. В сплаве I, как и в сплавах ЖС32 и ЖС36, отмечено уменьшение значений α_{Sn} при длительных временах выдержки (27 и 16 отн. % при 240 и 1200 с соответственно [22]). Это еще раз доказывает влияние элементов расплава на изменение структуры ансамблей и десорбции олова с поверхности наночастиц.

Таким образом, в лабораторных условиях доказано удаление олова из модельных жаропрочных сплавов ЖС32 и ЖС36 и показано, что на степень удаления значительное влияние оказывает длительность взаи-

²Содержание компонентов сплавов приведенных систем в мас. %.

модействия НЧТФ с вредными примесями и элементами расплава. Удаление ПЦМ (Sn) происходит в результате образования ансамблей, их перераспределения в расплаве под влиянием сил гидродинамической и адсорбционной природы, перехода в шлаковую фазу или взаимодействия с огнеупорным материалом при возможном обратном переходе ансамблей и олова в расплав.

Выводы. 1. Изучено гетерофазное взаимодействие наноразмерных частиц тугоплавкой фазы (НЧТФ) ZrO_2 ($d_{cp} = 55$ нм) с оловом в модельных жаропрочных никелевых сплавах ЖС32 и ЖС36 и экспериментально подтверждена высказанная ранее гипотеза об адсорбционном механизме взаимодействия НЧТФ с примесями цветных металлов (ПЦМ), проявляющих поверхностно-активные свойства в расплавах никеля.

2. В лабораторных условиях исследовали кинетику рафинирования модельных сплавов ЖС32 + Sn(0,0385 мас.%) и ЖС36 + Sn(0,0428 мас.%) и показали, что значения степени удаления олова составили от 11 до 18 отн.% в зависимости от длительности изотермической выдержки после введения НЧТФ. Показали, что, удаление ПЦМ происходило в результате образования ансамблей и их удаления на границу раздела фаз Ме/(огнеупор, шлак, газ).

3. С применением метода АЭС-ИСП (атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой) определили содержания разных форм циркония после введения НЧТФ ZrO_2 в расплав (циркония в виде «легко-» и «трудновскрываемых» соединений). Показали, что доля «легковскрываемых» соединений возрастает с увеличением длительности изотермической выдержки расплава до 84—89 отн.%. Это связали с влиянием легирующих элементов сплава на изменение состава оксидных наночастиц.

4. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для исследования взаимодействия НЧТФ с вредными примесями ПАВ-ПЦМ в жаропрочных и специальных сплавах, а также для изучения процессов рафинирования и модифицирования данных сплавов с использованием наноразмерных порошков.

Авторы благодарят В.Т. Бурцева, А.В. Самохина и В.А. Волченкову за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алымов, М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов / М.И. Алымов. — М. : Наука, 2007. 167 с.
2. Полухин, В.А. Моделирование разупорядоченных и наноструктурированных фаз / В.А. Полухин, Н.А. Ватолин. — Екатеринбург : Институт металлургии УрО РАН, 2011. 462 с.
3. Аржавитин, В.М. Исследование влияния легирования наноструктурными оксидами ZrO_2 на свойства стали X18N10T / В.М. Аржавитин, Б.В. Борц, А.Ф. Ванжа, И.М. Короткова, В.И. Сытин // *Вопр. атом. науки и техники*. 2013. №5(87). С.58—62.
4. Аксенова, С.И. Усталость аустенитной стали, модифицированной оксидами циркония и иттрия / С.И. Аксенова, Б.В. Борц, И.М. Короткова, А.В. Пахомов, В.И. Соколенко // *Вопр. атом. науки и техники*. 2016. №1(101). С.160—166.
5. Вдовин, К.Н. Модифицирование отливок из высокомарганцевой стали карбонитридом титана / К.Н. Вдовин, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, О.А. Никитенко, Д.Д. Хамидулина // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2019. Т.62. №3. С.188—194.
6. Зыкова, А.П. Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов и криолита на структуру, механические свойства и разрушение чугуна СЧ25 / А.П. Зыкова, Д.В. Лычагин, А.В. Чумаевский, И.А. Курзина, М.Ю. Новомейский // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2014. Т.57. №11. С.37—42.
7. Zhu, R. Study on the influence of nano-SiC on the structure and properties of nodular cast iron / R. Zhu, Y. Su, X. Qin // *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* 2017. V.250. P.1—8 Art. 012051.
8. Рудницкий, Ф.И. Модифицирование чугунов ультрадисперсными добавками / Ф.И. Рудницкий, С.А. Куликов // *Литье и металлургия*. 2017. №1(86). С.11—15.
9. Cherepanov, A.N. Modifying structure and properties of nickel alloys by nanostructured composite powders / A.N. Cherepanov, V.E. Ovcharenko, G. Liu, L. Cao // *Thermophys. Aeromechan.* 2015. V.22. №1. P.127—132.
10. Черепанов, А.Н. Влияние наноструктурированных композиционных порошков на структуру и прочностные свойства жаропрочного сплава Inconel 718 / А.Н. Черепанов, В.Е. Овчаренко // *ФММ*. 2015. Т.116. №12. С.1339—1344.
11. Tiparti, D. Understanding the effects of $CoAl_2O_4$ inoculant additions on microstructure in additively manufactured Inconel 718 processed via selective laser melting / D. Tiparti, I.-T. Ho, K.-C. Chang, T.-H. Hsu, A.-C. Yeh, S. Tin // *Met. Mater. Trans. A*. 2021. V.52A. P.2630—2641.
12. Ho, I.-T. Insight to agglomeration and chemical reactions of $CoAl_2O_4$ inoculants in IN718 processed by selective laser melting / I.-T. Ho, K.-C. Chang, D. Tiparti, A.-C. Yeh, S. Tin // *J. Alloys Comp.* 2021. V.883. P.1—13. Art.160753.
13. Грекова, М.В. Комплексное модифицирование многокомпонентных сплавов / М.В. Грекова, А.В. Калинин, Е.А. Джур, Т.В. Носова // *Космічна наука і технологія*. 2019. Т.25. №3. С.25—31.
14. Anuchkin, S.N. Effect of the size factors on the heterophase interaction of exogenous refractory compound nanoparticles with sulfur in a model nickel

- melt / S.N. Anuchkin, V.T. Burtsev, A.V. Samokhin, I.A. Gvozdkov // Russian Metallurgy (Metally). 2012. №3. P.178—184.
15. *Anuchkin, S.N.* Interaction of alumina and aluminomagnesium spinel nanoparticles with sulfur in model iron melts / S.N. Anuchkin, V.T. Burtsev, A.V. Samokhin // Russian Metallurgy (Metally). 2016. №1. P.4—11.
16. *Anuchkin, S.N.* Interaction of exogenous zirconium oxide nanophases with sulfur and tin in nickel melts / S.N. Anuchkin, V.T. Burtsev, A.V. Samokhin // Russian Metallurgy (Metally). 2016. №11. P.1042—1048.
17. *Соколов, Г.Н.* Механизм влияния ультрадисперсных тугоплавких компонентов, содержащихся в сварочных материалах, на формирование структуры наплавленного металла / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак, И.В. Зорин, А.А. Артемьев, Ю.Н. Дубцов, А.А. Антонов, С.К. Елсуков // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2016. №9 (188). С.116—120.
18. *Мансуров, Р.Р.* Энтропийная природа адсорбции додецилбензосульфата натрия на наночастицах оксидов алюминия и железа в водной среде / Р.Р. Мансуров, А.П. Сафронов, Н.В. Лакиза // ЖФХ. 2016. Т.90. №6. С.890—895.
19. *Гузенкова, А.С.* Производство стали, чистой от примесей цветных металлов / А.С. Гузенкова, С.С. Иванов, Г.А. Исаев, В.А. Кудрин. — М. : МГВМИ, 2008. 118 с.
20. *Nogi, K.* Surface tension of liquid Fe-(Cu, Sn, Cr) and Ni-(Cu, Sn) binary alloys / K. Nogi, W.B. Chung, A. McLean, W.A. Miller // Mater. Trans. JIM. 1991. V.32. №2. P.164—168.
21. *Ниженко, В.И.* Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов : справочник / В.И. Ниженко, Л.И. Флока. — М. : Металлургия, 1981. 208 с.
22. *Anuchkin, S.N.* Interaction of exogenous zirconia nanoparticles with tin in model complex nickel alloys / S.N. Anuchkin, A.V. Samokhin // Russian Metallurgy (Metally). 2019. №1. P.63—67.
23. *Глебовский, В.Г.* Плавка металлов и сплавов во взвешенном состоянии / В.Г. Глебовский, В.Т. Бурцев. — М. : Металлургия, 1974. 176 с.
24. *Куликов, И.С.* Раскисление металлов / И.С. Куликов. — М. : Металлургия, 1975. 504 с.
25. *Aleksandrov, A.A.* Effect of zirconium on the oxygen solubility in liquid nickel and Ni-Fe melts / A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii // Russian Metallurgy (Metally). 2016. №9. P.832—838.
26. *Ishii, F.* Equilibrium between yttrium and oxygen in liquid iron and nickel / F. Ishii, S. Banya // ISIJ International. 1995. V.35. №3. P.280—285.
27. *Dashevskiy, V.Ya.* Deoxidation equilibrium of zirconium in the iron-nickel melts / V.Ya. Dashevskiy, A.A. Aleksandrov, A.G. Kanevskiy, L.I. Leont'ev // ISIJ International. 2013. V.53. №7. P.1120—1124.
28. *Туркдоган, Е.Т.* Физическая химия высокотемпературных процессов / Е.Т. Туркдоган. — М. : Металлургия, 1985. 344 с.
29. *Buzek, Z.* Fundamental thermodynamic data on metallurgical reactions and interactions of elements in system significant for metallurgical theory and practice / Z. Buzek. — Ostrava : Vyzkumny ustav hutnictvi zezeza, 1979. 110 с.
30. *Anuchkin, S.N.* Investigation of the zirconium forms in nickel melts containing exogenous refractory oxide nanophases / S.N. Anuchkin, E.K. Kazenas, V.A. Volchenkova, N.A. Andreeva, T.N. Penkina // Inorgan. Mater. : Appl. Res. 2018. V.9. №3. P.546—550.