

УДК 669.018.44:669.245

О.Г. Оспенникова¹, П.Г. Мин¹, В.Е. Вадеев¹, В.А. Калицев¹, В.В. Крамер¹

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОНДИЦИОННЫХ ОТХОДОВ ДЕФОРМИРУЕМОГО СПЛАВА ВЖ175 ДЛЯ ДИСКОВ ГТД

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-1-1

В ВИАМ разработана ресурсосберегающая технология получения жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 для дисков турбины с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных. Разработанная технология позволяет получать металл, не уступающий по содержанию легирующих элементов, примесей и механическим свойствам сплаву, изготовленному из свежих шихтовых материалов. При этом стоимость сплава, полученного с использованием до 100% отходов, включая некондиционные, на 20–30% ниже по сравнению со сплавом, выплавленным по промышленной технологии с использованием до 50% кондиционных отходов.

Ключевые слова: отходы, вакуумная индукционная плавка, рафинирование, редкоземельные металлы, жаропрочный никелевый сплав, примеси.

The resource-saving production technology of wrought superalloy VG175 for gas-turbine disks with use up to 100% scrap, including off-grade scrap, has been developed in VIAM. This technology allows manufacturing metal, which is not worse than the alloy made from pure charge materials in such parameters as the content of alloying elements, impurities and mechanical properties.

The cost of the alloy produced with use up to 100% scrap, including off-grade scrap, is 20–30% lower in comparison with the alloy produced in accordance with the industrial technology with utilization up to 50% specification scrap.

Keywords: scrap, vacuum induction melting, refinement, rare earth metals, superalloy, impurities.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Создание перспективных двигателей и других изделий авиационной техники невозможно без применения в них новых материалов, в числе которых важную роль играют никелевые жаропрочные сплавы, в значительной степени определяющие повышенный уровень тактико-технических характеристик, надежности и ресурса этих изделий [1, 2].

В последние годы в ВИАМ разработаны деформируемые никелевые жаропрочные сплавы для дисков турбины и сварных деталей горячего тракта перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) и промышленные технологии их производства, что позволило начать их внедрение в изделия ОАО «Авиадвигатель», ОАО НПО «Сатурн» и др. [3].

Однако широкое внедрение этих сплавов в отечественное двигателестроение сдерживается вследствие их высокого легирования дефицитными и дорогостоящими компонентами.

Для решения этой задачи наряду с совершенствованием технологий производства полуфабрикатов предложено использовать при выплавке перспективных деформируемых сплавов образующиеся при их получении отходы [4–9].

В настоящее время существует промышленная технология производства деформируемого сплава ВЖ175, допускающая применение до 50% кондиционных отходов. Для рафинирования отходов от этих примесей в основном используются редкоземельные металлы: лантан, скандий, церий, магний.

В ВИАМ разработана технология, позволяющая при выплавке сплава ВЖ175 применять до 100% кондиционных отходов. Однако для большей рационализации использования дорогостоящих и дефицитных элементов необходима разработка технологии, которая позволила бы применять также и некондиционные отходы: гарнисаж, корольки, скрап, но в первую очередь – стружку, поскольку данный вид отходов образуется на моторостроительных заводах при изготовлении самих деформируемых сплавов и изделий из них в наибольшем количестве.

Некондиционные отходы по мере образования загрязняются различными примесями [10–12]: происходит окисление поверхности, на стружке после механической обработки остаются масла и эмульсии, содержащие значительное количество серы и углерода. Для обеспечения чистоты сплава, полученного с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных, на уровне сплава, выплавленного из свежих шихтовых материалов по промышленным технологиям, необходима разработка специальных технологических приемов, включающих подготовку отходов и рафинирование расплава [13–17].

Анализ известных теоретических положений термодинамики и кинетики процессов вакуумной металлургии показывает, что наиболее эффективным решением этой задачи может быть легирование сплавов редкоземельными металлами (РЗМ).

В работах [18–20] показано применение РЗМ при переработке отходов литейных жаропрочных никелевых сплавов, которые образуются на моторостроительных и ремонтных заводах и имеют повышенную загрязненность вредными примесями и неметаллическими включениями.

В работе [21] представлены результаты исследования, проведенного в ВИАМ по рафинированию некондиционных отходов деформируемых никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи, а также показана эффективность комплексного рафинирования с использованием новых малоизученных РЗМ: эрбия и диспрозия, введение которых в отходы позволило существенно снизить уровень вредных примесей в полученном металле. Выбор именно этих редкоземельных элементов обусловлен тем, что давление упругости паров у них выше, чем у лантана, церия и иттрия, широко применяемых в настоящее время [22]. В связи с этим их остаточное содержание в сплаве после введения повышенного количества этих РЗМ должно быть минимальным и тем самым не окажет влияния на химический состав получаемого сплава.

Авторами разработана ресурсосберегающая технология получения жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 для дисков турбины с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных. Применение разработанных технологий позволит использовать образующиеся при производстве кондиционные и некондиционные отходы и получать перспективный деформируемый сплав ВЖ175, не уступающий по качеству сплаву аналогичного назначения, производимому из чистых шихтовых материалов. При этом стоимость сплава, полученного с использованием до 100% отходов, включая некондиционные, на 20–30% ниже стоимости сплава, выплавленного по промышленной технологии с использованием до 50% кондиционных отходов.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся перспективный деформируемый жаропрочный никелевый сплав ВЖ175, предназначенный для изготовления дисков ГТД, а также отходы, в том числе некондиционные, данного сплава: стружка, скрап, гарнисаж, корольки.

Сушку и прокалку отходов перед выплавкой проводили в электропечи типа ПВП-1000/12,5, разливку металла – в стальные трубы, внутренний диаметр которых составлял 70 и 90 мм. Выплавляли слитки в вакуумной индукционной печи (ВИП) ВИАМ–2002 в тиглях емкостью 10 и 20 кг. Переплавление полученных слитков проводили в вакуумной дуговой установке с расходуемым электродом VAR L200. Деформацию заготовок осуществляли на прессе с усилием 1600 тс, оборудованном изотермической установкой УИДИН-500.

Методом количественного микрорентгеноспектрального анализа на установке JCMA-733 с использованием энергодисперсионного микроанализатора Inca Energy определяли локальный состав образцов.

Содержание легирующих элементов в сплаве определяли на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 EXPLORER, микропримесей – на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой XSERIES 2, углерода и серы – на анализаторе Leco CS600 [23], газов (кислорода и азота) – на анализаторе Leco TCH600.

Результаты

Для предварительной подготовки некондиционных отходов деформируемого суперсплава ВЖ175 разработана схема очистки, включающая измельчение крупногабаритных отходов, пескоструйную обработку для удаления остатков керамики, промывку в обезжиривающем растворе и сушку в печи электросопротивления. Данная схема обеспечивает эффективное снижение содержания серы и углерода в отходах благодаря удалению остатков масел и эмульсий, применяемых в оборудовании для токарной обработки (табл. 1).

Таблица 1

Содержание примесей и газов в образцах отходов до и после предварительной очистки

Образец (некондиционные отходы)	Содержание примесных элементов, % (по массе)	
	C	S
Загрязненный маслами и эмульсией	0,21	0,0026
Очищенный по разработанной схеме	0,072	0,0011

По разработанной схеме подготовлены различные виды некондиционных отходов, в том числе стружка, гарнисаж, корольки и скрап.

Для выплавки сплава с применением подготовленных некондиционных отходов разработаны две технологические схемы (рис. 1):

– первая включает получение сплава в три этапа, в том числе подготовку отходов, выплавку марочной шихтовой заготовки (МШЗ) в ВИП с использованием некондиционных отходов, выплавку слитков (расходуемых электродов) сплава ВЖ175 с применением МШЗ в ВИП;

– вторая разрабатывалась с целью сокращения продолжительности и трудоемкости процесса получения сплава и объединяет второй и третий этапы в один, включающий выплавку расходуемых электродов сплава ВЖ175 с использованием некондиционных и кондиционных отходов в ВИП.

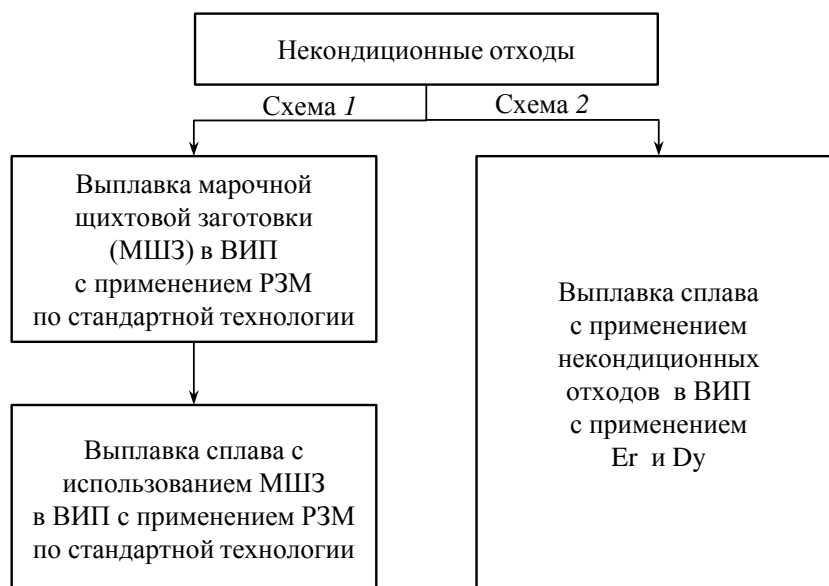


Рис. 1. Технологические схемы выплавки деформируемого суперсплава ВЖ175 с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных

С целью осуществления первой технологической схемы сначала выплавляли марочную шихтовую заготовку сплава ВЖ175. В качестве исходных шихтовых материалов использовали некондиционные отходы сплава ВЖ175 (85% от общей массы плавки) и кондиционные отходы в виде головных частей слитков (15% от общей массы плавки).

Рафинирование отходов от вредных примесей при выплавке МШЗ проводили в несколько стадий. В качестве первой рафинирующей добавки вместе с отходами в тигель загрузили кальций и провели нагрев и расплавление завалки индукционным методом в среде аргона. Вторую рафинирующую добавку, в качестве которой использовали РЗМ (лантан, эрбий и диспрозий), вводили в расплав после проведения высокотемпературного рафинирования расплава. В качестве третьей рафинирующей добавки применили магний, который вводили незадолго перед разливкой расплава.

Содержание легирующих элементов и примесей в марочной шихтовой заготовке сплава ВЖ175 представлено в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Содержание легирующих элементов в марочной шихтовой заготовке деформируемого сплава ВЖ175

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)								
	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	V	C
<i>I</i>	10,32	14,33	2,46	4,40	3,15	2,09	4,56	0,32	0,06
Требования по ТУ	9,4–11,0	14,8–16,0	2,9–3,4	4,0–4,8	3,5–4,0	2,3–2,8	4,1–4,6	0,4–0,8	0,04–0,08

Таблица 3

Содержание примесей в марочной шихтовой заготовке деформируемого сплава ВЖ175

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)								
	Pb	Bi	As	Sn	Fe	Si	S	O	N
<i>I</i>	0,00001	<0,00001	0,0001	0,0002	0,2	0,07	0,0006	0,0018	0,0013

Исследования химического состава показали, что содержание многих легирующих элементов, таких как кобальт, вольфрам, алюминий, титан, ванадий, находится вне установленных ТУ пределов. В связи с этим при выплавке сплава ВЖ175 с применением

МШЗ необходимо проводить экспресс-анализ в процессе плавки для корректировки химического состава. Полученное содержание кислорода, азота и серы в марочной шихтовой заготовке значительно ниже, чем в используемых некондиционных отходах, однако при выплавке сплава необходимо провести дополнительное рафинирование для более глубокого удаления этих примесей.

Полученную МШЗ применили при выплавке сплава ВЖ175 на установке ВИАМ–2002 на плавке 2. Поскольку состав МШЗ имел отклонения от расчетного состава, то для доводки сплава использовалась свежая шихта (~4–5% от массы плавки). По результатам экспресс-анализа (табл. 4) в процессе проведения плавки подшихтовки не потребовалось. Микролегирование проводилось по стандартной технологии: применялись РЗМ (церий, лантан, скандий) и ШЗМ (магний).

При осуществлении технологической схемы 2 на плавке 3 в качестве шихты также применялись некондиционные отходы сплава ВЖ175 (85% от общей массы плавки) и кондиционные отходы в виде головных частей слитков (15% от общей массы плавки). Доводка сплава до заданного состава на данной плавке проводилась посредством экспресс-анализа (табл. 4), при этом масса подшихтовки (свежей шихты) составила ~15% от массы плавки.

Таблица 4

Результаты химического экспресс-анализа, проводимого в процессе выплавки сплава ВЖ175 с использованием некондиционных отходов

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)							
	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	V
2	10,25	15,15	3,13	4,3	3,73	2,56	4,29	0,51
3	10,92	15,03	2,52	4,48	3,19	2,24	4,44	0,33
Требования по ТУ	9,4–11	14,8–16	2,9–3,4	4–4,8	3,5–4	2,3–2,8	4,1–4,6	0,4–0,8

В качестве приемов рафинирования применяли высокотемпературное рафинирование расплава и легирование редкоземельными и щелочно-земельными металлами. Помимо РЗМ (церия, лантана и скандия) в стандартной технологии применяли эрбий и диспрозий, как и при выплавке МШЗ. Кроме того, на плавке 3, как и при выплавке марочной шихтовой заготовки, в завалку загружали отходы сплава ВЖ175 совместно с кальцием в виде лигатуры Ni–Ca.

Проведенный химический анализ полученных слитков показал соответствие сплава, выплавленного по обеим схемам, требованиям ТУ по легирующим элементам (табл. 5).

Таблица 5

Содержание легирующих элементов в сплаве ВЖ175, выплавленном с использованием до 100% отходов по различным технологическим схемам

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)								
	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	V	C
2	9,68	14,83	3,06	4,32	3,80	2,64	4,24	0,51	0,059
3	9,92	15,11	3,09	4,3	3,91	2,58	4,23	0,51	0,073
Требования по ТУ	9,4–11	14,8–16	2,9–3,4	4–4,8	3,5–4	2,3–2,8	4,1–4,6	0,4–0,8	0,04–0,08

Более близкий к заданному состав получен на плавке 3, однако для доводки состава данной плавки потребовалось большое количество свежей шихты (~15%), которое необходимо было ввести после проведения экспресс-анализа. Учитывая ограниченный объем тигля и полученное при экспресс-анализе значительное отклонение легирующих элементов от заданного состава, следует вывод, что в ряде случаев, особенно при

выплавке в промышленных условиях, дошихтовка до заданного состава при выплавке сплава ВЖ175 по данной схеме может оказаться невозможной.

В полученных слитках определили содержание примесей (табл. 6).

Таблица 6

Содержание примесей в сплаве ВЖ175, выплавленном с использованием до 100% отходов по различным технологическим схемам

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)								
	Pb	Bi	As	Sn	Fe	Si	S	O	N
2	<0,00001	<0,000005	0,00014	<0,0002	0,29	0,094	0,0002	0,0005	0,0008
3	0,00002	<0,000005	0,00018	<0,0002	0,15	0,056	0,0002	0,0008	0,001

По результатам анализа содержание серы в обеих плавках зафиксировано на одном и том же низком уровне (2 ppm), содержание кислорода и азота в плавке 2 несколько ниже, чем в плавке 3, что свидетельствует о неполном рафинировании сплава при осуществлении технологической схемы 2. Содержание примесей цветных металлов, железа и кремния в обеих плавках пребывает на достаточно низком уровне.

Исследования локального химического состава показали, что в образце плавки 3 обнаружен оксид на основе диспрозия и эрбия (табл. 7), микроструктура данного образца представлена на рис. 2. В образце плавки 2 фазы, содержащие эрбий и диспрозий, не обнаружены.

Таблица 7

Локальный химический состав фазы, содержащей Er и Dy, в деформируемом жаропрочном никелевом сплаве ВЖ175, выплавленном с использованием до 100% отходов (в том числе некондиционных) по технологической схеме 2

Условный номер образца	Содержание элементов, % (по массе)															
	Mg	Al	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	La	Ce	Dy	Er	W	Σ
3	0,8	2,2	1,4	0,7	Н/о*	3,9	7,3	53,1	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	10,5	10,4	Н/о	90,3**

* Н/о – не обнаружено.

** Остальное – до 100% кислород.

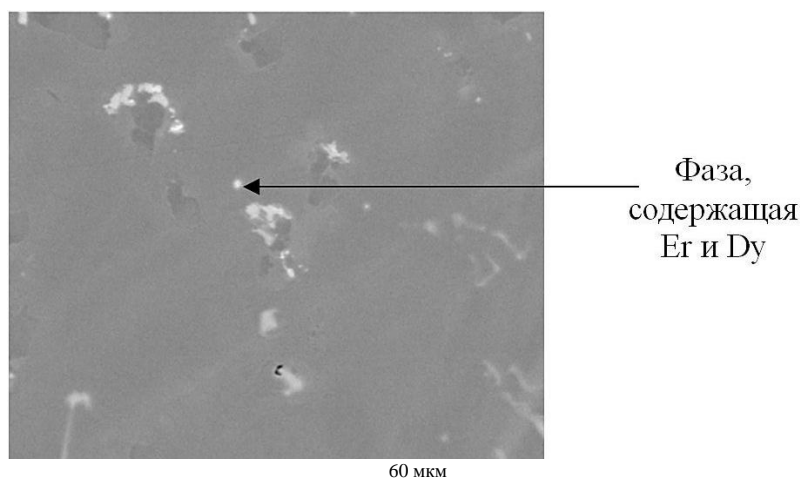


Рис. 2. Микроструктура образца из сплава ВЖ175, выплавленного с применением некондиционных отходов (плавка 3)

Таким образом, в отличие от применения технологической схемы 1, при выплавке сплава ВЖ175 по технологической схеме 2 в полученном металле остается некоторое количество эрбия и диспрозия, а их влияние на свойства сплава пока не изучено.

На основании результатов проведенных исследований для разработки технологии выплавки деформируемого суперсплава ВЖ175 с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных, за основу взята технологическая схема 1, поскольку она схема обеспечивает эффективное снижение содержания примесей и не изменяет фазовый состав сплава, и технологические параметры плавки 2.

По разработанной технологии изготовили партию сплава ВЖ175 с применением до 100% некондиционных и кондиционных отходов (плавка 4). Изготовление включало в себя подготовку отходов, выплавку МШЗ, выплавку слитков (расходуемых электродов) сплава, переплав расходуемых электродов в вакуумной дуговой печи, проведение механической (резка, обточка, деформация) и термической обработки полученных заготовок.

Образцы, изготовленные из полученного сплава, были испытаны на длительную прочность, растяжение и ударную вязкость. Полученные результаты представлены в табл. 8 в сравнении с результатами испытаний механических свойств сплава ВЖ175, выплавленного из свежих шихтовых материалов.

Таблица 8

Механические свойства деформируемого сплава ВЖ175, выплавленного с использованием до 100% отходов (в том числе некондиционных) в сравнении со сплавом, выплавленным из свежих шихтовых материалов

Условный номер плавки	Длительная прочность, ч (при $T=750^{\circ}\text{C}$ и $\sigma=640 \text{ Н/мм}^2$)	σ_b , Н/мм ²	δ , %	Ударная вязкость (КСУ), Дж/см ²
4 (по технологии с применением до 100% отходов)	151	1665	17	32,21
	149	1660	18,5	
	129	1640	16	35,55
	148	1640	18	
5 (по технологии с применением 100% свежей шихты)	125	1580	17	45,85
	118	1570	16	39,72
	122	1580	16	
	124	1590	17	
Требования по ТУ и паспорту на сплав	≥ 100	≥ 1570	≥ 13	≥ 29

По результатам проведенных испытаний установлено, что механические свойства изготовленной партии деформируемого сплава ВЖ175, выплавленного с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных, удовлетворяют требованиям ТУ и паспорта на сплав. По механическим свойствам деформируемый сплав ВЖ175, выплавленный с использованием отходов, не уступает сплаву, выплавленному из свежих шихтовых материалов.

Обсуждение и заключения

В ВИАМ разработана ресурсосберегающая технология изготовления жаропрочного деформируемого сплава ВЖ175 для дисков турбины с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных.

Разработанная технология позволяет получать металл, не уступающий по содержанию легирующих элементов, примесей, а также по механическим свойствам сплаву, изготовленному из свежих шихтовых материалов. При этом стоимость сплава, полученного с использованием до 100% отходов, в том числе некондиционных, на 20–30% ниже по сравнению со сплавом, выплавленным по промышленной технологии с использованием до 50% кондиционных отходов.

Технология выплавки перспективного деформируемого сплава ВЖ175 с использованием до 100% отходов будет востребована в производстве дисков турбины и сварных деталей горячего тракта перспективных ГТД и ГТУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разлива современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 68–78.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
4. Мин П.Г., Горюнов А.В., Вадеев В.Е. Современные жаропрочные никелевые сплавы и эффективные ресурсосберегающие технологии их изготовления // *Технология металлов*. 2014. №8. С. 12–23.
5. Мин П.Г., Сидоров В.В. Опыт переработки литейных отходов сплава ЖС32-ВИ на научно-производственном комплексе ВИАМ по изготовлению литых прутковых (шихтовых) заготовок // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 20–25.
6. Мин П.Г., Сидоров В.В. Ресурсосберегающая технология переработки отходов литейных жаропрочных никелевых сплавов / В сб. трудов XXII Международной науч.-технич. конф. «Литейное производство и металлургия – 2014». Беларусь. 2014. С. 118–123.
7. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Опыт переработки в условиях ФГУП «ВИАМ» литейных отходов жаропрочных сплавов, образующихся на моторостроительных и ремонтных заводах // *Металлург*. 2014. №1. С. 86–90.
8. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов литейных жаропрочных сплавов // *Металлург*. 2014. №5. С. 35–39.
9. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Инновационная технология производства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ с учетом переработки всех видов отходов в условиях сертифицированного серийного производства ФГУП «ВИАМ» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-6-1-1.
10. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Тимофеева О.Б., Мин П.Г. Влияние кремния и фосфора на жаропрочные свойства и структурно-фазовые превращения в монокристаллах их высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 32–38.
11. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Тимофеева О.Б., Филонова Е.В., Исходжанова И.В. Влияние примесей на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №2. Ст. 03. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 18.05.2015).
12. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Влияние фосфора и кремния на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // *МиТОМ*. 2015. №6. С. 55–60.
13. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примеси азота на структуру монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 32–36.
14. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС30-ВИ // *МиТОМ*. 2013. №8. С. 3–7.

15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и его влияние на эксплуатационные свойства // МиТОМ. 2014. №1. С. 8–12.
16. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадеев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнолегированного никелевого расплава через пенокерамический фильтр на содержание примеси серы в металле // Электromеталлургия. 2015. №5. С. 12–15.
17. Сидоров В.В., Мин П.Г., Бурцев В.Т., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование реакций рафинирования в вакууме сложнолегированных ренийсодержащих никелевых расплавов от примесей серы и кремния // Вестник РФФИ. 2015. №1 (85). С. 32–36.
18. Мин П.Г., Сидоров В.В. Рафинирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния в условиях вакуумной индукционной плавки // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-9-1-1.
19. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 1) // Электromеталлургия. 2014. №3. С. 18–23.
20. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 2) // Электromеталлургия. 2014. №5. С. 26–30.
21. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Рафинирование некондиционных отходов деформируемых никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи // Технология металлов. 2015. №4. С. 8–13.
22. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение редкоземельных металлов. М.: Наука, 1975. 52 с.
23. Механик Е.А., Мин П.Г., Гундобин Н.В., Растегаева Г.Ю. Определение массовой доли серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-9-12-12.