

УДК 669.018.44:669.245

П.Г. Мин<sup>1</sup>, В.В. Сидоров<sup>1</sup>, В.Е. Вадеев<sup>1</sup>**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ КРЕМНИЯ  
ПРИ ВЫПЛАВКЕ И НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-3-3

*Исследовано восстановление кремния из литейной керамической формы при направленной кристаллизации путем взаимодействия с расплавами монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ, применяемых для литья лопаток авиационных газотурбинных двигателей. Доказано, что насыщение кремнием происходит за счет взаимодействия углерода с несвязанным оксидом кремния, входящим в состав керамической формы. Установлено, что при отливке монокристаллов из безуглеродистых жаропрочных сплавов насыщение металла кремнием происходит в 4 раза медленнее, чем из сплавов, в систему легирования которых входит углерод.*

*Подтверждена возможность связывания кремния с иттрием в тугоплавкое соединение с последующим удалением из расплава путем фильтрации через пенокерамический фильтр с различной скоростью. Установлено, что данный способ имеет низкую эффективность.*

**Ключевые слова:** кремний, керамика, литейная форма, жаропрочный сплав, примеси, направленная кристаллизация, рафинирование.

*The silicon reduction from a ceramic mold on account of melt interaction in directional solidification of ZhS32-VI and VZhM5-VI single-crystal superalloys for gas turbine blades was studied. It is proved that saturation with silicon took place for a reason of interaction of carbon with free silicon oxide included in the composition of the ceramic mold. It is founded that saturation with silicon occurs of non-carbon single-crystal alloys 4 times slower than carbon-containing alloys.*

*The possibility of form refractory compounds with sulfur and yttrium which remove from melt by filtration with different speed was confirmed. But low efficiency of this method was founded.*

**Keywords:** silicon, ceramic, mold, superalloy, impurities, directional solidification, refinement.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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**

К качеству современных жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), применяемых для литья лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), предъявляются высокие требования. В первую очередь это требования по ограничению содержания вредных примесей, одной из которых является кремний. В ЖНС с равноосной структурой (ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ и др.) его содержание не должно превышать 0,25% (по массе), в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах марок ЖС32-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ и др.: 0,2% (по массе) [1]. Вредное воздействие кремния на структуру и свойства ЖНС связано с тем, что он способствует образованию ТПУ фаз и двойных карбидов  $M_6C$  [2, 3]. В металле с повышенным содержанием

кремния после полной термической обработки увеличивается количество пор гомогенизации, наблюдается огрубление структуры и неоднородное распределение частиц  $\gamma'$ -фазы в междендритных участках. Во время длительного нагружения при рабочих температурах интенсивнее протекает процесс коагуляции, а также растворения дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, что выражается в укрупнении рафтированных пластин  $\gamma'$ -фазы [1]. При этом, как показывает опыт [3–6], повышение содержания кремния приводит к снижению долговечности и пластичности сплава.

В настоящее время не разработано ни одного эффективного способа снижения содержания кремния в ЖНС в условиях вакуумной индукционной плавки. В работе [7] приводятся результаты экспериментов по термодинамическому компьютерному моделированию процесса поведения кремния при введении в модельный расплав закиси никеля. Эксперименты показали возможность снижения содержания кремния в сплаве ВЖМ4-ВИ до 29% (отн.) (максимально – на 0,075% (по массе)). Однако применение данного способа на практике затруднено в связи с изменением химического состава сплава (совместно с кремнием происходит окисление других компонентов сплава – например, алюминия) и насыщением расплава кислородом. В данной работе также представлены результаты термодинамического компьютерного моделирования процесса поведения силицидообразующих элементов, в том числе редкоземельного металла (РЗМ) иттрия в модельном составе на основе никеля в условиях плавки в вакууме. Исследования показали вероятность образования в расплаве силицидов РЗМ. Микролегирование РЗМ в настоящее время уже активно применяется для рафинирования ЖНС от кислорода и серы [8–12]: тугоплавкие соединения в виде оксидов и сульфидов РЗМ удаляются из расплава путем сорбирования на стенках плавильного тигля и пенокерамическом фильтре при разливке. Связывание кремния в тугоплавкие соединения с РЗМ аналогично сере и кислороду может оказаться эффективным способом удаления этой примеси из расплава в условиях вакуумной и индукционной плавки, поэтому требует экспериментальной проверки.

Следует отметить, что исследование поведения кремния при выплавке и отливке монокристаллов ЖНС и разработка эффективного способа рафинирования расплава от этой примеси в настоящее время особенно актуально. Это связано с возникающими проблемами при переработке литейных отходов из серийного сплава ЖС32-ВИ, содержание кремния в которых часто превышает допустимую норму (0,2% (по массе)). Разработанные технологии выплавки данного сплава с применением отходов не позволяют снизить содержание кремния в сплаве [13–26], поэтому приходится разбавлять отходы свежими шихтовыми материалами с целью получения годного металла по содержанию кремния.

Повышение содержания кремния в литейных отходах монокристаллических ЖНС связано с длительным контактом расплава с керамическими материалами тигля, формы и стержней, при котором имеет место взаимодействие с восстановлением кремния из свободного (несвязанного) оксида  $\text{SiO}_2$ , содержание которого в керамике формы может достигать 10–15%, а в стержневых массах – от 2 до 7%. Кроме того, расплав ЖНС при выплавке пребывает в длительном контакте с керамическим тиглем, для повышения термической стойкости которого обычно используют муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), который при высоких температурах плавки (~1600°C) также может взаимодействовать с расплавом, насыщая его кремнием.

Механизм процесса восстановления кремния при взаимодействии расплава с керамическими материалами тигля и формы ранее не был изучен, а разработка эффективного способа рафинирования ЖНС от примеси кремния требует продолжения исследований. Поэтому целью данной работы являлись изучение поведения кремния при

выплавке и направленной кристаллизации монокристаллических ЖНС и исследование возможности удаления этой примеси путем связывания ее в соединения с РЗМ и фильтрации расплава. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.1. «Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [27]. Представленные результаты получены при выполнении работ по проекту ориентированных фундаментальных научных исследований №13-0812055\_офи\_м.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбраны серийные монокристаллические ЖНС: ренийсодержащий сплав ЖС32-ВИ и безуглеродистый ренийсодержащий сплав ВЖМ5-ВИ, которые в настоящее время применяются для изготовления рабочих лопаток серийных и перспективных авиационных ГТД. Состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав жаропрочных никелевых сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ**

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)										
	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Re	Nb	Al	Ti	Ta
ЖС32-ВИ*	Основа	0,12–0,17	4,5–5,3	9,0–9,5	0,9–1,3	8,1–8,9	3,6–4,3	1,4–1,8	5,7–6,2	–	3,7–4,4
ВЖМ5-ВИ**	Основа	≤0,015	4,0–5,0	8,0–10,0	1,6–2,2	5,5–6,5	3,6–3,9	–	5,7–6,2	0,6–1,0	5,5–6,5

\* Патент РФ №2148099 от 27.04.2000.

\*\* Патент РФ №2318030 от 27.02.2008.

Расчет свободной энергии образования соединений при взаимодействии компонентов сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ с SiO<sub>2</sub> проводили с помощью программы ASTD при температуре 1600°C.

Выплавку сплавов проводили в вакуумной индукционной печи (ВИП) ВИАМ-2002 в тигле емкостью 20 кг. Отбор проб жидкого металла для химического анализа примесных элементов в процессе плавки осуществляли путем погружения в расплав стальной пробницы многоразового использования. Разливку металла проводили в стальные трубы  $\varnothing$ 90 мм через воронку с установленным пенокерамическим фильтром. Скорость фильтрации при прохождении расплава через пенокерамический фильтр регулировали путем уменьшения сечения отверстий в разливочной воронке, установленной над фильтром.

Направленную кристаллизацию литых прутковых заготовок из данных сплавов проводили методом LMC (Liquid Metal Cooling) на промышленной установке УВНК-9А с компьютерным управлением процессом.

Содержание легирующих элементов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре VARIAN 730-ES. Содержание кремния определяли масс-спектрометрическим методом на спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICPQ с приставкой лазерного пробоотбора NWR 266 [28], содержание серы – на газоанализаторе Leco TC-600 [29].

Исследование локального химического состава образцов проводили методом качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на аппарате «Суперпроб-733» (JСМА-733 фирмы Jeol, Япония) с использованием энергодисперсионного микроанализатора Inca Energy.

### Результаты и обсуждение

Шихтовые материалы являются одним из источников поступления кремния при выплавке в ЖНС. Проведенные расчеты, основанные на сертифицированных данных о фактическом содержании примесей в шихтовых материалах, показали, что при выплавке монокристаллических ЖНС из свежих шихтовых материалов (в зависимости от марки) в сплав переходит до 0,02% (по массе) кремния (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание кремния в шихтовых материалах сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ**

Шихтовые материалы	Содержание [Si] в шихтовых материалах, % (по массе)	Внесено в сплав [Si], % массе, с учетом содержания в сплаве	
		ЖС32-ВИ	ВЖМ5-ВИ
Ni	0,0005	0,00030	0,00031
Cr	0,11	0,00540	0,00495
Co	0,086	0,00800	0,00774
Mo	0,003	0,00003	0,00006
W	0,0004	0,00003	0,00002
Re	0,0006	0,00237	0,00002
Al	0,0014	0,00008	0,00008
Ti	0,1	–	0,00008
Ta	0,0012	0,00005	0,00007
Nb	0,026	0,00042	–
Итого		0,01668	0,01333

Другим основным источником поступления кремния в монокристаллический ЖНС являются керамические материалы, содержащие свободный (несвязанный) оксид  $\text{SiO}_2$ . Поэтому с целью определения возможных реакций восстановления кремния из керамики при отливке монокристаллов методом направленной кристаллизации проведен термодинамический анализ основных реакций взаимодействия  $\text{SiO}_2$  со всеми легирующими элементами, входящими в состав сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ при температуре 1600°C, который показал, что наименьшую свободную энергию взаимодействия ( $\Delta G = -423,30$  кДж/моль) имеет реакция:

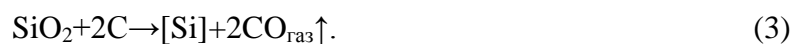


Она же является единственной реакцией возможной в прямом направлении, поскольку ее  $\Delta G$  имеет отрицательную величину, в отличие от остальных реакций типа:



где Me – легирующий элемент сплавов ЖС32-ВИ или ВЖМ5-ВИ.

Следующей по величине свободной энергией взаимодействия при 1600°C является реакция восстановления кремния из  $\text{SiO}_2$  углеродом с образованием газообразного CO:



Значение  $\Delta G$  данной реакции положительно, однако оно имеет относительно низкое значение (24,97 кДж/моль). Кроме того, расчет  $\Delta G$  не учитывает всех условий в ВИП (давление, постоянное индукционное воздействие, взаимодействие компонентов сплава между собой), поэтому требует экспериментальной проверки.

Для исследования закономерностей восстановления кремния из керамики литейной формы, содержащей несвязанный оксид  $\text{SiO}_2$ , сплавы ЖС32-ВИ (содержание углерода 0,15% (по массе)) и ВЖМ5-ВИ (содержание углерода  $\leq 0,005\%$  (по массе)) пятикратно переплавляли с заливкой расплава в керамическую форму и последующей

направленной кристаллизацией по стандартному для каждого сплава режиму. Таким образом, проведена имитация возврата литейных отходов в производство, что имеет место при серийном литье лопаток из монокристаллических ЖНС. Полученные результаты приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

**Содержание кремния, углерода и алюминия в сплаве ЖС32-ВИ**

Условный номер переплава	Содержание элементов, % (по массе)					
	Si		C		Al	
	0,121	изменение содержания	0,145	изменение содержания	6,30	изменение содержания
1	0,144	+0,023	0,105	-0,040	6,30	0
2	0,154	+0,010	0,069	-0,036	6,33	+0,03
3	0,183	+0,029	0,035	-0,034	6,40	+0,07
4	0,192	+0,009	0,023	-0,012	6,43	+0,03
5	0,232	+0,040	0,014	-0,009	6,54	+0,11

Таблица 4

**Содержание кремния, углерода и алюминия в сплаве ВЖМ5-ВИ**

Условный номер переплава	Содержание элементов, % (по массе)					
	Si		C		Al	
	0,012	изменение содержания	0,0033	изменение содержания	5,92	изменение содержания
1	0,020	+0,008	0,0023	-0,0010	5,82	-0,10
2	0,031	+0,011	0,0023	0	5,84	+0,02
3	0,035	+0,004	0,0021	-0,0002	5,83	-0,01
4	0,040	+0,005	0,0007	-0,0014	5,87	-0,04
5	0,044	+0,004	<0,0005	-0,0002	5,87	0

Как видно из результатов химического анализа, повышение содержания кремния в сплаве сопровождается снижением содержания углерода, но не алюминия, т. е. насыщение сплавов кремнием происходит за счет взаимодействия углерода со свободным (несвязанным) оксидом  $\text{SiO}_2$  керамической формы по реакции (3). При этом в безуглеродистом сплаве после пятого переплава содержание кремния увеличилось на 0,032% (по массе), а в углеродистом сплаве – на 0,11% (по массе). Содержание алюминия в металле всех переплавов практически не изменилось. Это свидетельствует в пользу того, что алюминий не участвует в реакции восстановления кремния из  $\text{SiO}_2$  формы, т. е. реакция (2) не протекает.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что при отливке лопаток из безуглеродистых жаропрочных сплавов насыщение металла кремнием происходит в 4 раза медленнее, чем из сплавов, в систему легирования которых входит углерод. Однако проблема насыщения кремнием остается актуальной для обоих классов литейных ЖНС, поэтому необходима разработка эффективного способа удаления кремния из расплава при выплавке в ВИП.

Для нейтрализации и удаления кремния из расплава при выполнении работы предполагалось связать его в тугоплавкое соединение с РЗМ и затем адсорбировать на пеннокерамическом тигле при разливке расплава. Данное предположение основано на существовании соединений кремния с РЗМ, температура плавления которых заметно выше температуры расплава – например, для  $\text{YSi}$  она составляет 1840°C [30].

Проведена серия плавов сплава ЖС32-ВИ с содержанием кремния 0,287% (по массе), т. е. выше нормы по ТУ:  $\leq 0,2\%$  (по массе), и введением РЗМ (иттрия) в

повышенном количестве (0,5% (по массе)). Перед введением иттрия сплав подготавливали с применением различных технологических приемов, в том числе высокотемпературного рафинирования (ВТР) и раскисления щелочно-земельными металлами (табл. 5).

Таблица 5

**Влияние технологии рафинирования расплава  
на содержание кремния и серы в сплаве ЖС32-ВИ**

Условный номер плавки	Технология рафинирования	Содержание элементов, % (по массе)	
		Si	S
1	Без рафинирования	0,287	0,00037
2	Mg (вакуум)+Y+фильтрация при разливке	0,243	0,00038
3	Mg (аргон)+Y+фильтрация при разливке	0,254	0,00032
4	Ca+Mg+Y+фильтрация при разливке	0,261	0,00016
5	ВТР+Ba+Y+фильтрация при разливке	0,272	0,00020

Как видно из данных табл. 5, для рафинирования расплава от кремния эффективнее оказалось использование совместного введения кальция или магния и иттрия с последующей фильтрацией расплава через пенокерамический фильтр.

В результате анализа локального химического состава методом МРСА установлено, что при введении иттрия в сплав, загрязненный кремнием, образуются неметаллические включения – силициды и оксисилициды иттрия, содержащие 4–12% (по массе) [Si], 14–18% (по массе) Y, 40–60% (по массе) Ni, остальное – небольшие количества Al, Cr, Co и [O].

Таким образом, подтверждена возможность связывания кремния с иттрием в тугоплавкое соединение, однако такой способ обладает относительно низкой эффективностью: из анализа данных табл. 5 следует, что при введении в сплав ЖС32-ВИ иттрия содержание в сплаве кремния удалось снизить максимально на 0,044% (по массе) – с 0,287 до 0,243% (по массе), тогда как содержание серы максимально снизилось более чем в 2 раза – с 0,00037 до 0,00016% (по массе).

За счет снижения скорости фильтрации при разливке расплава через пенокерамический фильтр удалось несколько повысить эффективность удаления из металла кремния (табл. 6).

Таблица 6

**Влияние скорости фильтрации при разливке на содержание примесей  
в сплаве ЖС32-ВИ**

Условный номер плавки	Технология рафинирования	Скорость фильтрации, кг/с	Содержание элементов, % (по массе)	
			Si	S
1	Без рафинирования	–	0,308	0,0037
2	Ca+Mg+Y+фильтрация при разливке	0,60	0,271	0,0010
3	То же	0,47	0,251	0,0006

При пониженной скорости 0,47 кг/с содержание кремния в металле уменьшилось – с 0,308 до 0,251% (по массе), т. е. – на 0,057% (по массе), тогда как при стандартной скорости фильтрации 0,60 кг/с – только до 0,271% (по массе), т. е. – на 0,037% (по массе). Одновременное микролегирование РЗМ совместно с фильтрацией позволило снизить содержание серы при стандартной скорости фильтрации в 3,7 раза, а при пониженной – в 6 раз, т. е. эффективность рафинирования расплава от примеси серы намного выше, чем от примеси кремния, несмотря на более высокое содержание кремния в сплаве.

С практической точки зрения у данного способа имеется ряд недостатков. С одной стороны, это низкая эффективность удаления кремния из расплава (снижение на уровне десятых долей процента), с другой – введение РЗМ в повышенных количествах (0,5% (по массе)) может отрицательно повлиять на структуру и эксплуатационные характеристики сплавов.

### Заключения

Экспериментально доказано, что при отливке монокристаллов ЖНС насыщение кремнием происходит за счет взаимодействия углерода со свободным (несвязанным) оксидом  $\text{SiO}_2$ , содержащимся в керамической форме. При отливке монокристаллов из безуглеродистых жаропрочных сплавов насыщение металла кремнием происходит в 4 раза медленнее, чем из углеродсодержащих.

Подтверждена возможность связывания кремния с иттрием в тугоплавкое соединение с последующим удалением из расплава путем фильтрации через пенокерамический фильтр при разливке. Однако данный способ требует введения повышенного количества РЗМ (0,5% (по массе)) и обладает низкой эффективностью: удаление кремния происходит в несколько раз медленнее по сравнению с удалением серы из расплава.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что проблема насыщения кремнием монокристаллических ЖНС остается актуальной и необходимо продолжать исследования в области разработки эффективного способа рафинирования ЖНС от примеси кремния.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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 из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 32–38.
2. Тигрова Г.Д., Коркка С.И., Гребцова Т.М. Влияние кремния на фазовый состав сплавов на никелевой основе // *МиТОМ*. 1980. №4. С. 38–41.
3. Сидоров В.В., Морозова Г.И., Петрушин Н.В. и др. Фазовый состав и термостабильность литейного жаропрочного никелевого сплава с кремнием // *Металлы*. 1990. №1. С. 94–98.
4. 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: 07.03.2017).
5. 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 (720). С. 55–59.
6. Sidorov V.V., Rigin V.E., Min P.G., Folomeikin Yu.I. Effect of phosphorus and silicon on structure and properties of highly refractory cast alloys and development of effective methods for eliminating their unfavorable effect // *Metal Science and Heat Treatment*. 2015. Vol. 57. No. 5–6. P. 364–368.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадеев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнелегированного никелевого расплава через пенокерамический фильтр на содержание примеси серы в металле // *Электromеталлургия*. 2015. №5. С. 12–15.
11. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Исследование процессов рафинирования в вакууме сложнелегированных никелевых расплавов от примеси серы // *Металлы*. 2015. №6. С. 57–63.
12. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Вадеев В.Е. Исследование серы и фосфора в литейных жаропрочных никелевых сплавах и разработка эффективных способов их рафинирования // *Технология металлов*. 2015. №12. С. 2–9.
13. 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.
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP. С. 68–78.
15. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Получение Re–Ru содержащего сплава с использованием некондиционных отходов // *Металлургия машиностроения*. 2012. №3. С.15–17.
16. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов литейных жаропрочных сплавов // *Металлург*. №5. 2014. С. 35–39.
17. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 97–105.
18. 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.
19. 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: 07.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-1-1.
20. 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.
21. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электromеталлургия*. 2016. №9. С. 30–41.
22. 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.
23. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Resources-saving technology for recycling off-grade waste products cast from superalloys // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 5–6. P. 360–366.
24. Min P.G., Goryunov A.V., Vadeev V.E. Modern Nickel Superalloys and the Efficient Resource-Saving Technologies of Their Production // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015. No. 13. P. 1060–1068.
25. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Rigin V.E. Resource-Saving Technologies of Making Advanced Cast and Deformable Superalloys with Allowance for Processing All Types of Wastes // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016. No. 12. P. 1187–1195.
26. Оспенникова О.Г., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов деформируемого сплава ВЖ175 для дисков ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-1-1.

- 
27. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
  28. Якимович П.В., Алексеев А.В., Мин П.Г. Определение низких содержаний фосфора в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-2-2.
  29. 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% (по массе) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
  30. Лякишев Н.П., Алисова С.П., Банных О.А. и др. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник*. М.: Машиностроение, 2000. Т. III, кн. 1. 837 с.