



УДК 669.14.046.516

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-4-4

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ  
ВЫСОКОПРОЧНОЙ МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ  
СТАЛИ ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т),  
МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ РЗМ**

А.И. Щербаков

*кандидат технических наук*

С.А. Крылов

В.А. Калицев

*кандидат технических наук*

В.А. Игнатов

**Февраль 2015**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

А.И. Щербаков<sup>1</sup>, С.А. Крылов<sup>1</sup>, В.А. Калицев<sup>1</sup>, В.А. Игнатов<sup>1</sup>

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ МАРТЕНСИТОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т), МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ РЗМ

*Сталь ВКС-180-ИД рекомендуется для производства высоконагруженных силовых деталей шасси, планера, двигателя. Исследованы металлургические особенности выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД в вакуумной индукционной (ВИ) печи с переплавом в вакуумной дуговой (ВД) печи с применением выбранной системы микролегирования на основе РЗМ и введением оксида никеля. Технология позволяет получать стали с низким содержанием газов и примесей (углерод  $\leq 0,005\%$ ; кислород  $\leq 0,004\%$ ; азот  $\leq 0,003\%$ ), что обеспечивает высокий уровень механических свойств как в продольном, так и поперечном направлении (предел прочности, ударная вязкость, пластичность).*

**Ключевые слова:** высокопрочная сталь, мартенситостареющая сталь, выплавка, переплав, микролегирование РЗМ, оксид никеля, раскисление, газы, примеси, гомогенизация, ковка, прокатка, отжиг, закалка, термическая обработка, предел прочности, ударная вязкость, пластичность, неметаллические включения, карбиды, карбонитриды, балл зерна.

A.I. Shcherbakov, S.A. Krylov, V.A. Kalitsev, V.A. Ignatov

## Development of a technology for melting of high-strength maraging steel VKS-180-ID micro-alloyed with REMs

*VKS-180-ID steel is recommended for production of high-loaded parts, landing gears, airframe and engine. Metallurgical characteristics of high-strength maraging steel VKS-180-ID melt in a vacuum induction furnace (VI) with the subsequent remelting in a vacuum arc furnace (VA) using the chosen system of REM-based micro-alloying and addition of nickel oxide were studied. The technology allows production of steels with a low content of gases and impurities (carbon  $\leq 0.005\%$ ; oxygen  $\leq 0.004\%$ ; nitrogen  $\leq 0.003\%$ ) providing a high level of mechanical properties both in longitudinal and in transverse directions (tensile strength, impact strength, ductility).*

**Keywords:** high-strength steel, maraging steel, melting, remelting, micro-alloying with REM, nickel oxide, deoxidation, gases, impurities, homogenization, forging, rolling, annealing, hardening, heat treatment, tensile strength, impact strength, ductility, nonmetallic inclusions, carbides, carbonitrides, grain size.

---

<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

В ВИАМ разработан ряд высокопрочных сталей, в том числе мартенситостареющие стали ВКС-170-ИД ( $\sigma_{\text{в}} \geq 1570$  МПа), ВКС-180-ИД и ВКС-180-ИЛ ( $\sigma_{\text{в}} \geq 1700$  МПа), для перспективных изделий авиационной техники, силовых деталей (шасси, планера, двигателя) и изделий других отраслей, работающих в условиях высоких нагрузок.

Особенностью высокопрочных сталей, легированных никелем, кобальтом, молибденом и титаном, является весьма благоприятное сочетание прочностных и пласти-

ческих свойств, высокое сопротивление хрупкому разрушению. Сталь ВКС-180 по прочности превосходит отечественный аналог – сталь ВКС-170 и не уступает зарубежному аналогу – стали Maraging 250 [1–8].

Высокая прочность в этих сталях достигается благодаря старению малоуглеродистого мартенсита с выделением мелкодисперсных фаз  $Ni_3Ti$ ,  $Fe_2Mo$  и др. Фаза  $Ni_3Ti$  является основной упрочняющей фазой, от содержания которой в стали зависит уровень механических свойств.

Эти стали характеризуются высокой плотностью дислокаций, при этом низкое содержание углерода способствует тому, что большая часть дислокаций остается незакрепленной. Последнее, в свою очередь, определяет возможность протекания релаксационных процессов при низких температурах, приводящих к снятию локальных напряжений. Аналогичный эффект наблюдается при низком содержании азота.

Таким образом, для формирования фазы  $Ni_3Ti$  в необходимом количестве и для получения высокой плотности незакрепленных дислокаций необходимо, чтобы содержание примесей было минимальным (углерода  $\leq 0,01\%$ , азота  $\leq 0,005\%$ , кислорода  $\leq 0,005\%$ ). Дополнительное снижение содержания углерода и азота приводит к уменьшению карбидных и карбонитридных выделений, что снижает возможность охрупчивания стали при охлаждении с температур деформации. При этом высвобождается титан для увеличения количества упрочняющей фазы  $Ni_3Ti$ . Однако существующая технология выплавки не обеспечивает в стали ВКС-180 столь низкого содержания вредных примесей, особенно углерода, удаление которого из расплава при выплавке и переплаве представляет определенные трудности при наличии в составе стали титана (до 0,5%) и алюминия (до 0,15%), что служит препятствием для избирательного окисления углерода. Таким образом, не обеспечиваются условия для термодинамического взаимодействия углерода с кислородом и, как следствие, получения благоприятного сочетания прочностных и пластических характеристик.

Работа посвящена разработке технологии выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180, микролегированной РЗМ, с введением оксида никеля, обеспечивающего снижение в 2–3 раза содержания вредных примесей, в том числе углерода, а также выбору и разработке методики введения РЗМ в расплав при проведении ВИ плавки. Разработанная технология позволила снизить количество вредных примесей и повысить стабильность получения необходимых свойств ( $\sigma_{в} \geq 1720$  МПа,  $\psi \geq 50\%$ ,  $KCU \geq 49$  Дж/см<sup>2</sup>).

### Материалы и методы

При разработке технологии выплавки мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД, микролегированной РЗМ, за основу взята технология выплавки стали ВКС-180, доработанная с учетом освоения новой технологической операции – микролегирования расплава РЗМ с введением в расплав оксида никеля.

Разработанный технологический процесс выплавки мартенситостареющей стали ВКС-180, микролегированной РЗМ, состоит из следующих операций:

- выплавки исходного металла мартенситостареющей стали ВКС-180 в вакуумных индукционных печах и отливки электродов в металлические трубы диаметром 90 мм;
- переплава литых исходных электродов в вакуумной дуговой печи VAR L200 в кристаллизаторы диаметром 100 и 130 мм.

Контроль химического состава и содержания газов и примесей в полученных слитках осуществляли после выплавки в вакуумной индукционной печи, вакуумного дугового переплава и получения полуфабрикатов (прутков, сутунок). Химический состав определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии основных элементов на установке ARL-4460 в соответствии с ГОСТ Р ИСО 13898-2-2006 и ГОСТ Р ИСО 13898-4-2007. Содержание газов и примесей контролировали при помощи метода вакуум-плавления на

установке Leko TC-436 (газовый анализ) в соответствии с ГОСТ 17745–90 и метода сжигания в вакууме на установке Leko CS-444 (анализ углерода и серы) в соответствии с ГОСТ 12344–2003 и ГОСТ 12345–2001.

Образцы были вырезаны в долевым и поперечном направлениях из сутунок. Чистота материала шлифов оценивалась по следующим видам неметаллических включений: оксиды точечные, оксиды строчечные, карбиды точечные, карбиды строчечные, карбонитриды точечные, карбонитриды строчечные.

Оценку неметаллических включений на шлифах проводили на оптическом микроскопе Leica DM IRM методом сравнения с эталонными шкалами при просмотре всей площади нетравленных шлифов с продольным направлением волокон в соответствии с ГОСТ 1778–70, вариант Ш4 (поле зрения при увеличении  $\times 100$ , продольное направление).

Уровень механических свойств (предел прочности, пластичность, ударную вязкость) определяли на образцах, вырезанных из прутков и сутунок (в продольном и поперечном направлениях) и прошедших рекомендованный для стали ВКС-180-ИД режим термообработки. Испытания образцов на предел прочности и пластичность проводили на испытательной машине Tiratest 2300/1 при 20°C (по ГОСТ Р 1497), на ударную вязкость – на маятниковом копре ИО 5003-0,3 при 20°C (по ГОСТ 9454–78).

### Результаты

С целью выбора технологии выплавки с микролегированием РЗМ стали ВКС-180 проведен анализ научной литературы, в ходе которого выявлены основные тенденции по выплавке особонизкоуглеродистых мартенситостареющих сталей и по применению РЗМ в процессе выплавки [9–11].

В настоящее время для выплавки стали ВКС-180 применяют дуплекс-процессы выплавки – в вакуумной индукционной печи с последующим вакуумным дуговым переплавом (ИД) или электронно-лучевым переплавом (ИЛ). Для работы был выбран дуплекс-процесс (ИД), широко применяющийся в промышленности для выплавки сталей.

В процессе вакуумной индукционной плавки в расплав вводили оксид никеля для создания «углеродного кипа». При взаимодействии оксида никеля с имеющимся углеродом выделяющийся согласно термодинамическим расчетам кислород, соединяясь с углеродом, удаляется из расплава в виде оксида углерода вследствие десорбции СО с реакционной поверхности жидкого металла. Дополнительное раскисление расплава в вакууме с введением РЗМ и последующий вакуумно-дуговой переплав (ВДП) обеспечили низкое содержание газов и серы (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние методов выплавки на содержание примесей в стали ВКС-180**

Метод выплавки	Содержание элементов, % (по массе)			
	C	O	N	S
ВД*	0,012–0,02	0,008–0,010	0,009–0,012	0,006–0,008
ИД*	0,009–0,01	0,004–0,006	0,003–0,006	0,004–0,005
ИЛ*	0,004–0,008	0,0016–0,0019	0,0016–0,0019	0,002–0,003
ИД с РЗМ	0,0036–0,0054	0,0021–0,0028	0,0017–0,0024	0,0013–0,0032
ИД с РЗМ и оксидом никеля	0,0023–0,0035	0,0023–0,0030	0,0022–0,0036	0,0011–0,0033

\*По данным из научно-технической литературы.

Снижение содержания углерода и азота подтверждается сравнительными данными серии исследований, проведенных на одних и тех же исходных плавках. Введение в расплав оксида никеля позволило снизить содержание углерода до 0,0023–0,0036%, т. е. в 2–3 раза по сравнению с известными способами выплавки и с плавками без введения оксида никеля.

Благоприятные термодинамические и кинетические условия при проведении вакуумной индукционной плавки и вакуумного дугового переплава заметно облегчают протекание реакций обезуглероживания благодаря смещению равновесия для процессов, в которых участвует газовая фаза. Удаление азота при вакуумных процессах происходит вследствие десорбции молекул азота с поверхности расплава, одновременно наблюдается частичное всплытие нитридов титана, их диссоциация и удаление из расплава. Пониженное давление (до  $1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.) в зоне плавления, высокая температура процесса (до  $\sim 1850^\circ\text{C}$ ) и равномерный обогрев расходуемой заготовки в процессе переплава позволяют снизить термодинамическую устойчивость большинства неметаллических фаз, а также создают условия для их диссоциации и восстановления другими элементами с последующим удалением из металла.

При введении РЗМ в сталь в виде лигатур с никелем или в виде чистых металлов преследовали две цели – раскисление расплава и микролегирование стали. Раскисление проводили в процессе плавки после расплавления основных компонентов стали, а микролегирование – после дегазации расплава в конце плавки (перед сливом).

Выбор системы микролегирования обоснован рядом свойств РЗМ. Известно, что РЗМ, с одной стороны, обладая высоким сродством к кислороду, азоту, сере и другим примесям (по сравнению с железом), образуют легкоплавкие соединения с примесями, которые удаляются из расплава в процессе плавки и переплава в вакууме. С другой стороны, они могут образовывать тугоплавкие соединения с примесями, превращая их из строчечных в глобулярные, укрепляя и очищая границы зерен.

Методика введения микродобавок РЗМ основывалась на разделении предварительного воздействия РЗМ в процессах раскисления расплава, образования легкоплавких соединений с кислородом и азотом, а также с углеродом. В качестве таких раскислителей были использованы церий, диспрозий и лантан [12–16].

Микролегирование и модифицирование стали ВКС-180 после введения основных элементов стали (титана) проводили с помощью таких РЗМ, как диспрозий, неодим, празеодим, эрбий и лантан. Следует отметить, что все вводимые РЗМ обладают достаточно низкой упругостью пара (на уровне  $1 \cdot 10^{-1}$ – $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.), поэтому их вводят в вакууме. При  $1600^\circ\text{C}$  РЗМ можно вводить в виде чистых металлов, однако для более полного растворения их вводят в виде лигатур с никелем. Это связано с тем, что процесс окисления указанных РЗМ протекает очень быстро и при их введении в расплав может попасть кислород (исключение составляет диспрозий, который окисляется гораздо медленнее остальных). Диспрозий, неодим, празеодим, эрбий и лантан вводили в расплав в количестве от 0,01 до 0,05%. Остаточное содержание РЗМ составляло от 0,00001–0,0001%.

По разработанной технологии в ВИ печи были выплавлены электроды из стали ВКС-180-ИД, микролегированной РЗМ, с введением оксида никеля, и проведен их последующий ВДП в кристаллизатор  $\varnothing 130$  мм.

Особенностью разработанной технологии выплавки являются процессы предварительного раскисления расплава РЗМ, введения технологической добавки – оксида никеля, окончательного раскисления и модифицирования РЗМ, обеспечивающие низкий уровень содержания газов и примесей (углерода 0,0023–0,0035%, азота 0,0022–0,0036%, кислорода 0,0023–0,0030%) и благоприятные условия для формирования основной упрочняющей фазы ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ ) в необходимом объеме.

Для подтверждения полученной зависимости влияния способа выплавки на содержание углерода проводили сравнительный анализ механических свойств ( $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\psi$ ) после термической обработки. Охрупчивающий режим термообработки – оценка склонности стали к охрупчиванию, которое происходит вследствие выделения карбонитридных фаз (в основном по границам первичного аустенитного зерна) – позволяет достаточно достоверно оценить влияние углерода на характеристики пластичности (по-

перечного сужения) в мартенситостареющих сталях [17]. При содержании углерода в металле в интервале 0,015–0,02% на образцах, вырезанных поперек волокна, из стали ВКС-210-ИД (0,6–0,9% Ti) пластичность составляет 5–8%, из стали ВКС-180-ИД (0,3–0,55% Ti): 15–20%. При содержании углерода 0,0023–0,0035% на образцах из стали ВКС-180-ИД охрупчивания не происходит.

Зависимость характеристик пластичности от процентного содержания углерода с оценкой наличия охрупчивающих карбидных сеток показана в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние способа выплавки на пластичность стали ВКС-180  
после «охрупчивающего» режима термообработки**

Способ выплавки	Содержание углерода, % (по массе)	$\psi$ , %	Наличие охрупчивающих сеток*
ВД	0,015–0,020	7–3	Есть
ВИ+ВДП	0,009–0,012	12–15	Есть
ВИ+ЭЛП	0,0036–0,0086	39–15	Нет, есть
ВИ+ВДП с оксидом никеля	0,0023–0,0035	48–39	Нет

\*В зависимости от содержания углерода: при  $C < 0,005\%$  (по массе) – нет, при  $C > 0,005\%$  (по массе) – есть.

Слитки опытной партии из стали ВКС-180-ИД после ВДП для выравнивания химического состава и улучшения литой структуры подвергали гомогенизирующей изотермической выдержке в термических печах с последующим охлаждением на воздухе.

Исследования механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) проводили на образцах в продольном и поперечном направлениях после термической обработки по стандартным режимам:

- высокотемпературная закалка – для растворения карбонитридных сеток. При переносе заготовки из печи в воду не допускали остывания образцов. По результатам контроля микроструктуры выделений по границам зерен не обнаружено;

- трехкратная закалка с температур ниже высокотемпературной закалки – для получения измельченного зерна (6–7 балл по ГОСТ 5639) и однородной структуры;

- завершающая термообработка – упрочняющее старение с охлаждением на воздухе. После термообработки проводили испытания на кратковременную прочность (растяжение при 20°C) и ударную вязкость [18–20]. Результаты испытаний приведены в табл. 3. При плавках с использованием оксида никеля уровень свойств несколько выше и более равномерный.

Особого внимания заслуживает тот факт, что механические свойства, полученные для образцов, вырезанных в поперечном направлении волокна, соответствуют уровню свойств образцов, вырезанных в продольном направлении, что является существенным показателем качества металла для мартенситостареющих сталей [21–23].

Для оценки влияния выбранной системы микролегирования на структуру опытной партии стали ВКС-180, микролегированной РЗМ, был проведен металлографический анализ.

Механические свойства стали ВКС-180-ИД при 20°C

Способ выплавки	Направление вырезки образца	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_b$	$\delta$	$\psi$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
		МПа		%		
ВИ+ВДП с РЗМ	Д	1745–1765	1765–1785	9,4–10	56–57	72,0–73,5
	П	1755–1760	1775–1785	9–9,4	55–56	47,6–56,2
ВИ+ВДП с РЗМ и оксидом никеля	Д	1835–1765	1865–1885	10–10,5	61–62	75–78,5
	П	1825–1845	1855–1875	9–10	56–59	55,5–63,5
Промышленная технология	Д	–	$\geq 1720$	–	$\geq 45$	$\geq 49$
	П	–	$\geq 1720$	–	$\geq 35$	$\geq 34,9$

После термообработки проведены контроль и оценка структуры образцов, размера зерна и наличия карбидных и карбонитридных сеток – величина зерна варьируется от 1 до 3 балла, карбидные и карбонитридные сетки не обнаружены. Однако при плавках с применением выбранной системы микролегирования с наибольшим суммарным остаточным содержанием РЗМ было получено оптимальное сочетание размера зерна и чистоты по включениям: размер зерна 2–3 балла, границы зерна чистые (рис. 1), неметаллические включения оцениваются не выше 1 балла (оксиды строчечные, оксиды точечные, нитриды строчечные, нитриды точечные) (рис. 2).



Рис. 1. Микроструктура стали ВКС-180-ИД (размер зерна 2–3 балла, границы зерна чистые)



Рис. 2. Микроструктура стали ВКС-180-ИД (неметаллические включения не выше 1 балла)

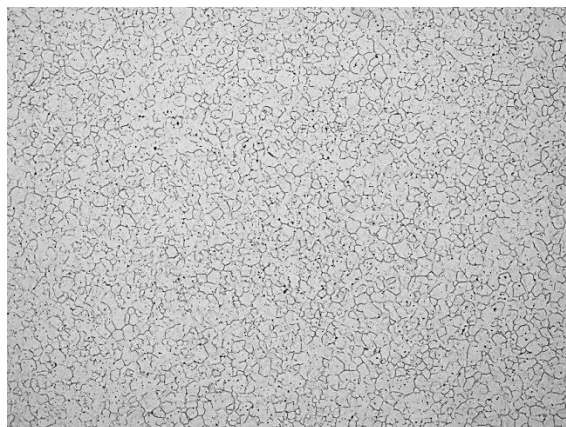


Рис. 3. Микроструктура стали ВКС-180 (размер зерна 6–7 балла)

По результатам металлографического анализа установлено, что микролегирование опытной партии мартенситостареющей стали ВКС-180 редкоземельными металлами позволило обеспечить мелкозернистую структуру с размером зерна 6–7 балла (рис. 3), а также высокий уровень механических свойств ( $KCU$  и  $\psi$ ).

Учитывая положительное влияние микролегирования РЗМ стали ВКС-180-ИД и введения технологической добавки оксида никеля на снижение содержания углерода, кислорода и азота, целесообразно проверить данную технологию в промышленных условиях.

### Обсуждение и заключения

Разработана технология выплавки мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД, микролегированной РЗМ, с введением оксида никеля в расплав в процессе ВИ плавки.

Показана возможность значительного снижения содержания углерода – до 0,0023%, азота – до 0,0022%, кислорода – до 0,0023%.

Выбранная система микролегирования и разработанная технология выплавки – дуплекс-процесс ВИ+ВДП, обеспечивают высокий уровень механических свойств в продольном и поперечном направлениях ( $\sigma_b=1745\text{--}1905$  МПа,  $\psi=55\text{--}62\%$ ,  $KCU=57,2\text{--}78,5$  Дж/см<sup>2</sup>) и величину зерна 6–7 балла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
6. 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.
7. Салахова Р.К. Коррозионная стойкость стали 30ХГСА с «трехвалентным» хромовым покрытием в естественных и искусственных средах //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 59–66.

8. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
9. Ломберг Б.С., Покровский А.А., Топилин В.В., Щербаков А.И. Влияние способа переплава на качество мартенситостареющей высокопрочной стали //Сталь. 1973. №8 С. 725.
10. Щербаков А.И., Ломберг Б.С., Оборенкова А.С. Некоторые закономерности кристаллизации при ЭЛП и ВДП //Специальная электрометаллургия. 1978. № 22. С. 22–40.
11. Шалин Р.Е., Щербаков А.И., Ломберг Б.С., Качанов Е.Б. Электронно-лучевой переплав – прогрессивный метод получения высококачественных сталей и жаропрочных сплавов /В сб. Авиационные материалы. М.: ВИАМ. 1978. №3. С. 46–59.
12. Ревякина О.К. Склонность к тепловому охрупчиванию нержавеющей мартенситостареющих сталей //МиТОМ. 1981. №4. С. 36–39.
13. Братухин А.Г., Демченко О.Ф., Долженков Н.Н., Кривоногов Г.С. Высокопрочные коррозионностойкие стали современной авиации. М.: МАИ. 2006. С. 112–121, 130–143.
14. Саввина Н.А., Косарина Е.И., Мирошин К.Г., Степанов А.В. Теоретический расчет и практические способы определения вероятности обнаружения дефектов в авиационных материалах /В сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2005. №1. С. 16–22.
15. Кривоногов Г.С., Каблов Е.Н. Границы зерен и их роль в охрупчивании высокопрочных коррозионностойких сталей //Металлы. 2002. №1. С. 35–45.
16. Кривоногов Г.С., Каблов Е.Н. Математическая модель структурной диаграммы малоуглеродистых коррозионностойких сталей и ее применение при разработке новых материалов //Металлы. 2001. №5. С. 42–48.
17. Дюбанов В.Г., Ломберг Б.С., Герасимов Т.Н., Большов Л.А., Щербаков А.И. Исследование возможности обезуглероживания стали, раскисленной титаном и алюминием в вакууме /В сб. трудов конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали». Челябинск. 1971. С. 53–56.
18. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
19. Тонышева О.А., Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Шалькевич А.Б. Новая высокопрочная экономнолегированная азотсодержащая сталь повышенной надежности //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 84–88.
20. Вылежнев В.П., Коковьякина С.А., Симонов Ю.Н., Сухих А.А. Повышение характеристик надежности мартенситостареющей стали 03Н18К9М5Т путем создания структуры типа «нанотриплекс» //МиТОМ. 2010. №11. С. 36–39.
21. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситостареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 81–84.
22. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситостареющие стали в авиастроении //Авиационная промышленность. 2014. №1. С. 24–28.
23. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplo-nagruzhennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
3. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.

4. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij ukklad [Sixth technological way] //Nauka i zhizn'. 2010. № 4. S. 2–7.
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of current and future high-tech] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
6. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Prioritetnye napravlenija razvitija tehnologij proizvodstva zharoprochnyh materialov dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [Priority areas for the development of production technology of high-temperature materials for aircraft engine] //Problemy chernoj metallurgii i materialovedenija. 2013. №3. S. 47–54.
7. Salahova R.K. Korroziionnaja stojkost' stali 30HGSA s «trehvalentnym» hromovym po-krytiem v estestvennyh i iskusstvennyh sredah [The corrosion resistance of steel 30KhGSA with «trivalent» chrome plated in natural and artificial environments] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 59–66.
8. Kablov E.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [The creation of modern high-temperature materials and production technologies for aviation engine] //Kryl'ja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34–38.
9. Lomberg B.S., Pokrovskij A.A., Topilin V.V., Shherbakov A.I. Vlijanie sposoba pereplava na kachestvo martensitostarejushhej vysokoprochnoj stali [Influence of remelting method on the quality of high-strength steel martensitostareyushey] //Stal'. 1973. №8 S. 725.
10. Shherbakov A.I., Lomberg B.S., Oborenkova A.S. Nekotorye zakonomernosti kristallizacii pri JeLP i VDP [Some regularities of crystallization at ELP and VDR] //Special'naja jelektrometallurgija. 1978. № 22. S. 22–40.
11. Shalin R.E., Shherbakov A.I., Lomberg B.S., Kachanov E.B. Jelektronno-luchevoj pereplav – progressivnyj metod poluchenija vysokokachestvennyh stalej i zharoprochnyh splavov [Electron beam melting – progressive method of obtaining high-quality steels and superalloys] /V sb. Aviacionnye materialy. M.: VIAM. 1978. №3. S. 46–59.
12. Revjakina O.K. Sklonnost' k teplovomu ohrupchivaniju nerzhavejushhih martensitostarejushhih stalej [Propensity to thermal embrittlement of stainless steels martensitostareyuschi] //MiTOM. 1981. №4. S. 36–39.
13. Bratuhin A.G., Demchenko O.F., Dolzhenkov N.N., Krivonogov G.S. Vysokoprochnye korroziionnostojkie stali sovremennoj aviacii [High-strength corrosion-resistant steel of modern aviation]. M.: MAI. 2006. S. 112–121, 130–143.
14. Savvina N.A., Kosarina E.I., Miroshin K.G., Stepanov A.V. Teoreticheskij raschet i prakticheskie sposoby opredelenija verojatnosti obnaruzhenija defektov v aviacionnyh materialah [Theoretical calculations and practical ways to determine the probability of detection of defects in aircraft materials] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. M.: VIAM. 2005. №1. S. 16–22.
15. Krivonogov G.S., Kablov E.N. Granicy zeren i ih rol' v ohrupchivanii vysokoprochnyh korroziionnostojkih stalej [Grain boundaries and their role in the embrittlement of high strength corrosion resistant steels] //Metally. 2002. №1. S. 35–45.
16. Krivonogov G.S., Kablov E.N. Matematicheskaja model' strukturoj diagrammy malouglerodistyh korroziionnostojkih stalej i ee primenenie pri razrabotke novyh materialov [A mathematical model of the structural diagram of low carbon stainless steels and its application in the development of new materials] //Metally. 2001. №5. S. 42–48.
17. Djubanov V.G., Lomberg B.S., Gerasimov T.N., Bol'shov L.A., Shherbakov A.I. Issledovanie vozmozhnosti obezuglerozhivaniya stali, raskislennoj titanom i aljumiem v vakuume [Study of possible decarburization steel deoxidized with titanium and aluminum in vacuo] /V sb. trudov konf. «Sovremennye problemy jelektrometallurgii stali». Cheljabinsk. 1971. S. 53–56.
18. Erasov V.S., Grinevich A.V., Senik V.Ja., Konovalov V.V., Trunin Ju.P., Nesterenko G.I. Raschetnye znachenija harakteristik prochnosti aviacionnyh materialov [The calculated values of the strength characteristics of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 14–16.
19. Tonysheva O.A., Voznesenskaja N.M., Eliseev Je.A., Shal'kevich A.B. Novaja vysokoprochnaja jekonomnolegirovannaja azotsoderzhashhaja stal' povyshennoj nadezhnosti [New high sparingly nitrogen-containing steel of high reliability] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 84–88.

20. Vylezhnev V.P., Kokovjakina S.A., Simonov Ju.N., Suhih A.A. Povyshenie harakteristik nadezhnosti martensitostarejushhej stali 03N18K9M5T putem sozdaniya struktury tipa «nanotripleks» [Improving the reliability characteristics martensitostareyushey steel 03N18K9M5T by creating structures such as «nanotripleks»] //MiTOM. 2010. №11. S. 36–39.
21. Markova E.S., Pokrovskaja N.G., Shal'kevich A.B., Gromov V.I. Martensitostarejushhie stali – novye perspektivnye materialy dlja valov GTD [Martensitostareyuschie steel – new promising materials for turbine engine shafts] //Aviacionnye materialy i teh-nologii. 2012. №S. S. 81–84.
22. Pokrovskaja N.G., Markova E.S., Shal'kevich A.B. Vysokoprochnye konstrukcionnye martensitostarejushhie stali v aviastroenii [High-strength structural steel in aircraft martensitostareyuschie] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2014. №1. S. 24–28.
23. Markova E.S., Jakusheva N.A., Pokrovskaja N.G., Shal'kevich A.B. Tehnologicheskie osobennosti proizvodstva martensitostarejushhej stali VKS-180 [Technological features of steel production martensitostareyushey VKS-180] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 01 (viam-works.ru).