

УДК 669.018.29

Н.А. Якушева¹

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ШАССИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9

Для современных изделий авиационной техники, в том числе для деталей шасси, необходимы новые стали, обеспечивающие повышение весовой эффективности конструкций, прочность, надежность и долговечность работы изделий.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии выплавки и деформации крупногабаритных полуфабрикатов из высокопрочных конструкционных сталей ВКС-9 и ВКС-12 (поковки размером более 300 и 200 мм соответственно), работающих до 250 °С.

Проведены исследования неметаллических включений, прочности, пластичности, вязкости разрушения, выносливости и трещиностойкости.

Ключевые слова: высокопрочная сталь, выплавка, деформация, шасси, механические свойства, усталость, предел прочности.

N.A. Yakusheva¹

HIGH-STRENGTH CONSTRUCTIONAL STEELS FOR LANDING GEARS OF PERSPECTIVE PRODUCTS OF AIRCRAFT EQUIPMENT

For modern products of the aircraft equipment, including those for parts of the landing gears, new steels, ensuring the increase of weight efficiency of structures, durability and reliability of products are of high demand.

FSUE «VIAM» has developed technologies of melting and deformation of large-size billets from high-strength constructional steels VKS-9 and VKS-12 (forgings of more than 300 and 200 mm respectively), operating up to 250 °C.

We have performed researches of steels purity for nonmetallic inclusions, durability, ductility, fracture toughness, fatigue strength and crack resistance.

Keywords: high-strength steel, melting, deformation, landing gear, mechanical properties, fatigue, tensile strength.

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

К деталям и узлам самолетов и другой авиационной техники зачастую предъявляются более высокие требования по качеству, чем к наземной технике. Это обусловлено высокими требованиями к безопасности полетов, поскольку любая неисправность узла или детали самолета может привести к разрушению всей конструкции. От качества изготавливаемого материала также в значительной степени зависит конкурентоспособность летательных аппаратов. Для военной техники важны такие характеристики, как продолжительность полета, скорость, маневренность, возможность пилотирования в любую погоду, грузоподъемность; для гражданской – надежность, пожаробезопас-

ность, экологичность и т. д. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что условия эксплуатации современной авиационной техники определяют крайне жесткие требования к материалам, из которых ее изготавливают: необходимость получения высокой прочности конструкции при минимальной плотности и габаритах; обеспечение достаточной надежности и длительного рабочего ресурса при воздействии переменных и значительных силовых нагрузок, чередовании повышенных и пониженных температур, коррозионно-активных сред. В связи с этим используемые в самолетостроении материалы должны обладать высокой удельной прочностью (весовой эффективностью) и жесткостью, коррозионной стойкостью,

сопротивлением усталости, а также трещиностойкостью и рядом других характеристик [1–3].

Высокопрочные конструкционные стали в планере современного самолета составляют 15–20% от его массы. Благодаря высокой удельной прочности, жесткости, усталостной прочности стали находят достаточное применение в самолетостроении, в том числе и для изготовления деталей шасси. Для изготовления деталей планера, в зависимости от условий эксплуатации, применяются стали различных классов: легированные и среднелегированные конструкционные стали, мартенситостареющие, коррозионностойкие аустенитного, мартенситного и переходного аустенитно-мартенситного классов. По сравнению с титановыми сплавами стали обладают меньшей стоимостью и лучшей свариваемостью, обрабатываемостью резанием и технологичностью [4–6].

В отечественном авиастроении для крупногабаритных деталей (балок тележек, основных опор, лонжеронов и др.) нашли применение разработанные во ФГУП «ВИАМ» высокопрочные конструкционные стали марок 30ХГСН2А (30ХГСН2МА), ЭИ643 и ВКС-9, упрочняемые закалкой и низким отпускком на прочность 1700–1950 МПа и работоспособные до 250 °С.

За рубежом для изготовления аналогичных деталей применяются среднелегированные стали марок 4340, 4330, D6AC и др. с прочностью 1400–1800 МПа, а также стали марок 300М (США) и 35NCD16 (Франция), упрочняемые закалкой с низким отпускком на прочность 1850–1930 МПа [7].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии изготовления крупногабаритных полуфабрикатов из высокопрочных конструкционных сталей ВКС-9 и ВКС-12, обеспечивающих уровень прочности 1950–2100 МПа и 2100–2300 МПа соответственно, наряду с высокой вязкостью разрушения, сопротивлением усталости и высокой чистотой металла по неметаллическим включениям.

Разработанные материалы предназначены для применения в высоконагруженных деталях планера самолетов и могут выступать в качестве замены американской стали 300М, используемой для изготовления шасси самолета МС-21.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [8, 9].

Материалы и методы

Предметом исследования являлись поковки из высокопрочных конструкционных сталей ВКС-9 и ВКС-12 размером более 300 и 200 мм соответственно, которые выплавляли в вакуумно-индукционной печи с последующим вакуумно-дуговым переплавом.

Образцы испытывали в продольном и поперечном направлениях. Вырезку образцов проводили из 1/3R (толщины) поковок. Чистоту исследуемого материала оценивали по количеству неметаллических включений на оптическом микроскопе Olympus GX-51 методом сравнения с эталонными шкалами при просмотре всей площади нетравленных шлифов с продольным направлением волокон в соответствии с ГОСТ 1778–70 по варианту Ш4 (поле зрения при увеличении $\times 100$, продольное направление).

Фрактографические исследования поверхности разрушения образцов проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM6490 LV в соответствии с РТМ1.2А.096–2000.

Испытания при статическом растяжении проводили в соответствии с ГОСТ Р 1497–84 на универсальной испытательной машине LFM-125, ударной вязкости – по ГОСТ 9454–78 на маятниковом копре МК.

Сопротивление повторным нагрузкам (σ_{-1} на базе $N=1 \cdot 10^7$ циклов и малоциклового усталости (МЦУ) с коэффициентом асимметрии $R=0,1$ на базе $N=1 \cdot 10^6$ циклов) определяли на круглых образцах и образцах с надрезом с кольцевой выточкой на испытательной машине Walter+BaiLFV-100 в соответствии с ГОСТ 25.502–79.

Определение трещиностойкости (K_{Ic}) проводили на испытательной машине MTS-50 в соответствии с ГОСТ 25.506–85.

Результаты и обсуждение

К материалам шасси, испытываемым при эксплуатации высокий уровень изгибающих напряжений, близких к пределу текучести, наряду с высокой прочностью, предъявляются требования обеспечения высокого соотношения значений $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, низкой анизотропии свойств, высокого значения сопротивления усталости при низкой скорости распространения усталостных трещин, а также высокого сопротивления коррозионному растрескиванию.

Постоянно возрастающие требования к ресурсу заставляют изыскивать возможности повышения вязкости разрушения и сопротивления усталости данного класса сталей. Дальнейшее увеличение прочности не всегда можно реализовать в конструкции. Значительное повышение уровня прочности может быть достигнуто за счет использования процессов высокотемпературной механической обработки при прокатке или

Таблица 1

Загрязненность неметаллическими включениями сталей ВКС-9 и ВКС-12

Сталь	Содержание неметаллических включений в баллах							
	Оксиды		Силикаты			Сульфиды	Нитриды	
	точечные	строчечные	хрупкие	пластичные	недеформирующиеся		точечные	строчечные
ВКС-9	1,0	1,0	0	0	1,0	0	0	0
ВКС-12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0	0

прессовании, а также деформационного старения. Данные процессы применимы только для получения полуфабрикатов небольших сечений (менее 30 мм) и не могут быть реализованы при изготовлении крупногабаритных поковок и штамповок, требуемых для деталей авиастроения. При этом следует отметить, что главная трудность при создании высокопрочных сталей – обеспечение достаточно высоких характеристик трещиностойкости, которые обеспечили бы надежную работу стали в сложных условиях эксплуатации. Применение современных методов выплавки, раскисления, модифицирования, повышающих качество металла, а также разработка оптимальных режимов горячей деформации, обеспечивающих оптимальную структуру, является актуальной задачей.

Для получения более высокопрочной конструкционной среднеуглеродистой стали ВКС-12 с сохранением высокой ударной вязкости химический состав высокопрочной стали ВКС-9 скорректирован в части содержания кремния и углерода, в значительной степени влияющих на прочностные характеристики сталей данного класса, упрочняемых путем легирования твердого раствора и подверженных термической обработке, включающей закалку и низкий отпуск, для получения мартенсита отпуска.

Многолетний опыт работы показал, что хорошее сочетание прочности и пластичности сталей данного класса достигается применением метода вакуумно-индукционной выплавки с раскислением металла редкоземельными элементами, а также последующим вакуумно-дуговым переплавом за счет дегазации металла, т.е. уменьшения содержания вредных примесей, таких как кислород и азот, и, как

следствие, получение чистого металла по неметаллическим включениям (оксидам, сульфидам, нитридам и т.д.) [10, 11]. Более чистая вакуумная технология выплавки сталей позволяет также в значительной степени повысить циклическую прочность за счет уменьшения размера и более однородного распределения неметаллических включений [12].

Следует отметить, что одной из особенностей высокопрочных конструкционных сталей является высокая зависимость свойств (пластичности, ударной вязкости) от структуры, полученной после горячей деформации.

Одним из путей повышения вышеуказанных характеристик и снижения анизотропии свойств в крупногабаритных полуфабрикатах, возникающей вследствие деформации слитка, является применение специальных режимов термообработки, в результате которых происходит выравнивание структуры и снижение ликвационной неоднородности, возникающей в процессе выплавки стали [13, 14].

С целью обеспечения на крупногабаритных полуфабрикатах из высокопрочных конструкционных сталей ВКС-9 и ВКС-12 (более 300 и 200 мм соответственно) высоких показателей прочности и пластичности, имеющих возможность конкурировать с зарубежными аналогами, проведены работы по разработке новых технологий деформации и термической обработки стали, которые обеспечивают однородную структуру с низкой анизотропией свойств.

Далее проводили оценку загрязненности сталей ВКС-9 и ВКС-12 неметаллическими включениями на шлифах, изготовленных в продольном направлении. Полученные данные представлены в табл. 1 и на рис. 1.

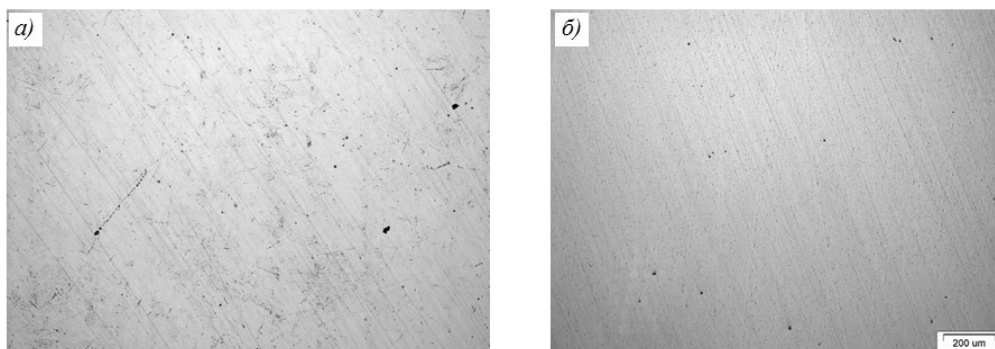


Рис. 1. Неметаллические включения ($\times 100$) в стали ВКС-9 (а) и ВКС-12 (б)

Таблица 2

Прочностные характеристики сталей ВКС-9 и ВКС-12 при 20 °С в сравнении с аналогом

Сталь	Направление волокна	σ_b	$\sigma_{0,2}$	ψ	δ
		МПа		%	
		не менее			
ВКС-9	Продольное	1960	1600	25	8
	Поперечное			20	5
ВКС-12	Продольное	2170	1815	35	9
	Поперечное				
300М (стандарт AMS 6419E)	Продольное	1930	1585	25	7
	Поперечное			15	

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что полуфабрикаты из сталей ВКС-9 и ВКС-12 характеризуются высокой степенью чистоты по силикатам, сульфидам и нитридам: загрязненность неметаллическими включениями может быть оценена от 0 до 1 балла.

Поскольку применение сталей ВКС-9 и ВКС-12 планируется в силовых элементах конструкции шасси самолета, это накладывает определенные требования к выбору образцов, видам и объемам испытаний. Перечень характеристик определяется на основе анализа условий работы силовых элементов из этих материалов. Так как силовые элементы конструкции шасси самолета (оси, штоки, опоры и т. д.) работают на растяжение, изгиб, устойчивость и срез, то при расчете элементов шасси используют характеристики статической прочности полуфабриката. Для этого

в процессе испытаний на образцах определяют характеристики, получаемые при статическом растяжении ($\sigma_b, \sigma_{0,2}, \delta, \psi$) и ударной вязкости при изгибе (KCU, KCV).

Проведено исследование комплекса механических свойств сталей ВКС-9 и ВКС-12 в крупных сечениях при растяжении ($E, \sigma_b, \sigma_{0,2}, \delta_5, \psi$) при 20 °С и ударной вязкости (KCU, KCV) при +20 и -70 °С. Исследование свойств проводили на заготовках, вырезанных в продольном и поперечном направлениях из 1/3R поковок более 200 мм. Полученные результаты представлены в табл. 2 и 3.

Поскольку элементы конструкции шасси являются особо ответственными конструктивными элементами и проектируются на безопасный ресурс, то важной характеристикой также является критерий трещиностойкости K_{Ic} (табл. 4).

Таблица 3

Ударная вязкость сталей ВКС-9 и ВКС-12 в сравнении с аналогом

Сталь	Направление волокна	+20 °С		-70 °С	
		KCU	KCV	KCU	KCV
		Дж/см ² (не менее)			
ВКС-9	Продольное	39	26	23	13
	Поперечное	36	22	18	10
ВКС-12	Продольное	50	–	30	–
	Поперечное	40	–	25	–
300М (стандарт AMS 6419E)	Продольное	–	18	–	–
	Поперечное	–	13	–	–

Таблица 4

Результаты исследований трещиностойкости высокопрочных конструкционных сталей ВКС-9 и ВКС-12 в сравнении с аналогом

Сталь	$K_{Ic}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ (не менее)
ВКС-9	85
ВКС-12	60
300М (стандарт AMS 6419E)	65

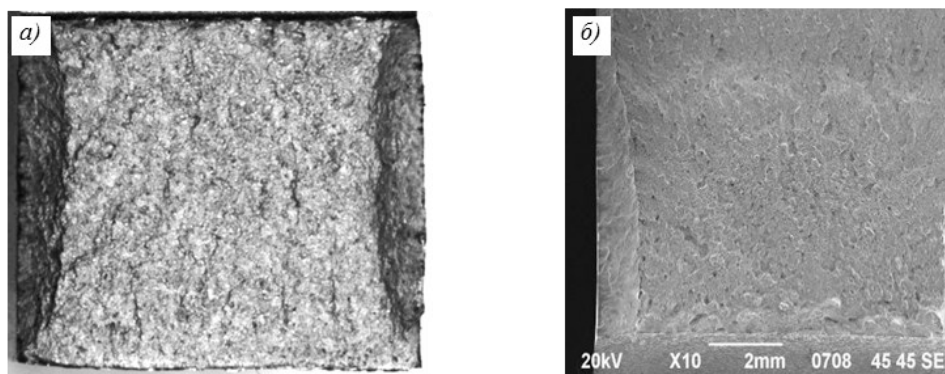


Рис. 2. Типичные изломы образцов из сталей ВКС-9 (а) и ВКС-12 (б)

Установлено, что на крупногабаритных полуфабрикатах из сталей ВКС-9 и ВКС-12 значения характеристик надежности, таких как ударная вязкость и вязкость разрушения, не уступают значениям для зарубежного аналога – стали 300М, что обеспечивает достаточный запас пластичности материалов, который необходим для расчета конструкций планера самолетов.

Проведенный визуальный анализ изломов разрушенных образцов и фрактографические исследования (рис. 2 и 3) показали, что характер изломов высокопрочных конструкционных сталей ВКС-9 и ВКС-12 как при +20 °С, так и при -70 °С, несмотря на высокие значения прочностных характеристик, – пластичный, наблюдается внутризеренное разрушение с формированием вязкого ямочного рельефа без образования хрупких фасеток. Разрушение при -70 °С проходило с образованием фасеток квазискола, что свидетельствует об имеющемся запасе пластичности при отрицательных температурах.

Поскольку шасси самолета работает в условиях периодически повторяющихся нагрузок, то для оценки работоспособности материалов необходимо учитывать действие переменных напряжений. Сопротивление усталости зависит от множества факторов,

среди которых определяющим является вид нагружения, характеризующий напряженно-деформированное состояние образца [15].

Исследования выносливости конструкционных материалов в основном проводятся по механизму, реализующему нагружение по схеме «чистый изгиб с вращением». Данные испытания имитируют напряженное состояние валов и осей большинства механизмов, в которых действуют нагрузки, приводящие к изгибающим моментам. В этом случае цикл нагружения реализуется с коэффициентом асимметрии $R=-1$, который является наиболее опасным по отношению к циклам со средним напряжением цикла. При нагружении по схеме «чистый изгиб с вращением» в образце реализуется неоднородное напряженно-деформированное состояние, когда максимальные напряжения возникают только на поверхности образца, а в центре образца напряжения равны нулю.

Для малоциклового усталости (МЦУ) основной характеристикой является долговечность до разрушения (циклы) в зависимости от амплитуды циклической деформации на базе от $5 \cdot 10^4$ до 10^6 циклов, а для многоциклового усталости (МнЦУ) – предел выносливости при долговечности при высоких напряжениях [16, 17].

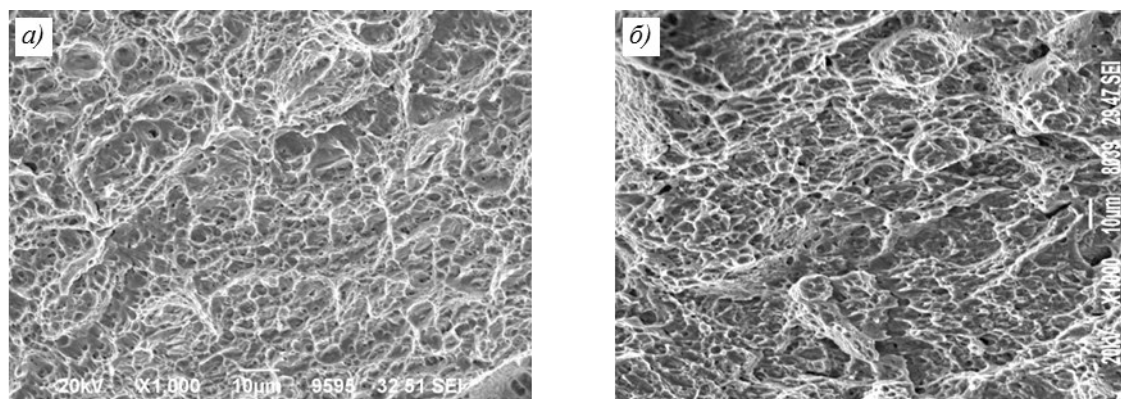


Рис. 3. Фрактографический анализ изломов образцов из сталей ВКС-9 (а) и ВКС-12 (б)

Результаты усталостных испытаний сталей ВКС-9 и ВКС-12 в сравнении с аналогом

Сталь	МЦУ, кцикл			σ_{-1} , МПа, $K_f=1,0$ при $N=10^7$ циклов
	$K_f=1,0$ при $\sigma_{\max}=1000$ МПа	$K_f=1,0$ при $\sigma_{\max}=1200$ МПа	$K_f=2,18$ при $\sigma_{\max}=680$ МПа	
ВКС-9	>530	>250	>700	720
ВКС-12	>200	>120	>100	800
300М	–	>110	–	800

Для определения на сталях ВКС-9 и ВКС-12 предела выносливости проведены испытания по определению МЦУ на базе 10^7 циклов при коэффициенте асимметрии $R=-1$ и МЦУ с коэффициентом асимметрии $R=0,1$ на гладких образцах и с надрезом ($K_f=2,18$) в диапазоне долговечности до 10^6 циклов. Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 5.

Результаты испытаний на усталость образцов из сталей ВКС-9 и ВКС-12, которые отбирались из крупногабаритных полуфабрикатов (поковок), показали высокие значения сопротивления повторным усталостным нагрузкам как на гладких образцах, так и на образцах с концентратором напряжений, не уступающие значениям соответствующих характеристик зарубежной стали 300М.

Полученный уровень механических свойств показывает, что полуфабрикаты из сталей ВКС-9 и ВКС-12 с повышенными характеристиками прочности, ударной вязкости и трещиностойкости не уступают импортной стали 300М, применяемой для

изготовления деталей шасси, и могут использоваться для повышения надежности эксплуатации изделий и снижения массы силовых деталей самолета вследствие увеличения прочности конструкции.

Заключения

1. Разработаны технологии выплавки и деформации крупногабаритных полуфабрикатов из сталей ВКС-9 и ВКС-12 с обеспечением высокой чистоты по неметаллическим включениям и получением равномерной структуры.

2. Проведены исследования комплекса механических свойств и характеристик надежности сталей ВКС-9 и ВКС-12. Установлено, что полученные значения прочности, пластичности и надежности сталей не уступают значениям для зарубежных аналогов.

3. Высокопрочные конструкционные стали ВКС-9 и ВКС-12 могут применяться для изготовления ответственных деталей планера, в том числе для деталей шасси, работающих при температурах до $250\text{ }^\circ\text{C}$.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
2. 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.
3. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2013. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2019).
4. Крылов С.А., Маркова Е.С., Щербаков А.И., Якушева Н.А. Металлургические особенности выплавки высокопрочной мартенситостареющей стали ВКС-180-ИД // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 14–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-14-20.
5. Потак Я.М. Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 210 с.
6. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбил. науч.-техн. сб. М.: ВИАМ, 2002. С. 180–191.
7. Tomita Y. Development of fracture toughness of ultrahigh strength low alloy steels for aircraft and aerospace applications // Materials Science and Technology. 1991. Vol. 7. P. 481–489. DOI: 10.1179/mst.1991.7.6.481.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.

9. 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.
10. Щербаков А.И., Ломберг Б.С., Оборенкова А.С. Некоторые закономерности кристаллизации при ЭЛП и ВДП // Специальная электрометаллургия. 1973. №22. С. 43–44.
11. Сергеев А.Б., Швед Ф.И., Тулин Н.А. Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали. М.: Metallurgia, 1974. 260 с.
12. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН – ЦИАМ, 2013. 515 с.
13. Петраков А.Ф., Покровская Н.Г., Ревакина О.К., Вознесенская Н.М. Высокопрочные стали для силовых узлов планера самолета // Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1982. С. 103–111.
14. Беляков Л.Н., Петраков А.Ф., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Новые высокопрочные стали // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 1977. №8. С. 12–14.
15. Бойцов Б.В., Кишкина С.И., Кравченко Г.Н. и др. Долговечность шарнирно-болтовых соединений летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1996. 256 с.
16. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. 254 с.
17. Гриневич А.В., Ерасов В.С., Якушева Н.А., Терехин А.Л. Усталостная долговечность стали ВКС-9 в условиях симметричного нагружения «растяжение–сжатие» и «изгиб с вращением» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №9 (57). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-11-11.