

УДК 620.172.254

А.Е. Соловьев¹, С.А. Голынец¹, К.К. Хвацкий¹

АНИЗОТРОПИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-12-12

За период 2012–2015 гг. во ФГУП «ВИАМ» проведены важные экспериментальные работы, направленные на получение прочностных характеристик монокристаллов с ориентациями $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ из перспективных жаропрочных никелевых сплавов.

Данная работа посвящена исследованию анизотропии характеристик упругости при растяжении (коэффициента Пуассона и статического модуля упругости) монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с кристаллографическими ориентациями (КГО) $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ в интервале температур 20–1000°C.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, статический модуль упругости, коэффициент Пуассона, кристаллографическая ориентация, анизотропия, коэффициент анизотропии.

For the 2012–2015 period at FSUE «VIAM» carried out important experimental work, aimed at obtaining the strength characteristics of the single crystals with the orientation $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$ of the most promising Nickel-based superalloys.

This work is devoted to study the anisotropic characteristics of elasticity in tension (poisson's ratio and static modulus of elasticity) single crystal Nickel-based superalloys VZHM7 and VZHM8 with crystallographic orientations (CGO) $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ in the temperature range 20–1000°C.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, static modulus of elasticity, poisson's ratio, crystallographic orientation, anisotropy, anisotropy factor.

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

Развитие современных авиационных ГТД и энергетических ГТУ привело к необходимости создания специальных жаропрочных никелевых сплавов для литья монокристаллических лопаток газовой турбины, работающих в экстремальных условиях (высокие температуры – порядка $0,8T_{пл}$, большие механические напряжения, длительная эксплуатация до 10 000 ч, агрессивные среды). Обычный способ создания таких материалов путем оптимизации традиционного легирующего комплекса, включающего вольфрам, молибден, хром, кобальт, гафний, титан, ниобий и др., в настоящее время себя полностью исчерпал. Поэтому современная тенденция развития литейных жаропрочных никелевых сплавов заключается в использовании дефицитных элементов VII и VIII групп Периодической системы Д.И. Менделеева – таких как рений и рутений.

Совместное легирование рением и рутением оказывает синергическое влияние на характеристики монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. В итоге значительно повышается их высокотемпературная длительная прочность и температурная работоспособность. Применение в двигателях разработанных жаропрочных никелевых

сплавов, содержащих рений и рутений, обеспечит повышение на 50–60°C рабочей температуры монокристаллических лопаток из этих сплавов.

В отличие от поликристаллических изотропных материалов механические свойства монокристаллов жаропрочных сплавов анизотропны, т. е. зависят от кристаллографических направлений, вдоль которых эти свойства определяются [1–3].

Кроме того, на механические свойства монокристаллов оказывает влияние дендритная структура. Из монокристаллического слитка определенной ориентации можно вырезать образцы таким образом, что в эквивалентных с кристаллографической точки зрения направлениях, совпадающих с осью приложения нагрузки, эти образцы будут иметь различную дендритную структуру. Например, из монокристаллического слитка ориентации [001] можно изготовить образцы, оси которых параллельны и перпендикулярны оси роста. Эти образцы будут различаться дендритной структурой, хотя кристаллографически они абсолютно идентичны. В первом случае оси дендритов первого порядка располагаются параллельно оси образца, а во втором – перпендикулярно. Следовательно, свойства в этих направлениях также могут быть различными.

Монокристаллические турбинные лопатки из жаропрочных никелевых сплавов отливают таким образом, чтобы их продольная ось совпадала с кристаллографическим направлением монокристалла $\langle 001 \rangle$ [2]. Поскольку механические свойства при растяжении монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов, из которых изготавливают лопатки турбины, значительно зависят от кристаллографических направлений, вдоль которых эти свойства определяются [3], для расчета на прочность лопатки необходимо определять механические свойства не только в направлении отливки, но и в направлениях $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$. Анизотропия характеристик упругости учитывается при расчетах конструкционной прочности монокристаллических лопаток при ресурсном проектировании газовых турбин [4]. Для некоторых монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов изучено влияние кристаллографической ориентации на упругие свойства, а также температурная зависимость этих свойств [3, 5–12].

В данной работе представлены результаты испытаний на растяжение с определением характеристик упругости монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8, а также температурно-ориентационная зависимость коэффициента Пуассона, статического модуля упругости монокристаллов указанных сплавов с ориентациями $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ и соответствующие коэффициенты анизотропии.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Заготовки монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 получали в промышленной установке для направленной кристаллизации УВНК-9А по методу ЛМС (Liquid Metal Cooling). Для зарождения монокристаллической структуры кристаллизующего сплава с заданной кристаллографической ориентацией (КГО) использовали специальные затравочные монокристаллы (затравки) из сплава Ni–W, которые помещали в затравочные полости литейных керамических форм. Использование затравочной технологии литья позволило получить монокристаллы сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ в аксиальном направлении [2].

Образцы для исследования характеристик упругости при растяжении изготавливали из термически обработанных монокристаллических отливок сплава, продольная ось которых совпадала (в пределах 10 град) с одним из кристаллографических направлений $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Испытания по определению коэффициента Пуассона и статического модуля упругости проводили на испытательной машине КАРРА 50DS, оснащенной экстензометрами продольной и поперечной деформации [14]. Крепление экстензометров продольной и поперечной деформации на образце для определения коэффициента Пуассона и статического модуля упругости представлено на рис. 1.

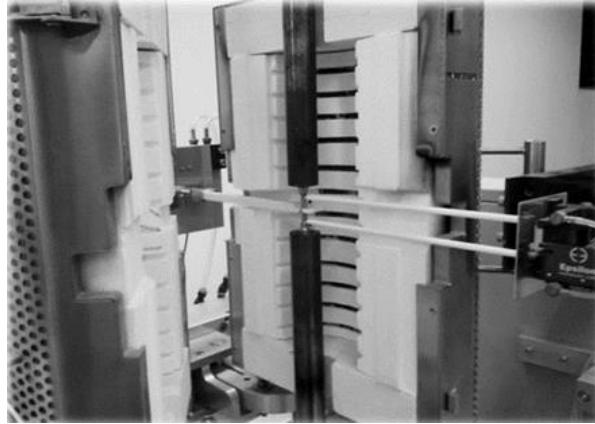


Рис. 1. Крепление экстензометров продольной и поперечной деформации на образце для определения коэффициента Пуассона и статического модуля упругости

Методика проведения испытаний соответствовала ГОСТ 1497 и СТО 1-595-33-444-2014 [13]. Для испытаний использованы гладкие цилиндрические образцы с расчетной длиной рабочей части 25 мм и диаметром 5 мм. Сущность методики заключается в нагружении образца в упругой зоне осевой растягивающей нагрузкой при постоянной температуре и измерении в процессе нагружения продольной и поперечной деформации. В результате испытания определяют коэффициент Пуассона – отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации образца материала, а также статический модуль упругости.

Особенности испытания по определению коэффициента Пуассона жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой обусловлены различием их прочностных свойств в разных кристаллографических направлениях. Для оценки коэффициента Пуассона указанных сплавов необходимо располагать результатами испытаний образцов с различными кристаллографическими ориентациями в направлении действия нагрузки.

Каждая партия образцов с одной кристаллографической ориентацией является самостоятельным объектом исследования, включая проведение испытаний, обработку и представление их результатов в соответствии с используемой методикой.

Перед проведением испытаний для поочередной установки датчика поперечной деформации в азимутальных направлениях [011] и [100] на образцах сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <011> проведена разметка азимутальных направлений металлографическим методом по следам травлений, выявляющих дендритную структуру.

Для анализа ориентационной зависимости коэффициента Пуассона и статического модуля упругости сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <001>, <011> и <111> определены коэффициенты кристаллографической анизотропии $K_x^{<hkl>}$:

$$K_x^{<hkl>} = x^{<hkl>} / x^{<001>}, \quad (1)$$

где $x^{<hkl>}$ – значения коэффициентов Пуассона или статического модуля упругости монокристаллов с ориентациями <hkl>; $x^{<001>}$ – значения коэффициента Пуассона или статического модуля упругости монокристаллов с ориентацией <001> принимаются за базовые.

Результаты и обсуждение

Проведены испытания по определению коэффициента Пуассона и статического модуля упругости образцов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <001>, <011> и <111> при температурах 20, 700, 800, 900 и 1000°C.

Средние значения коэффициента Пуассона (μ_{cp}), статического модуля упругости (E_{cp}) и коэффициентов анизотропии указанных характеристик сплава ВЖМ7 с КГО <001>, <011>, <111> представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 2 и 3.

Таблица 1

Средние значения коэффициента Пуассона (μ_{cp}) и коэффициентов анизотропии сплава ВЖМ7 с КГО <001>, <011> [011], <011> [100], <111>

Температура испытания, °C	μ_{cp} <001>	μ_{cp} <011> [011]	μ_{cp} <011> [100]	μ_{cp} <111>	$K_{\mu[011]}^{<011>}$	$K_{\mu[100]}^{<011>}$	$K_{\mu}^{<111>}$
20	0,45	-0,1	0,73	0,35	-0,22	1,62	0,78
700	0,42	-0,2	0,72	0,32	-0,48	1,71	0,76
800	0,44	-0,24	0,71	0,34	-0,55	1,61	0,77
900	0,48	-0,26	0,74	0,38	-0,54	1,54	0,79
1000	0,57	-0,28	0,81	0,41	-0,49	1,42	0,72

Таблица 2

Средние значения модуля упругости (E_{cp}) и коэффициентов анизотропии сплава ВЖМ7 с КГО <001>, <011>, <111>

Температура испытания, °C	E_{cp} <001>, ГПа	E_{cp} <011>, ГПа	E_{cp} <111>, ГПа	$K_E^{<011>}$	$K_E^{<111>}$
20	140	233	310	1,66	2,21
700	105	185	245	1,76	2,33
800	95	175	233	1,84	2,45
900	85	160	220	1,88	2,59
1000	75	145	205	1,93	2,73

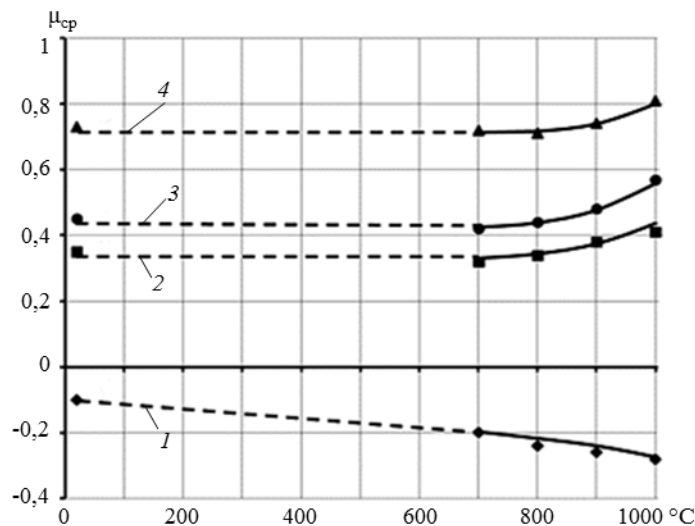


Рис. 2. Средние значения коэффициента Пуассона сплава ВЖМ7 с КГО <011> [011] (1), <111> (2), <001> (3), <011> [100] (4)

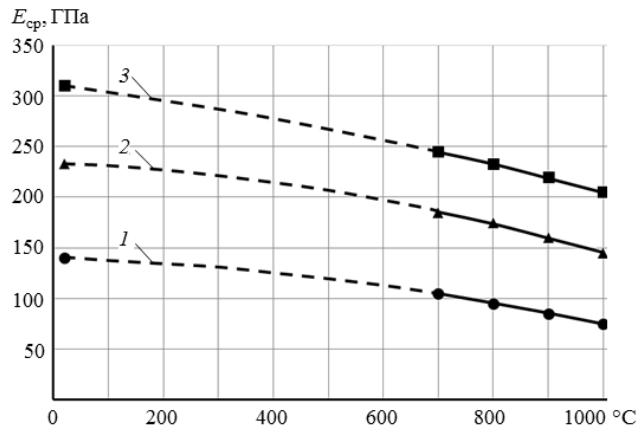


Рис. 3. Средние значения модуля упругости сплава ВЖМ7 с КГО <001> (1), <011> (2), <111> (3)

Средние значения коэффициента Пуассона (μ_{cp}), статического модуля упругости (E_{cp}) и коэффициентов анизотропии указанных характеристик сплава ВЖМ8 с КГО <001>, <011>, <111> представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 4 и 5.

Таблица 3

Средние значения коэффициента Пуассона (μ_{cp}) и коэффициентов анизотропии сплава ВЖМ8 с КГО <001>, <011> [011], <011> [100], <111>

Температура испытания, °C	μ_{cp} <001>	μ_{cp} <011> [011]	μ_{cp} <011> [100]	μ_{cp} <111>	$K_{\mu[011]}^{<011>}$	$K_{\mu[100]}^{<011>}$	$K_{\mu}^{<111>}$
20	0,44	-0,007	0,81	0,15	-0,02	1,84	0,34
700	0,43	-0,09	0,74	0,32	-0,21	1,72	0,74
800	0,42	-0,1	0,77	0,3	-0,24	1,83	0,71
900	0,46	-0,15	0,82	0,36	-0,33	1,78	0,78
1000	0,5	-0,21	0,88	0,43	-0,42	1,76	0,86

Таблица 4

Средние значения модуля упругости (E_{cp}) и коэффициентов анизотропии сплава ВЖМ8 с КГО <001>, <011>, <111>

Температура испытания, °C	$E_{cp}<001>$, ГПа	$E_{cp}<011>$, ГПа	$E_{cp}<111>$, ГПа	$K_E^{<011>}$	$K_E^{<111>}$
20	143	244	328	1,71	2,3
700	111	197	258	1,77	2,32
800	107	195	247	1,82	2,31
900	95	185	243	1,95	2,56
1000	84	163	199	1,94	2,37

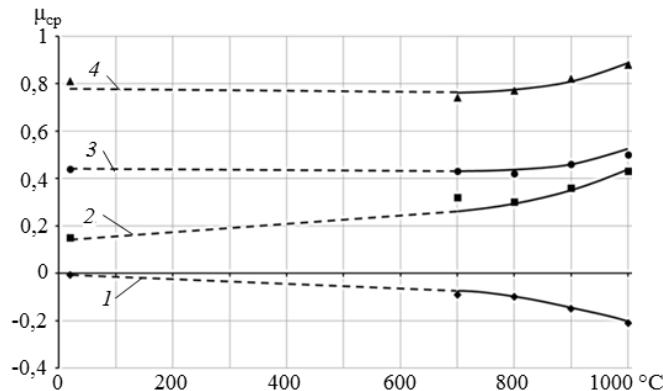


Рис. 4. Средние значения коэффициента Пуассона сплава ВЖМ8 с КГО <011> [011] (1), <111> (2), <001> (3), <011> [100] (4)

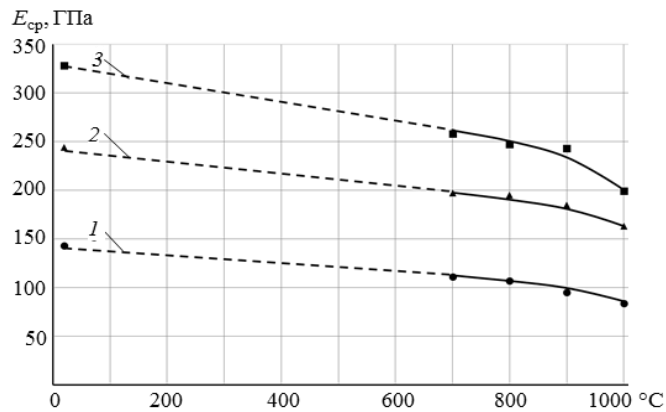


Рис. 5. Средние значения модуля упругости сплава ВЖМ8 с КГО <001> (1), <011> (2), <111> (3)

Полученные значения статического модуля упругости монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 близки к значениям аналогичной характеристики монокристаллов сплава ВЖМ4 [8] и являются типичными для монокристаллов других известных жаропрочных никелевых сплавов с различными системами легирования [3, 10, 11, 15, 16]. Анизотропия значений статического модуля упругости монокристаллов этих сплавов сохраняется во всем исследованном температурном интервале 20–1000°C.

Для монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <001> и <111> коэффициент Пуассона с увеличением температуры до 900°C повышается незначительно, при температурах >900°C наблюдается повышение коэффициента Пуассона (с 0,48 до 0,57 – для КГО <001> и с 0,38 до 0,41 – для КГО <111> для сплава ВЖМ7; с 0,46 до 0,5 – для КГО <001> и с 0,36 до 0,43 – для КГО <111> для сплава ВЖМ8).

Для монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <011> коэффициент Пуассона в азимутальном направлении [100] с повышением температуры возрастает (с 0,71 до 0,81 – для сплава ВЖМ7; с 0,74 до 0,88 – для сплава ВЖМ8), а для азимутального направления [011] коэффициент Пуассона является отрицательной величиной, возрастающей по абсолютному значению (с |0,1| до |0,28| – для сплава ВЖМ7, с |0,007| до |0,21| – для сплава ВЖМ8).

Анизотропия значений коэффициента Пуассона монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 сохраняется во всем исследованном температурном интервале 20–1000°C.

Заключения

Определены закономерности температурной и ориентационной зависимости характеристик упругости ($E_{ср}$, $\mu_{ср}$) монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с ориентациями <001>, <011> и <111>.

Установлено, что при всех исследуемых температурах значения коэффициента Пуассона и статического модуля упругости существенно зависят от азимутальной и аксиальной кристаллографической ориентации монокристаллов сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8.

Для сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с повышением температуры испытания с 20 до 1000°C статический модуль упругости снижается. Наибольшим статическим модулем упругости обладают монокристаллы с КГО <111>, а наименьшим – монокристаллы с КГО <001>. Промежуточные значения статического модуля упругости характерны для монокристаллов с КГО <011>. Следует отметить, что значительная анизотропия значений статического модуля упругости сохраняется во всем исследованном температурном интервале.

Установлено, что при всех исследуемых температурах на образцах из сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <011> коэффициент Пуассона может изменяться от отрицательных до положительных значений для азимутальных направлений [011] и [100]. Анизотропия значений коэффициента Пуассона для направлений, лежащих в азимутальной плоскости, наблюдается только для КГО <011>. На образцах из сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 с КГО <001>, <111> коэффициент Пуассона не зависит от азимутальных направлений.

Получены средние значения коэффициента Пуассона и статического модуля упругости. Определены коэффициенты анизотропии $K_{\mu}^{<hkl>}$ и $K_E^{<hkl>}$, используемые для анализа ориентационной зависимости сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8.

Установлено, что анизотропия значений коэффициента Пуассона и статического модуля упругости для монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ7 и ВЖМ8 трех кристаллографических ориентаций $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ сохраняется во всем интервале температур 20–1000°C.

Полученные температурные и ориентационные зависимости предназначены для использования при расчетах на прочность монокристаллических турбинных лопаток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103.
2. Толораия В.Н., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Технология получения монокристаллических отливок турбинных лопаток ГТД заданной кристаллографической ориентации из ренийсодержащих жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2004. №1. С. 107–117.
3. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
4. Ножницкий Ю.А., Голубовский Е.Р. Обеспечение прочностной надежности монокристаллических рабочих лопаток высокотемпературных турбин перспективных ГТД // Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение: тр. междунар. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2006. С. 65–71.
5. Miner R.V., Voigt R.S., Gayda J., Gabb T.P. Orientation and temperature dependence of some mechanical properties of the single-crystal nickel-base superalloy René N4: Part I. Tensile behavior // Metallurgical Transactions A. 1986. Vol. 17. Issue. 3. P. 491–496.
6. Sass V., Glatzel U., Feller-Kniepmeier M. Creep anisotropy in monocrystalline nickel-base superalloy CMSX-4 // Superalloys-1996. Champion (Pennsylvania): Minerals, Metals & Materials Society. 1996. P. 283–290.
7. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л. Температурно-временная зависимость анизотропии длительной прочности монокристаллов ЖНС // Проблемы прочности. 2002. №2. С. 5–19.
8. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Голубовский Е.Р. и др. Механические свойства монокристаллов никелевого жаропрочного сплава, содержащего рений и рутений // Деформация и разрушение материалов. 2008. №11. С. 26–35.
9. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. и др. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2009. №8. С. 41–48.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
11. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г. 1) Литейные жаропрочные никелевые сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 15–19; 2) Литейные жаропрочные никелевые сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №6. С. 16–21.
12. Петрушин Н.В., Висик Е.М., Горбовец М.А., Назаркин Р.М. Структурно-фазовые характеристики и механические свойства монокристаллов жаропрочных никелевых ренийсодержащих сплавов с интерметаллидно-карбидным упрочнением // Металлы. 2016. №4. С. 57–70.
13. 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.
14. Соловьев А.Е., Голынец С.А., Хвацкий К.К., Асланян И.Р. Проведение статических испытаний при растяжении на машинах фирмы Zwick/Roell // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 12. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 28.08.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12.
15. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы, легированные рутением // Авиационные материалы и технологии. 2004. №1. С. 80–90.
16. Толораия В.Н., Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Орехов Н.Г., Голубовский Е.Р. Анизотропия прочностных характеристик в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематич. приложение: Функциональные материалы. 2005. С. 225–236.