

Методика проведения нового лабораторно-практического занятия "Исследование структуры и свойств никелевых жаропрочных сплавов" с применением интерактивной формы обучения

04, апрель 2017

Унчикова М. В. ^{1,*}, Базылева О. А. ², Буякина А. А. ^{2,**}

УДК: 669.018.44

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

²Россия, ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

^{*}Unchikova_mv@mail.ru

^{**}a.buiakina@gmail.com

Введение

В соответствии с федеральными государственными стандартами высшего профессионального образования для совершенствования подготовки студентов основные методические инновации в современном вузе должны быть связаны с использованием активных и интерактивных форм обучения, основанных на принципах взаимодействия, диалога, совместной работы по определенной проблеме [1]. Использование новых подходов является эффективным способом углубленного изучения наиболее важных и сложных разделов дисциплины [2]. Одним из них в курсе «Специальные главы материаловедения» является раздел «Жаропрочные никелевые сплавы».

Особая роль никелевых сплавов в обеспечении ресурса работы действующих и создании новых высокоэффективных газотурбинных двигателей (ГТД), стационарных энергетических установок, теплотехнического оборудования определяет целесообразность и необходимость приобретения магистрантами факультета «Энергомашиностроение» знаний по указанным материалам. Понимание комплексных механизмов упрочнения современных никелевых сплавов, принципов легирования для обеспечения высокой термостабильности структурно-фазового состояния материалов требует актуализации знаний студентов о взаимосвязи структуры и свойств, а также закономерностях изменения структуры в результате технологических операций.

В настоящее время высокие характеристики жаропрочности никелевых сплавов, основным разработчиком которых в нашей стране является Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ), достигаются на основе использования интенсивного и экстенсивного принципов разработки. Создаются сплавы новых систем

легирования (микролегирования), реализуются новые конструкторско-технологические решения, обеспечивающие повышение температурно-силовых параметров деталей энергомашиностроения. Согласно данным ВИАМ [3] 70 % увеличения температуры газа в ГТД достигается за счет совершенствования воздушного охлаждения турбинных лопаток и применения теплозащитных керамических покрытий, 30 % - за счет создания новых сплавов и разработки прогрессивных методов выплавки, технологии направленной кристаллизации, обработки давлением. Высокие эксплуатационные свойства никелевых сплавов, которые можно рассматривать как основные функциональные материалы современного двигателестроения, определяются не только системой легирования, а триадой «состав – конструкция – технология» [4]. В связи с этим для детального анализа принципов разработки никелевых сплавов, удовлетворяющих требованиям современной техники [5, 6], необходимо монологическое изложение учебного материала на лекциях дополнить лабораторно-практическим занятием, которое включает обсуждение, исследование особенностей структуры жаропрочных сплавов, изучение современных высокотехнологичных наукоемких процессов, используемых при получении изделий. Лабораторно-практическое занятие частично совмещает семинарское и лабораторное занятия [7], сочетает изучение вопросов теории с приобретением практических навыков и анализом полученных результатов, что способствует более глубокому усвоению материала студентами.

Подготовка методических указаний по данной теме особенно актуальна ввиду отсутствия краткого системного изложения материала в учебной литературе по данному вопросу; основными источниками информации являются монографии, материалы периодической печати и ресурсы глобальной информационной сети Интернет.

Лабораторно-практическое занятие

Лабораторно-практическое 4-часовое занятие разбито на 4 части: изучение особенностей строения жаропрочных материалов (часть 1); состава, структуры, типичной термической обработки, свойств и области применения деформируемых (часть 2) и литейных никелевых суперсплавов (часть 3), интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al (часть 4). Для повышения активности студентов при выполнении некоторых пунктов задания используются ролевые игры, т.е. преподаватель «назначает» студентов на должности инженеров-металловедов, инженеров-технологов, инженеров-термистов и т.д. При выполнении учебно-исследовательской работы студенты получают результаты, анализируют их и делают заключение в рамках предложенной должности.

В первой части занятия студенты, как инженеры-материаловеды, анализируют условия работы высокотемпературных деталей, механизм пластической деформации в зависимости от температуры, формулируют требования к составу и структуре для обеспечения стабильного состояния жаропрочных материалов.

Для закрепления знаний о взаимосвязи механизмов пластической деформации и способов упрочнения сплавов студенты «конструируют» жаропрочный материал, заполняя таблицу: механизмы высокотемпературной пластической деформации – способы повыше-

ния жаропрочности – требования к химическому и фазовому составу жаропрочных материалов [8].

Во второй части студенты изучают способы реализации базовых принципов разработки жаропрочных материалов на примере никелевых сплавов. Они анализируют химический и фазовый состав деформируемых никелевых сплавов, исследуют влияние термической обработки на структуру и свойства дискового сплава ЭК151.

Никелевые сплавы относятся к сложным многокомпонентным системам. Основные фазы в никелевых сплавах: γ -фаза — матрица сплава на никелевой основе с ГЦК-решеткой, γ' -фаза — основная упрочняющая интерметаллидная фаза на основе Ni_3Al с ГЦК-решеткой, когерентно связанная с матрицей, имеющая, как и все фазы с упорядоченной структурой, положительную температурную зависимость напряжения течения и высокую энергию активации диффузии; карбидные фазы MeC , Me_{23}C_6 , Me_6C , обеспечивающие гетерофазное и зернограничное упрочнение; боридные фазы типа M_3B_2 или M_5B_3 , упрочняющие границы зерен. Легирование цирконием, редкоземельными и щелочноземельными металлами (магнием) применяют для рафинирования сплавов и упрочнения границ.

Для лучшего усвоения материала студенты сравнивают деформируемые сплавы ХН70ВМФТЮ (ЭП826), ХН55ВМТФКЮ (ЭИ929), ХН62МВКЮ (ЭИ867), ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХН70ВМТЮ (ЭИ617), ХН73МБТЮ (ЭИ698) по системам легирования, содержанию γ - и γ' -образующих элементов, фазовому составу, количеству γ' -фазы, жаропрочности.

Количество γ' -фазы $V\gamma'$ в сплавах в зависимости от содержания γ' -образующих элементов рассчитывают по формуле:

$$V\gamma' = 4,6222 [(Ti + Al + Nb + Ta + Hf) - 2], \quad (1)$$

где $V\gamma'$ измеряется в % об., Ti, Al, Nb, Ta, Hf - содержание элементов в сплаве, ат. %.

Результаты сравнения представляют в виде диаграмм, выполняя ранжирование сплавов по пределу длительной прочности σ_{1000}^{800} , делают вывод о влиянии химического и фазового состава на жаропрочность сплавов.

Особенности термической упрочняющей обработки с учетом ее влияния на многообразие служебных характеристик современных деформируемых дисковых сплавов студенты изучают на примере сплава ЭК151. На основе этого сплава был разработан сплав ВЖ175, который по эксплуатационным показателям в настоящее время превосходит зарубежные аналоги [5].

Перед студентами, исполняющими в данном случае обязанности инженеров-термистов, ставится задача по определению оптимальных режимов термической обработки в зависимости от температуры эксплуатации сплава.

Студенты по фотографиям и схемам распределения напряжений и температур по сечению детали анализируют конструктивные особенности (рис.1) и условия эксплуатации дисков турбины, и соответственно, требования к материалам. Достижение необходимого комплекса свойств дисковых сплавов ГТД по пределам прочности, текучести, ползучести,

сопротивлению малоциклового усталости является трудно реализуемой на практике задачей, т.к. требует использования различных по природе механизмов упрочнения - для повышения жаропрочности сплавы должны иметь крупнозернистую структуру, в то время как сопротивление усталости увеличивается при измельчении зерна. Согласно стандарту ASTM для температур эксплуатации до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ наиболее приемлема микроструктура с размером зерна от 10 до 30 мкм, для более высоких температур - 45...120 мкм. Формирование необходимого размера зерна может быть достигнуто за счет оптимизации режимов термической обработки, которая для дисперсионно-твердеющих сплавов включает закалку и старение и позволяет в широком диапазоне изменять балл зерна и размер γ' -фазы в зависимости от соотношения температур закалки и полного растворения γ' -фазы $T_{пр.\gamma'}$, т.к. рост зерна определяется присутствием γ' -фазы, тормозящей движение границ [9].

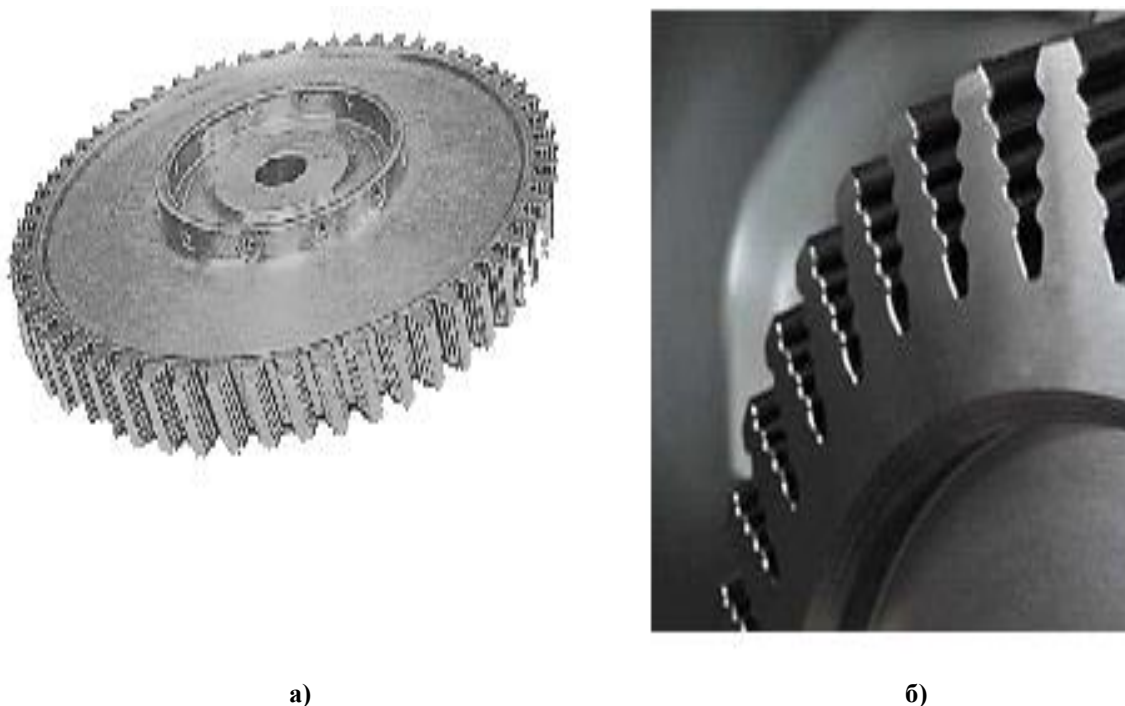


Рис.1. Диск турбины: а) общий вид; б) обод диска

Студенты исследуют микроструктуру сплава ЭК151 после различных режимов закалки (рис. 2) на компактном инвертируемом микроскопе GX-41, определяют балл зерна методом сравнения с эталонами шкал согласно ГОСТ 5639-82, рисуют схему упрочняющей термической обработки, указывают назначение и получаемые структуры после каждой операции, строят картограмму свойств в зависимости от температуры закалки сплава. Такой комплексный подход к исследованию структуры и свойств термически обработанного сплава позволяет сделать вывод о рекомендуемом режиме закалки в зависимости от рабочей температуры.

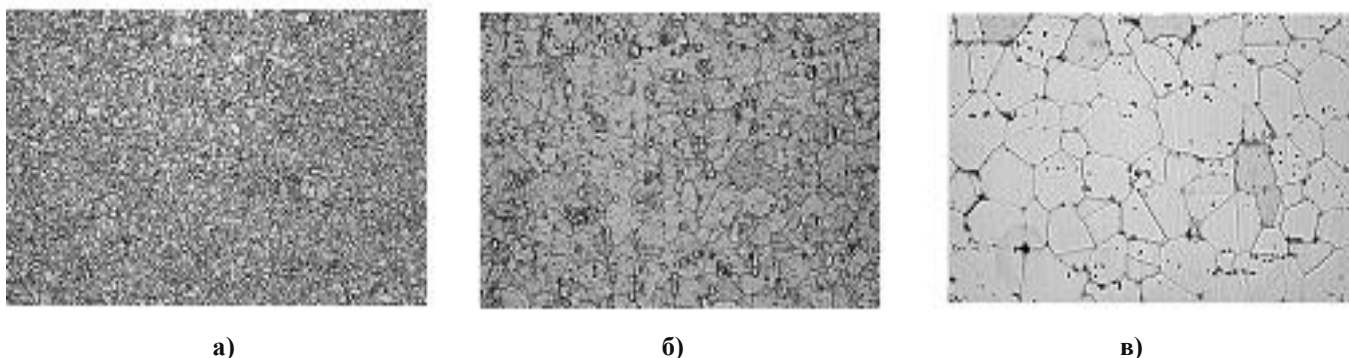


Рис. 2. Микроструктура сплава ЭК151 после закалки и двойного старения:

а) $T_{\text{зак}} < T_{\text{пр.}\gamma}$; **б)** $T_{\text{зак}} \approx T_{\text{пр.}\gamma}$; **в)** $T_{\text{зак}} > T_{\text{пр.}\gamma}$

Третья часть занятия посвящена исследованию литейных никелевых сплавов, предназначенных в первую очередь для изготовления рабочих лопаток ГТД, которые относятся к наиболее нагруженным деталям, работающим в условиях одновременного воздействия высоких температур, циклических напряжений, коррозионно-окислительной среды. Изготовление лопаток ГТД методом точного литья по выплавляемым моделям имело решающее значение, поскольку позволило не только решить проблему повышения жаропрочности и коэффициента использования дорогостоящих материалов, но и разработать лопатки с высокоэффективной системой охлаждения, тем самым существенно повысить температуру газа перед турбиной, и как следствие тягу двигателя.

В этой части занятия перед студентами ставится технологическая задача по выбору способа получения отливки для формирования оптимальной структуры в целях достижения максимальной жаропрочности неохлаждаемых рабочих лопаток и максимальной термостойкости охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей.

Для решения этой задачи студенты проводят сравнительный анализ литейных сплавов с равноосной, направленной и монокристаллической структурами (рис. 3, 4), изучают особенности химического состава сплавов, схемы технологических процессов и условия кристаллизации при получении лопаток ГТД с поликристаллической и ориентированными структурами, выясняют причину положительного влияния направленной кристаллизации (НК) на жаропрочность.

Развитием технологии НК является разработка технологии монокристаллического литья [10]. Студенты изучают условия получения монокристаллической структуры с применением затравки и конкурентного роста, исследуют макро- и микроструктуру литейного сплава ВЖМ 4, рассчитывают по формуле (2) уровень термических напряжений $\sigma_{\text{терм}}$ в зависимости от кристаллографической ориентации (КГО).

$$\sigma_{\text{терм}} = E\alpha\Delta t / (1-\mu), \quad (2)$$

где E – модуль упругости сплава, μ – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного расширения; Δt – температурный интервал.

Анализ анизотропии свойств и термических напряжений позволяет сделать вывод о преимуществах формирования в охлаждаемых лопатках ГТД монокристаллической струк-

туры с КГО $\langle 001 \rangle$, т.к. низкие значения модуля упругости в этом направлении способствуют возникновению меньших термических напряжений. Неохлаждаемые рабочие лопатки, для которых требование термостойкости не является определяющим, должны иметь монокристаллическую структуру с КГО, отвечающей максимальным значениям модуля упругости $\langle 111 \rangle$ и, следовательно, жаропрочности [11].



Рис.3. Лопатки с равноосной (а), направленной (б) и монокристаллической структурой (в)

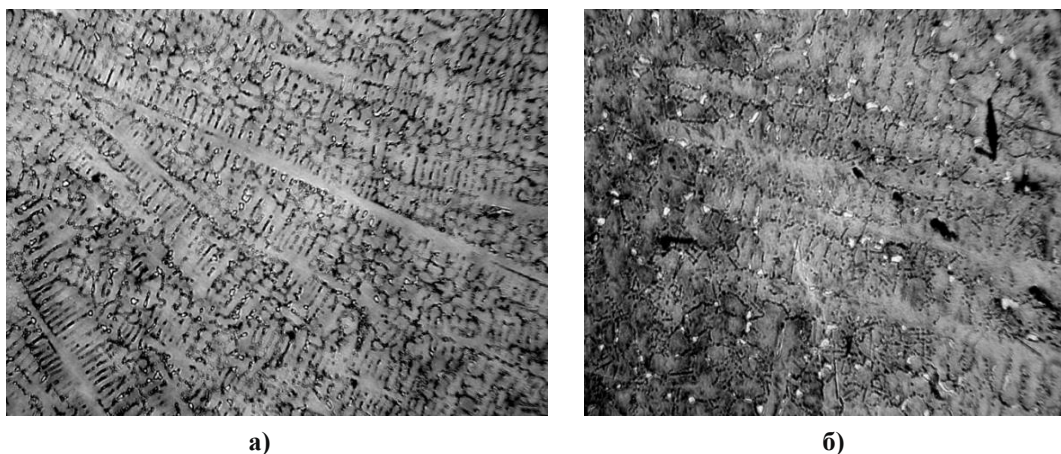


Рис. 4. Микроструктура сплава ЖС6У после равноосной (а) и направленной (б) кристаллизации, х50

Заключительная четвертая часть занятия посвящена интерметаллидным сплавам ВКНА на основе соединения Ni_3Al , которые относятся к перспективным жаропрочным материалам нового поколения с рабочей температурой до 1250°C и применяются для лопаток газовых турбин, элементов камер сгорания, створок регулируемого сопла и других высокотемпературных тонкостенных литых деталей [12].

Студенты проводят сравнительный анализ интерметаллидных и литейных суперсплавов по фазовому составу с помощью диаграммы состояния Ni-Al (рис. 5), рабочим темпе-

ратурам, плотности, удельной длительной прочности, объясняют причины повышенной термостабильности сплавов ВКНА. Задание также предполагает проведение исследований макро- (рис. 6) и микроструктуры (рис. 7) сплава ВКНА-1В в зависимости от КГО, изучение особенностей термической обработки [13, 14].

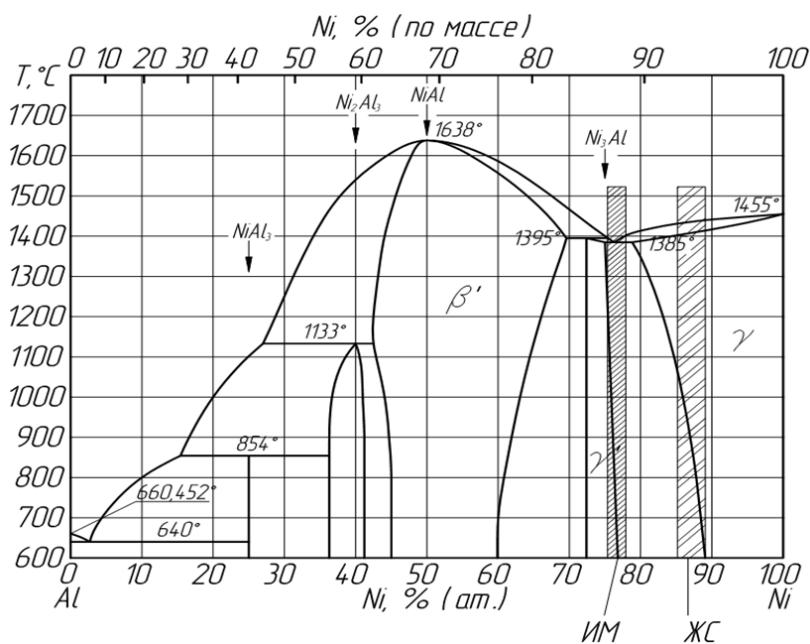
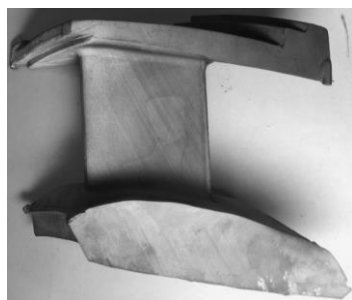


Рис. 5 Диаграмма состояния Ni-Al

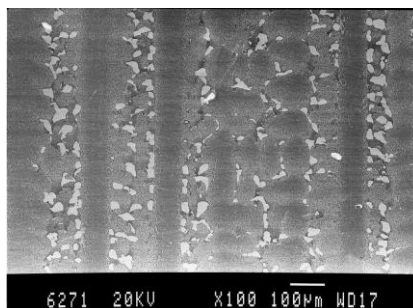


а)

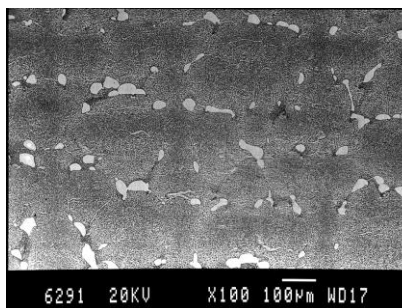


б)

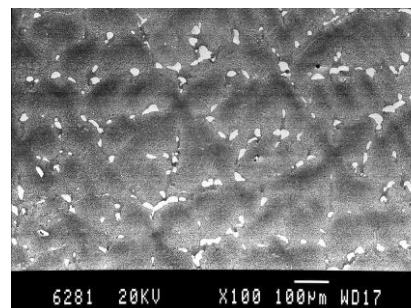
Рис. 6. Макроструктура сопловой лопатки из монокристаллического сплава ВКНА в зависимости от КГО: а) $\langle 111 \rangle$, б) $\langle 001 \rangle$



а)



б)



в)

Рис. 7. Микроструктура монокристаллического сплава ВКНА-1В в зависимости от КГО: а) $\langle 001 \rangle$, б) $\langle 011 \rangle$, в) $\langle 111 \rangle$

Заключение

Лабораторно-практическое занятие формирует целостное представление о строении и свойствах современных жаропрочных никелевых сплавов, способах разработки и перспективах развития сплавов за счет изменения системы легирования и совершенствования технологических процессов; закрепляет знания о влиянии структурно-фазового состояния на свойства сплавов, способствует приобретению навыков в комплексном исследовании строения материалов с помощью диаграмм состояния, макро- и микроанализа, развивает ключевые профессиональные компетенции, связанные с системным подходом выбора материалов в зависимости от условий эксплуатации изделий.

Список литературы

- [1]. Гушин Ю.В. Интерактивные методы обучения в высшей школе // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2012. №2. С.1-18.
- [2]. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. 2015. 719 с. С.355–383.
- [3]. Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Физико-химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов // Металлы. 2001. №2. С.63-73.
- [4]. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия. Издание 2-ое. М.: Наука. 2006. 632 с.
- [5]. Петрушин Н.В., Каблов Е.Н. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / В сб. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. К 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина. / ред. Каблов Е.Н. М.: Наука. 2006. 272 с. С.56–78.
- [6]. Петрушин Н.В., Каблов Е.Н., Светлов И.Л. Компьютерное конструирование жаропрочного никелевого сплава IV поколения для монокристаллических лопаток газовых турбин / В сб. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. К 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина. М. 2006. С.98–115.
- [7]. Волченсков В.И., Авдеева Т.А., Трунин Ю.В. Методика проведения практических занятий при изучении электрических машин // Инженерный вестник: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №10. С. 1024-1030. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/816440.html> (дата обращения 12.02.2017)
- [8]. Чабина Е.Б. Влияние микролегирования лантаноидами на особенности формирования структуры границ зерен и межфазных границ γ/γ' жаропрочного никелевого сплава типа ВЖ175 // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2017. №2. Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1070 (дата обращения: 02.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-9-9.
- [9]. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава

- ЭК151-ИД // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2013. №9. Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=244 (дата обращения: 02.03.2017).
- [10]. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Толораия В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1997. 336 с.
- [11]. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 463 с.
- [12]. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В., Конева Н.А., Поварова К.Б., Грабовецкая Г.П., Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением // М.: Издательский Дом МИСиС. 2008. 328 с.
- [13]. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Колодочкина В.Г., Хвацкий К.К. Влияние кристаллографической ориентации на структуру и физико-механические свойства интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С.3–7.
- [14]. Базылева О.А., Унчикова М.В., Туренко Е.Ю., Багетов В.В., Шестаков А.В. Исследование влияния термической обработки на микроструктуру, параметры дендритной ликвации и время до разрушения интерметаллидного ренийсодержащего сплава на основе Ni₃Al // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ». 2016. №10. Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1017 (дата обращения: 17.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-4-4.