

УДК 669.018.44:669.245

*В.С. Ломберг¹, А.А. Шестакова¹, М.Н. Летников¹, М.М. Бакрадзе¹***ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЙ
НА ХАРАКТЕР НАНОЧАСТИЦ γ' -ФАЗЫ В СПЛАВЕ ВЖ175-ИД**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-3-10

Представлено исследование стабильности наноразмерных частиц γ' -фазы в деформируемом жаропрочном никелевом сплаве ВЖ175-ИД после испытаний на растяжение при комнатной температуре, на длительную прочность при максимальных рабочих температурах и нагрузках, а также после испытания по режимам, характерным для реальных деталей турбины высокого давления. Показан вклад зернограничных частиц γ' -фазы размером менее 100 нм в механизм упрочнения дискового деформируемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ175-ИД при высоких температурах.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, структура, γ' -фаза, нанофаза, стабильность, разрушение.

*B.S. Lomberg¹, A.A. Shestakova¹, M.N. Letnikov¹, M.M. Bakradze¹***THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND STRESSES ON NATURE
OF NANOSIZE γ' -PHASE IN Ni-BASE SUPERALLOY VZh175-ID**

The investigation of the stability of nano-sized γ' -phase particles in cast-and-wrought Ni-base Superalloy VZh175-ID are presented. It was carried out after tension testing at room temperature, after rupture strength testing at the maximum working temperature and stresses and also after rupture strength testing at regimes, which are distinctive for the real parts of high pressure turbine. The contribution of grain-boundary particles γ' -phase with size below 100 nm in the strengthening mechanism was shown for cast-and-wrought Ni-base Superalloy VZh175-ID at high temperatures.

Keywords: Ni-base superalloy, microstructure, γ' -phase, nanophase, stability, fracture.

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

В настоящее время для высоконагруженных деталей горячего тракта современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) применяют жаропрочные сплавы на никелевой основе (ЖНС). Из материалов, полученных по литейной технологии, изготавливают рабочие и сопловые лопатки с равноосной или монокристаллической структурой. Свариваемые ЖНС применяют для изготовления элементов камеры сгорания и сложнопрофильных деталей статора. Из никелевых сплавов, полученных методами пластической деформации и гранульной металлургии, производят диски последних ступеней компрессора высокого давления (КВД) и турбины высокого давления (ТВД) [1–3]. Диски относятся к группе основных деталей ГТД, так как в случае возможного разрушения невозможно гарантировать локализацию обломков детали в пределах корпуса двигателя, что может привести к полному отказу двигателя и созданию аварийной ситуации. Циклический ресурс наиболее нагруженных дисков ограничивает ресурс всей силовой установки [4–7].

Разработка новых материалов для авиационных ГТД – трудоемкий и многогранный процесс, многие из этапов которого требуют углубленных исследований. Необходимо

подбирать химический состав сплава, разрабатывать технологию получения и обработки заготовок деталей, проводить полный комплекс механических испытаний при различных температурах, а также получать данные по изменению макро- и микроструктуры в процессе эксплуатации и влиянию этих изменений на механические свойства материала. Конечные результаты подвергают поэтапной проверке и анализу в процессе перехода от экспериментальных заготовок-прототипов к промышленным партиям деталей [8]. При разработке дисковых ЖНС, как правило, определяют предельные свойства материала: кратковременную прочность, пластичность и ударную вязкость в диапазоне рабочих температур, пределы длительной прочности и малоциклового усталости при заданных по времени базах и условиях нагружения. Возможные изменения микроструктуры исследуют после выдержек и/или испытаний при данных предельных режимах [9].

В реальных конструкциях авиационных двигателей диски КВД и ТВД имеют определенные запасы по несущей способности и детали из жаропрочных сплавов испытывают меньшие нагрузки и температурное воздействие в течение гораздо более длительного времени, составляющего десятки тысяч часов. Несмотря на то что для дисковых ЖНС, применяемых для заготовок дисков современных ГТД, активное растворение упрочняющей γ' -фазы начинается при температурах $>800^\circ\text{C}$, определенные изменения микроструктуры возможны и при более низких температурах в условиях совместного воздействия температур и действующих механических нагрузок [10].

В связи с этим в данной работе поставлена задача поэтапно выявить закономерности изменения структурно-фазового состава деформируемого ЖНС марки ВЖ175-ИД, применяемого для дисков КВД и ТВД в составе ГТД пятого поколения, не только при температурном воздействии (длительная выдержка без нагрузки), но и при приложении нагрузки при комнатной температуре (растяжение), а также при испытаниях на длительную прочность, в том числе по режимам, характерным для реальных деталей ТВД.

В статье [11] описаны эффекты от усложнения легирования материала, особенности формирования структурных составляющих, их вклад в упрочнение, а также механические и технологические свойства деформируемого дискового сплава ВЖ175-ИД. Основной задачей проведенного исследования было определение стабильности частиц γ' -фазы размером <100 нм (нанофазы) после каждого этапа термической обработки, а также после изотермических выдержек в интервале температур эксплуатации материала. Однако известно, что помимо температурного воздействия, важным фактором, влияющим на работоспособность материала, является нагрузка, так как в реальных условиях эксплуатации диски ГТД подвергаются сложному температурно-напряженному воздействию по сечению изделия. При этом по границам зерен активизируются процессы растворения γ' -фазы, которые приводят к ускорению разупрочнения этих границ [12].

Цель данной работы – продолжение исследований морфологии и изменений наноразмерной γ' -фазы. В задачи работы входило также изучение закономерностей изменения размера и морфологии частиц нанофазы при одновременном воздействии на материал температуры и постоянно приложенного напряжения, в том числе соответствующих реальным условиям эксплуатации дисков.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Аналогично предыдущей статье [11] в качестве материала для исследований выбран высокожаропрочный деформируемый сплав ВЖ175-ИД на основе никеля системы легирования Ni–Co–Cr–W–Mo–V–Al–Ti–Nb–C. Образцы из сплава получены после

вакуумно-индукционной выплавки с переплавом в вакуумной дуговой печи, изотермической штамповки на воздухе в несколько переходов и стандартной термической обработки (заковки и двойного старения) для данного материала [14]. Для проведения механических испытаний из кольцевых припусков штамповок изготовлены гладкие цилиндрические образцы с рабочей частью диаметром 5 мм и рабочей длиной $l=5d$. Испытания на растяжение и длительную прочность проводили по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 10145–81 соответственно.

Для исследования микроструктуры изготовлены шлифы из зоны вблизи изломов рабочей части образцов вдоль оси приложения нагрузки. Изготовление образцов проводили на оборудовании фирмы Struers шлифованием с последующей полировкой суспензиями различной зернистости (от большей к меньшей). Исследование образцов проводили после электролитического травления раствором бихромата калия в фосфорной кислоте в течение 3–5 с при напряжении 1 В. Исследование микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе фирмы Hitachi модели SU 8010 при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Результаты

Для определения влияния температур и напряжений на изменение наноразмерной γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД анализ микроструктуры проводили на образцах в три этапа:

- 1 – после растяжения при комнатной температуре;
- 2 – после испытаний на длительную прочность при максимальных (паспортных) значениях температуры и напряжения;
- 3 – после имитации температурно-напряженного состояния в диске ТВД пассажирского самолета при взлетном, крейсерском и комбинированном (взлетный+крейсерский) режимах.

Исследования после механических испытаний при комнатной температуре

Для оценки влияния напряжений на изменение γ' -фазы изготовлены продольные шлифы из рабочих частей образцов после растяжения при комнатной температуре. Съемку микроструктуры проводили максимально близко к «месту разрушения образца».

Структура границ зерен после растяжения (рис. 1, а, б) аналогична результатам, полученным после полной термической обработки (рис. 1, в). Микроструктура представлена крупными (~7 мкм) частицами первичной γ' -фазы по границам зерен (рис. 1, а), вторичной γ' -фазой кубоидной морфологии по всему объему зерен (размер ~250 нм) и третичной фазой по границам раздела зерен и фаз (~50 нм) (рис. 1, б).

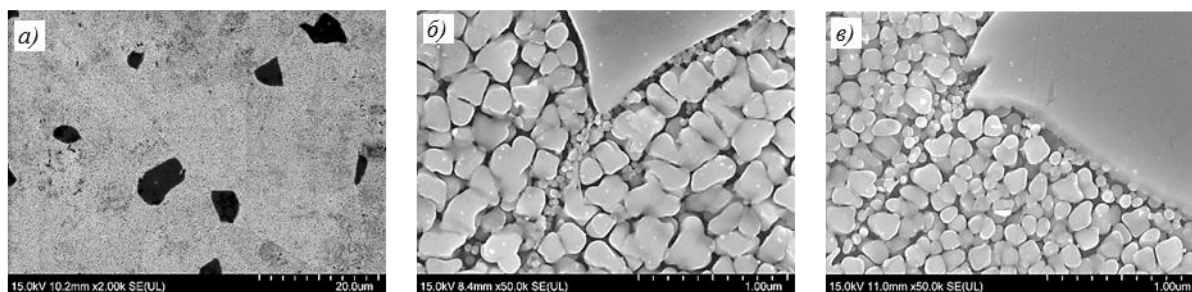


Рис. 1. Микроструктура (а – $\times 2000$; б, в – $\times 50000$) образцов после испытаний на растяжение при 20°C [11]:

а – общий вид; б, в – структура межфазных границ и после полной термической обработки

При исследовании методом растровой электронной микроскопии при увеличениях до $\times 50000$ в материале не обнаруживаются какие-либо изменения наноразмерных частиц γ' -фазы после испытаний на растяжение при комнатной температуре, что соответствует научно-техническим литературным данным по аналогичным сплавам [15–17].

Исследования структуры после механических испытаний при максимальных температурно-напряженных режимах

Работоспособность материала при конкретной температуре определяется напряжением, которому может сопротивляться сплав заданное время, а также стабильностью его структурно-фазовых составляющих. Для оценки стабильности субмикронных частиц γ' -фазы проведены испытания образцов на длительную прочность по двум режимам (температуры и напряжения соответствуют паспортным характеристикам сплава ВЖ175-ИД для временной базы 100 ч):

- режим 1 – температура 650°C, приложенная постоянная нагрузка 1050 МПа (время до разрушения 247 ч);
- режим 2 – температура 750°C, приложенная постоянная нагрузка 637 МПа (время до разрушения 244 ч).

После проведения механических испытаний изготовлены продольные микрошлифы из рабочей части образцов. На рис. 2 представлены микроструктуры образца, испытанного по режиму 1. Вблизи зоны разрушения (рис. 2, а, б) наблюдается незначительное искажение морфологии вторичной γ' -фазы, вызванное, вероятно, действием напряжений в процессе испытаний. Вдоль границ зерен и границ раздела фаз присутствуют частицы наноразмерной γ' -фазы. Общий вид структуры в зоне разрушения (рис. 2, б) и на расстоянии 10 мм от него (рис. 2, в) – одинаковый. Следует отметить также, что общий вид микроструктуры и морфология вторичной и нанодисперсной γ' -фазы в образцах после испытаний на длительную прочность и в образце после изотермической выдержки при температуре 650°C идентичны (рис. 2, г).

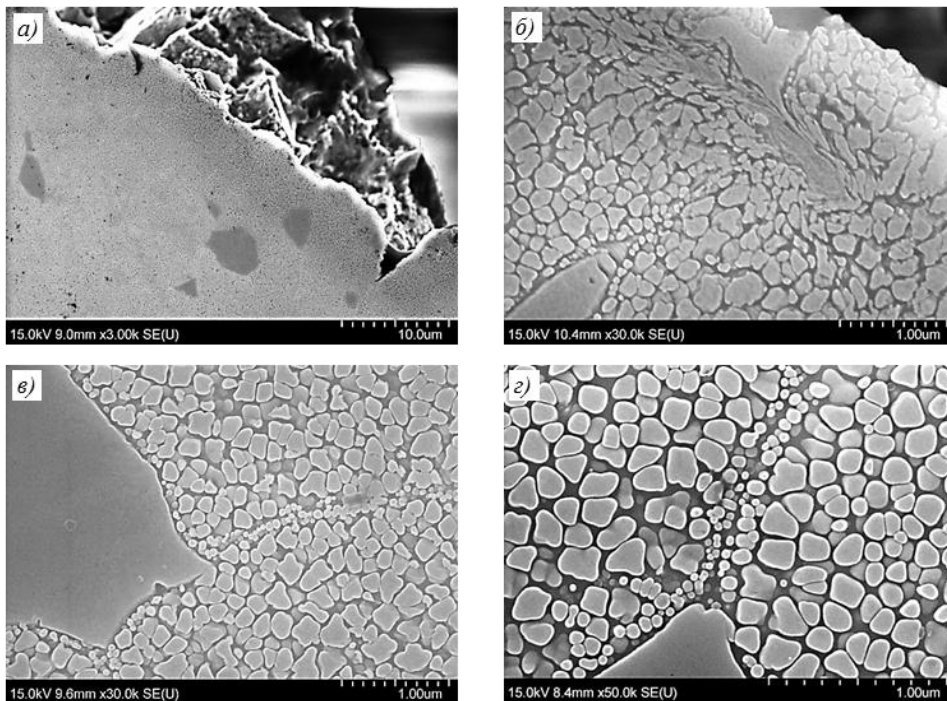


Рис. 2. Микроструктура (а – $\times 3000$; б, в – $\times 30000$; г – $\times 50000$) образцов после испытаний на жаропрочность по режиму 1 [11]:

а, б – зона разрушения; в – 10 мм от зоны разрушения; г – после выдержки при 650°C без приложения нагрузки

При исследовании структуры образцов после механических испытаний по режиму 2 видны характерные «пустоты» по границам зерен (рис. 3, *а*). При большем увеличении видно, что вдоль границ зерен и межфазных границ отсутствует наноразмерная γ' -фаза, а разрушение происходит преимущественно по границам зерен (рис. 3, *б*). Вторичная γ' -фаза практически не имеет искажений в зоне разрыва, ее геометрическая форма и размер (~250 нм) не отличается от структуры, полученной после выдержки при температуре 750°C без приложения нагрузки (рис. 3, *з*).

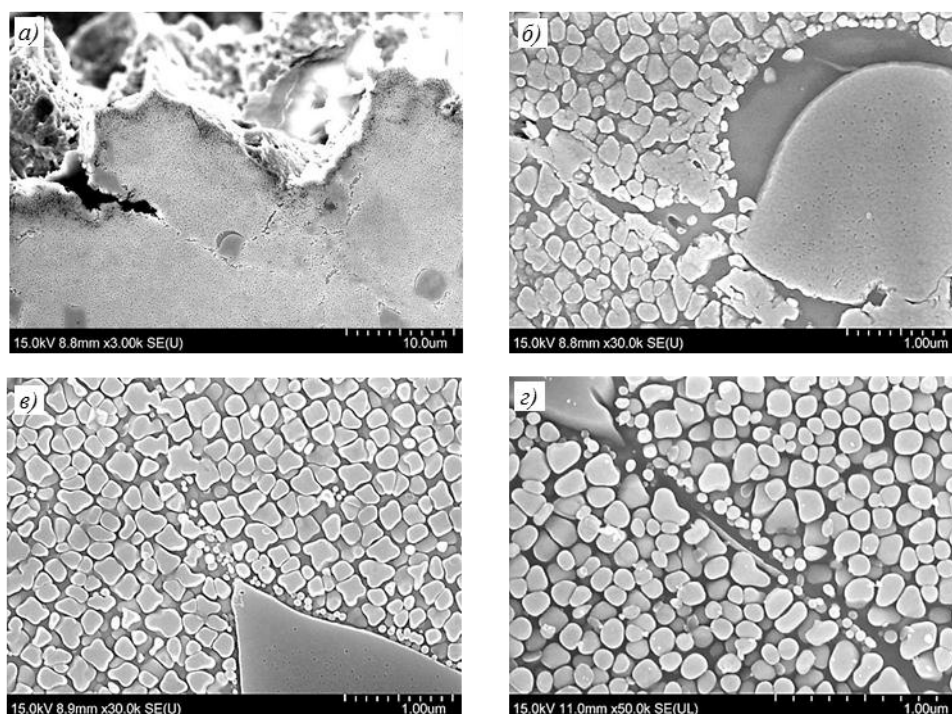


Рис. 3. Микроструктура (*а* – $\times 3000$; *б*, *в* – $\times 30000$; *з* – $\times 50000$) образцов после испытаний на жаропрочность по режиму 2 [11]:

а, *б* – зона разрушения; *в* – 10 мм от зоны разрушения; *з* – после выдержки при 750°C без приложения нагрузки

Исследование образца на расстоянии 10 мм от места разрушения (рис. 3, *в*) показало отсутствие «пустых» границ зерен. В структуре материала присутствует γ' -фаза разной дисперсности, в том числе наноразмерная. Данная структура также не отличается от результатов, полученных после изотермической выдержки материала при 750°C без приложения нагрузки (рис. 3, *з*).

Исследования после механических испытаний при реальных эксплуатационных нагрузках и температурах

Материалы для элементов ГТД всегда выбирают с запасом по предельно допустимым рабочим температурам и напряжениям. В большинстве современных пассажирских самолетов диски ГТД из ЖНС подвергаются температурному воздействию, не превышающему 600°C, однако они должны выдерживать достаточно длительный временной ресурс при данных температурах [18].

Для имитации реального режима эксплуатации дисков последних ступеней КВД и дисков первой и второй ступени ТВД образцы из сплава ВЖ175-ИД подвергали испытаниям по режимам, соответствующим реальным эксплуатационным нагрузкам в двигателе типа ПД-14 (см. таблицу).

Режимы испытаний образцов из сплава ВЖ175-ИД для имитации нагрузок и температур в дисках ГТД

Режим испытания	Нагрузка, МПа	Температура, °С	Продолжительность испытания, ч
Взлетный	795	590	680
Крейсерский	883	510	1000
Взлетный и крейсерский	795/883	590/510	680+1000

За время испытаний ни один из образцов не был доведен до разрушения, а удлинение составило <1%, что соответствует запасам прочности и долговечности дисковых материалов. Для исследования микроструктуры использовали рабочую часть образцов (шлифы изготавливали вдоль оси приложения нагрузки при испытаниях).

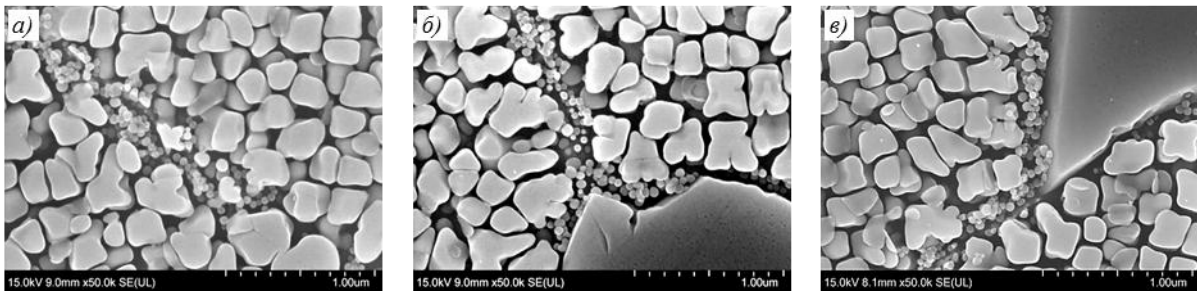


Рис. 4. Микроструктура ($\times 50000$) образцов после имитации наработки:
a – взлетный режим; *b* – крейсерский режим; *v* – взлетный+крейсерский режим

За время испытаний структура всех образцов (рис. 4) не изменилась, по границам зерен присутствует γ' -фаза размером до 100 нм, в теле зерна наблюдается вторичная γ' -фаза размером до 300 нм, что соответствует исходному состоянию сплава после полной термической обработки.

Обсуждение и заключения

По результатам проведенных исследований установлено, что приложение кратковременной разрывающей нагрузки при комнатной температуре не влияет на морфологию вторичной и наноразмерной γ' -фазы в сплаве ВЖ175-ИД. Разрушение происходит преимущественно по внутризеренному механизму, что соответствует данным по жаропрочным никелевым сплавам-аналогам [19, 20].

При воздействии максимальных температур и нагрузок при испытаниях на длительную прочность по паспортным режимам сплава ВЖ175-ИД при температуре 650°С в материале отсутствует деградация структуры, обнаруживаемая при увеличении до $\times 50000$. Общий вид субмикронной структуры аналогичен структуре материала после изотермической выдержки при такой же температуре, но без приложения нагрузки. Разрушение образца происходит преимущественно по тому же механизму, что и при комнатной температуре (внутризеренному).

При увеличении температуры до 750°С с соответствующей нагрузкой в зоне разрушения образца наблюдаются «пустоты» вдоль межфазных границ. Предположительно на их месте присутствовала наноразмерная γ' -фаза, которая растворилась под одновременным воздействием высоких температур и напряжений. Однако следует отметить, что расчетная база для жаропрочности при температуре 750°С с нагрузкой 637 МПа составляет 100 ч, а продолжительность испытания до разрушения образца составила 244 ч.

В работе [9] показано, что растворение наноразмерной γ' -фазы под воздействием температуры начинается при 800°C , а скорость данного процесса увеличивается с повышением температуры. После изотермической выдержки в течение 2 ч при температуре 850°C нанофаза в сплаве ВЖ175-ИД отсутствует, т. е. под действием нагрузки растворение наноразмерной γ' -фазы происходит уже при 750°C . Полученные результаты свидетельствуют, что наличие нанодисперсной γ' -фазы по границам зерен вносит определенный вклад в упрочнение сплава ВЖ175-ИД и сдерживает механизмы зернограницного разрушения.

Исследования структуры после имитации крейсерского и взлетного режимов работы двигателя показали, что структура сплава ВЖ175-ИД в этих условиях стабильна, несмотря на длительные выдержки: по границам зерен и границам раздела фаз присутствуют частицы наноразмерной γ' -фазы, упрочняющая фаза имеет преимущественно кубоидную структуру со средним размером частиц 250 нм.

Дальнейшие исследования в данной области будут связаны с анализом изменения микроструктуры сплава ВЖ175-ИД после эксплуатации в составе двигателя, а также при учете возможных забросов температур в компрессоре и турбине при работе двигателя на максимальных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новые материалы / под ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСИС, 2002. 736 с.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
3. Zhang G.Q. Research and Development of High Temperature Structural Materials for Aero-Engine Application // Acta Metallurgica sinica. 2005. Vol. 18. No. 4. P. 443–452.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
5. Иноземцев А.А., Сандарский В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
7. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 372 p.
8. Чабина Е.Б. Влияние эксплуатационных факторов на состояние поверхностей раздела в материале высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-2-2.
9. Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др. Материаловедение: учеб. для высших технических учебных заведений. 8-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
10. Назаркин Р.М., Колодочкина В.Г., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р. Необратимые изменения тонкой структуры монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов в процессе длительной эксплуатации турбинных лопаток // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №12. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-3-3.
11. Ломберг Б.С., Шестакова А.А., Бакрадзе М.М., Карачевцев Ф.Н. Исследование стабильности γ' -фазы размером менее 100 нм в жаропрочном никелевом сплаве ВЖ175-ИД // Авиационные материалы и технологии. 2018. №4 (53). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-3-10.

12. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок в 2 кн. М.: Металлургия, 1995. Кн. 2. 369 с.
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. Овсепян С.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Летников М.Н. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 122–130.
15. Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин (материалы и технологии). М.: Наука и технология, 2013. 264 с.
16. Boittin G., Locq D., Rafray A., Caron P., Kanouté P., Gallerneau F., Cailletaud G. Influence of γ' precipitate size and distribution on LCF behavior of a PM disk superalloy // Superalloys-2012. USA: TMS, 2012. P. 167–176.
17. Yiqiang C., Prasath R., Slater T.J.A. et al. An investigation of diffusion-mediated cyclic coarsening and reversal coarsening in an advanced Ni-based superalloy // Acta Materialia. 2016. Vol. 110. P. 295–305.
18. На пути к 3-й стратегии управления ресурсом [Электронный ресурс]. URL: http://www.pmz.ru/pr/other/aviadv/IB-16/IB-16_26/ (дата обращения: 04.10.2019).
19. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Филонова Е.В., Чабина Е.Б. Оценка структурно-фазовой стабильности жаропрочного сплава ВЖ175 после термической обработки и имитаций наработок при рабочей температуре // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №7 (55). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-5-5.
20. Powell A., Bain K., Wessman A. et al. Advanced supersolvus nickel powder disk alloy DoE: chemistry, properties, phase transformations and thermal stability // Superalloys-2016. USA: TMS, 2016. P. 189–197.