

УДК 669.018.44:669.245

А.М. Волков¹, А.В. Востриков¹**СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРАНУЛИРУЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ РАЗРУШЕНИЮ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-74-79

Для оценки работоспособности изделия при эксплуатации кроме параметров статической и длительной прочности разработчикам ГТД необходимо располагать данными по характеристикам сопротивления малоциклового усталости с учетом реальных факторов.

Приведены основные требования к материалу дисков ГТД с точки зрения обеспечения заданного ресурса при эксплуатации. Рассмотрены особенности контроля механических свойств гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов. Описана существующая схема исследования малоцикловых характеристик гранулируемых материалов. Представлены исследования по распределению неметаллических включений (по размеру) в различных гранулируемых сплавах, используемых для изготовления дисков турбин.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: заготовка диска, ГТД, гранулы, жаропрочный никелевый сплав, МЦУ, структура, неметаллические включения.

To assess the item workability in the operation, in addition to the static parameters and long-term strength gas turbine engine (GTE) developers need to have data on the characteristics of low-cycle fatigue resistance, taking into account the real factors. Basic material requirements of GTE disks in terms of a given resource in the operation are presented. Particularities of control of the mechanical properties of granular heat-resistant nickel alloys are considered. The existing research scenario of the low-cycle characteristics of granular materials is described. Research on the distribution of nonmetallic inclusions (depending on size) in different p/m alloys used for the manufacture of turbine disks is presented.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.2. «Isothermal deformation on air of new generation of heterophase difficult-to-form hot strength alloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: disk billet, jet-engine, powder, Ni-base superalloy, LCF, microstructure, non-metallic inclusion.

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 государственных программах России по развитию авиационной промышленности предусмотрены создание конкурентоспособной и востребованной на рынке продукции, модернизация парка воздушных судов, повышение их надежности и улучшение эксплуатационных характеристик. Экономические аспекты оказывают все более сильное влияние на конструкцию авиационной техники, а к традиционным требованиям прочности и надежности добавляются показатели, связанные с рентабельностью перевозок, стоимостью обслуживания и т. д. [1–3].

Практически для всех видов новой авиационной техники (пассажирского, военно-транспортного и военного назначения) необходимо существенное, зачастую кратное, увеличение ресурса по сравнению с базовыми моделями

предыдущих поколений. Подтверждение циклического ресурса основных деталей, т. е. обеспечение их наработки, в течение которой эксплуатация авиационных двигателей будет безопасной, является одной из главных задач при расчете дисков турбин.

Статическая прочность дисков, а именно отсутствие вытяжек, наличие запасов по частоте вращения и длительной прочности, не является критерием, полностью определяющим безопасность конструкции ГТД. Не менее важными являются циклические показатели долговечности. Типовой полетный цикл авиационного двигателя состоит из нескольких участков (руление, набор высоты, крейсерский режим, снижение и др.) с различным уровнем параметров нагружения. Повторение таких изменяющихся нагрузок и возможность прохождения упругопластических де-

формаций материала приводит к тому, что может произойти разрушение турбинных дисков, основной причиной которого является малоцикловая усталость (МЦУ) [4–6].

Материалы и методы, методика испытаний

Максимальное напряжение цикла, величина деформации и гарантируемое число циклов до разрушения при заданной температуре являются одними из важнейших характеристик сплавов для дисков турбин. Для определения этих параметров проводят испытания на МЦУ гладких цилиндрических образцов ($d=5$ мм) или цилиндрических образцов с надрезом ($r_n=0,25$ мм) с резьбовыми грузозахватными головками обычно при температурах, соответствующих рабочим [7].

В процессе испытаний чаще всего применяют треугольный цикл нагружения (нагрузка/разгрузка, без выдержки), что практически соответствует изменению величины напряжений в дисках при типовом полетном цикле. Для переноса полученных закономерностей на реальные детали двигателя, работающие в условиях сложных циклов, используют верифицированные математические модели. Например, специалистами АО «Авиадвигатель» и ПНИПУ (г. Пермь) проведены исследования по проверке модели суммирования напряжений при треугольном и М-образном циклах на образцах, изготовленных из гранул жаропрочного никелевого сплава ВВ751П. Подтверждена сходимости экспериментальных данных и результатов, полученных по модели линейного суммирования [8]. В компании Rolls-Royce проведен ряд исследований трещиностойкости гранулируемых сплавов типа Udimet 720 и RR1000 при высоких температурах и трапецеидальном цикле нагружения (нагрузка, продолжительная выдержка, разгрузка). По мнению английских исследователей, такой тип нагружения ближе к реальным условиям, наблюдаемым при эксплуатации изделий [9, 10]. Активно проводятся работы, направленные на исследование влияния сложных циклов нагружения на трещиностойкость никелевых сплавов и во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» [11].

Тем не менее сложные циклы усталостного нагружения при температурах до 650°C не имеют принципиальных отличий от простых циклов по воздействию на зарождение трещин в никелевых жаропрочных сплавах [12]. Вероятно, различия в поведении материала при простом и сложном циклах нагружения будут проявляться при более высоких температурах (выше 700°C). Так как подавляющее большинство современных отечественных гранулируемых сплавов для дисков эксплуатируются при температурах, не превышающих $650\text{--}700^{\circ}\text{C}$, и треугольный цикл нагружения проще реализовать технически, то его использование при испытаниях вполне оправдано.

Еще одной особенностью испытаний на МЦУ является фиксация в каждом цикле нагружения на

постоянном уровне значений относительной деформации («жесткий» цикл) или максимального напряжения («мягкий» цикл) в исследуемом образце. В связи с тем, что при различных видах нагружения материал разрушается по-разному, каждый вид испытаний применяется в определенных ситуациях. В реальной детали эти механизмы действуют совместно друг с другом, причем «мягкий» цикл нагружения характерен в большей степени для ступицы, а «жесткий» – для зон возле отверстий и, частично, для полотна диска. Другими словами, «мягкий» цикл нагружения связан с наличием упругопластических деформаций в массивных сечениях, а «жесткий» – концентраторов напряжений.

Испытания при «мягком» цикле нагружения применяют как для гладких образцов, так и для образцов с надрезом. В последнем случае по соотношению значений долговечности образцов (гладких и с надрезом), испытанных при одинаковых условиях, может быть оценена чувствительность материала к концентраторам напряжений. Как правило, подобные испытания для гранулируемых сплавов проводят на этапе общей квалификации материала (паспортизации).

В практике отечественного двигателестроения традиционно для гранулируемых сплавов оценка чувствительности к концентраторам напряжений определяется на каждой заготовке диска или вала при контрольных испытаниях цилиндрических образцов (гладких и с надрезом) на длительную прочность. Контрольные испытания на МЦУ материала каждой заготовки диска проводят на гладких образцах при «мягком» (отнулевом) цикле нагружения [13, 14].

Серия испытаний при «жестком» цикле нагружения гладких образцов позволяет построить кривую усталости в полулогарифмических координатах «размах деформации–логарифм числа циклов». Далее по критерию Мэнсона можно рассчитать долговечность детали при заданной максимально допустимой эквивалентной деформации. Таким образом, может быть спрогнозирован ресурс диска ГТД. Необходимость подобных испытаний на образцах, вырезанных из реальных деталей или их заготовок, отражена в «Нормах прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации» ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

На первый взгляд возникает противоречие: разработчики сплавов и производители заготовок дисков акцентируют свое внимание на максимальных напряжениях при «мягком» цикле нагружения, а конструкторам двигателей для оценки ресурсных возможностей материала требуются результаты испытаний на МЦУ при «жестком» цикле нагружения. Дело в том, что в первом случае долговечность может зависеть от размера и расположения в образце металлургического дефекта, который является источником зарождения

трещины. Напротив, образцы, которые испытывают при «жестком» цикле нагружения и повышенных температурах, достаточно часто разрушаются не по внутренним дефектам – практически в половине случаев трещина растет непосредственно от поверхности исследуемого образца.

В конце 1970-х гг., когда технология металлургии гранул находилась на начальном этапе развития, в испытанных образцах часто наблюдался межгранульный излом, который не только не позволял достигать требуемых значений механических свойств, но и снижал показатели надежности материала диска. Причинами возникновения излома были неоптимальное легирование и несовершенство действовавшей в то время технологии производства [15]. Специалистами ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», ОАО «ВИЛС» и ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ было принято решение проводить испытания на МЦУ при «мягком» цикле нагружения для каждой заготовки диска из гранулированного сплава. Это позволило контролировать качество различных параметров при производстве материала – начиная с выплавки, распыления, обработки гранул, засыпки их в капсулы и заканчивая последующими горячим изостатическим прессованием и термообработкой заготовок. Гарантированная долговечность (число циклов), полученная на образцах при «мягком» цикле нагружения, подтверждает качество материала всей полноразмерной заготовки диска.

При разработке химических составов следующих поколений гранулируемых сплавов (ЭП741НП, ЭП962П, ВВ750П, ВВ751П, ВВ752П, ВВ753П) с учетом особенностей технологии металлургии гранул, а также при совершенствовании маршрута производства и обработки гранул,

проблема межгранульного излома была устранена. Однако, как и прежде, каждую заготовку диска подвергали испытаниям на МЦУ при «мягком» цикле нагружения.

Помимо границ исходных гранул, испытания на МЦУ при «мягком» цикле нагружения позволяют обнаружить и другие металлургические дефекты – поры и неметаллические включения. Однако низкое объемное содержание пор, их малый размер и невысокая концентрация напряжений вокруг них приводит к тому, что разрушение по порам наблюдается достаточно редко, так как от других типов металлургических дефектов при прочих равных условиях трещина растет быстрее.

В связи с этим испытания на МЦУ при «мягком» цикле нагружения для современных гранулируемых сплавов для дисков используют главным образом с целью оценки чистоты материала по неметаллическим включениям. На стадии контрольных испытаний серийной продукции образцы не всегда доводят до разрушения, иногда они должны выдержать не менее заданного числа циклов (например, 3500; 5000; 7000; 10000; 20000 и более – в зависимости от используемого сплава и требований ТУ). Однако при разработке нового материала или на стадии опытного производства продукции испытания на МЦУ при «мягком» (отнулевом) цикле нагружения проводят до разрушения образцов, что становится мощным инструментом при анализе металлургической чистоты материала.

Типичный излом гладкого цилиндрического образца после испытаний при «мягком» цикле нагружения состоит из трех зон (рис. 1 – для случая, когда очаг разрушения *O* не выходит на поверхность образца).

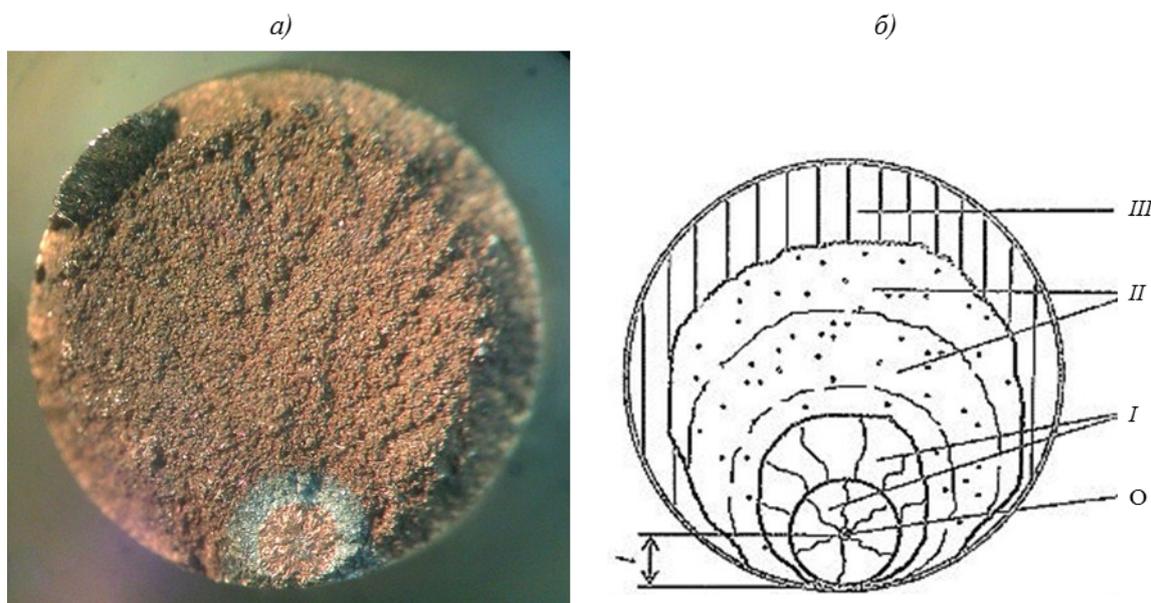


Рис. 1. Строение излома образца, испытанного на МЦУ при «мягком» цикле нагружения при температуре 650°C. Приповерхностное расположение очага разрушения:

a – внешний вид ($\times 10$); *b* – схема расположения зон [16]

Трещина зарождается на расстоянии l от поверхности материала. Путь распространения трещины – внутризеренный, участки усталостного разрушения (зона I) расходятся в радиальном направлении от очага разрушения при повреждающем воздействии окружающей среды. По мере развития трещины в сечении образца создаются критические условия для долома путем отрыва, происходящего по вязкому механизму (зона II), а затем – среза (зона III) [17]. В очаге разрушения находится дефект (как правило, неметаллическое включение). В зарубежной научно-технической литературе подобный вид очага разрушения, который состоит из зон с различной степенью окисления, получил название «рыбий глаз» (*fish-eye crack*) [18].

Исследование включений в гранулируемых сплавах для дисков является необходимым условием при применении данного класса материалов. В результате этого появляется возможность, с одной стороны, целенаправленно совершенствовать технологию производства гранулируемых сплавов, а с другой – получать адекватные входные данные для последующих прочностных расчетов, поскольку исходный размер трещин в гранулируемых сплавах может определяться максимальным размером металлургических дефектов.

Главная причина столь серьезного внимания к включениям в материале дисков заключается в том, что их присутствие приводит к образованию химических и микроструктурных неоднородностей. Неметаллические включения являются более хрупкими по сравнению с основным материалом. Их форма (наличие острых краев) также может приводить к концентрации напряжений при циклическом нагружении.

Результаты и обсуждение

Размер включений в гранулируемых сплавах сопоставим с размером используемых гранул, так как именно размер ситовой ячейки при рассеивании определяет максимальный размер объектов, попадающих в заполняемые гранулами стальные капсулы. Поскольку размер включений меньше, чем предел разрешающей способности ультразвукового и капиллярного методов контроля заготовок дисков, то для исследования этого вида металлургических дефектов необходимы методы фрактографии, металлографии и другие.

В работах специалистов ОАО «ВИЛС» по результатам фрактографического исследования образцов на МЦУ, испытанных до разрушения при 650°C , установлено, что распределение неметаллических включений по размерам может быть описано гауссовским (нормальным) законом распределения (рис. 2). Средний размер включений соответствует фракции гранул, максимальный – до 1,6 размера гранул [19, 20].

Представленные результаты сопоставимы с результатами зарубежных исследований. В техни-

ческом отчете NASA, посвященном исследованию природы, размеров и распределения включений (10–150 мкм) в массе гранул жаропрочного никелевого сплава Udimet 720, определяли размер керамических (SiO_2) и шлаковых (Al_2O_3) частиц [21]. Полученное распределение также близко к гауссовскому (рис. 3).

В исследованиях ученого А. Pineau из университета Ecole des Mines (г. Париж, Франция) установлено, что распределение по размеру включений на основе Al_2O_3 и SiO_2 , унаследованных гранулируемым сплавом Rene 95 в процессе производства, имеет вид, представленный на рис. 4 [22]. В целом все представленные на рис. 2–4 данные сопоставимы друг с другом и подтверждают тот факт, что размер включений в материале определяется размером используемых гранул.

Уменьшение размера используемых гранул сплавов для дисков может рассматриваться не только как возможный путь повышения однородности сплавов путем увеличения скоростей охлаждения при кристаллизации, но и как способ повышения характеристик МЦУ [23]. При применении гранул меньших фракций уменьшается размер дефектов, а их распределение становится более узким и стабильным (рис. 5) [24].

Выводы

Таким образом, для оценки работоспособности изделия в процессе эксплуатации, кроме параметров статической и длительной прочности разработчикам ГТД необходимо располагать данными по характеристикам сопротивления малоциклового усталости с учетом реальных факторов, в том числе металлургических дефектов, которые могут присутствовать в заготовке диска и оказывать влияние на ее механические свойства.

Применение детерминированного подхода для назначения интервала инспекции технического состояния ГТД, исходя из условия, что допустимый металлургический дефект самого крупного размера «помещается» в самую напряженную зону детали, не всегда приводит к результатам, которые обеспечивают рентабельную эксплуатацию изделия из-за необходимости частых инспекций двигателя. Для того чтобы рассматривать условие прочности в вероятностном смысле, т. е. определять вероятность разрушения детали в пределах заданного ресурса, необходимы данные по размеру и количеству дефектов, вероятности их выявления с помощью применяемых методов контроля, а также по влиянию дефектов на трещиностойкость.

Приведенные результаты должны быть дополнены исследованиями в области неразрушающего контроля (ультразвук, томография высокого разрешения). Представленная работа призвана очертить круг имеющихся проблем и привлечь к их решению специалистов из различных областей авиаци-

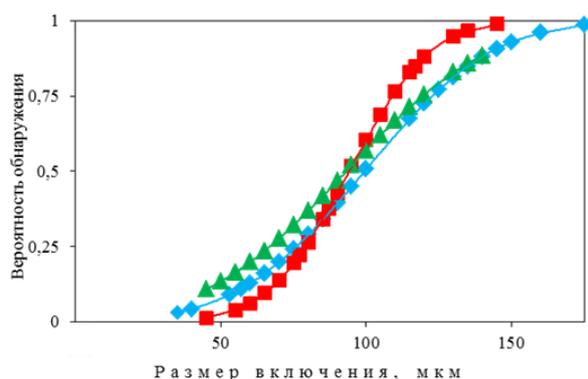


Рис. 2. Функция распределения неметаллических включений по размеру по результатам фрактографических исследований изломов образцов из сплавов ЭП741НП (◆), ВВ751П (■) и ВВ751П (▲) после испытания на МЦУ. Размер гранул – менее 100 мкм [19]

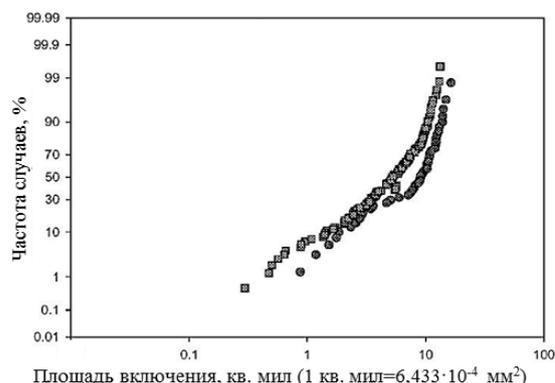


Рис. 3. Функция распределения размеров включений в модификации гранулированного жаропрочного никелевого сплава Udimet 720 [21]: (●) – прессовки; (■) – поковки

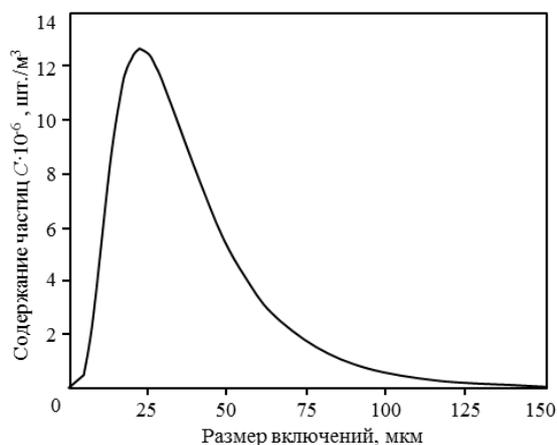


Рис. 4. Типичное распределение неметаллических включений в образцах из гранулированного жаропрочного никелевого сплава Rene 95 [22]

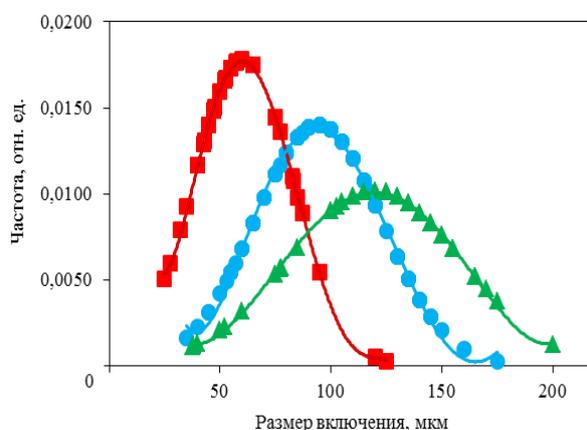


Рис. 5. Размер неметаллических включений в материале заготовок дисков из гранул фракций 70 (■), 100 (●) и 140 мкм (▲) (по результатам фрактографического анализа) [24]

онного двигателестроения. Для выработки жизнеспособной методики назначения ресурса критических высоконагруженных деталей, основанной на вероятностном подходе, необходимо объединение

научных потенциалов материаловедов, металлургов, специалистов по вопросам прочности и надежности, а также конструкторов авиационных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. №10. С. 6–12.
3. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. №S. С. 43–47.
4. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
5. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
6. Жегина И.П., Котельникова Л.В., Григоренко В.Б., Зимина З.Н. Особенности разрушения деформируемых никелевых сплавов и сталей // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 455–465.

7. Терентьев В.Ф., Беляев М.С., Бакрадзе М.М., Горбовец М.А., Гольдберг М.А. Разрушение жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях жесткого малоциклового нагружения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №11. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-12-12.
8. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Ильиных А.В., Ратчиев А.М. Экспериментальная проверка модели суммирования повреждений при циклическом нагружении дисков турбин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (5). С. 1372–1375.
9. Nide N.J., Henderson M.B., Reed P.A.S. Effects of grain and precipitate size variation on creep-fatigue behaviour of Udimet 720Li in both air and vacuum // *Superalloys-2000*. A Publ. of TMS (The Minerals, Metals, Materials Society). USA. Warrendale. Pennsylvania. 2000. P. 495–503.
10. Everitt S., Starink M.J., Reed P.A.S. Temperature and dwell dependence of fatigue crack propagation in various heat treatment turbine disk alloys // *Superalloys-2008*. A Publ. of TMS (The Minerals, Metals, Materials Society). USA. Warrendale. Pennsylvania. 2008. P. 741–750.
11. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Расчетное и экспериментальное исследование скорости роста трещин в образцах из никелевого сплава при простых и сложных циклах нагружения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2011. Т. 15. №1 (41). С. 64–66.
12. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А., Серветник А.Н. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. №3 (19). С. 188–199.
13. Ножницкий Ю.А. Проблемы применения гранулируемых сплавов в перспективных ГТД // *Технология легких сплавов*. 2007. №4. С. 13–20.
14. Кравченко И.Ф., Замковой В.Е., Шереметьев А.В., Гаращук Л.А., Кульгейко Т.Н. Применение дисков из гранул сплава ЭП741НП в новых двигателях ЗМКБ «Прогресс» // *Технология легких сплавов*. 2006. №4. С. 81–85.
15. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2016 (в печати).
16. Файнброн А.С. Фрактографические особенности развития трещин в образцах жаропрочных гранулируемых сплавов // *Технология легких сплавов*. №2. 2013. С. 43–50.
17. Файнброн А.С., Перцовский Н.З., Савин В.Н. Особенности зарождения разрушения гранулированного никелевого сплава ЭП741НП при испытаниях на малоцикловую усталость // *МиТОМ*. 1993. №6. С. 32–34.
18. Abikchi M., Billiot T., Crepin J., Longuet A., Mary C., Morgeneyer T.F., Pineau A. Fatigue life and initiation mechanism in wrought Inconel 718 DA for different microstructures // *Proceedings of 13th International Conference of Fracture*. Beijing, China. 2013. URL: <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/ICF/icf13/paper/download/11242/10621> (дата обращения: 15.04.2016).
19. Гарибов Г.С., Волков А.М. Исследование вероятностного распределения параметров неметаллических включений в заготовках дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов // Сб. тез. Междунар. форума двигателестроения. «Научно-технический конгресс по двигателестроению» (НТКД–2014). М.: АССАД, 2014. С. 106–108.
20. Востриков А.В., Гарибов Г.С., Кошелев В.Я. Влияние включений на сопротивление малоциклового усталости материала из гранул жаропрочных никелевых сплавов // *Конверсия в машиностроении*. 2006. №3. С. 19–22.
21. Bonacuse P., Kantzos P., Telesman J. Ceramic Inclusions // *P/M disk alloys: characterization and modeling – NASA/CP-2002-211682*. USA, Ohio. 2002. P. 359–391.
22. Reed R.C. *The Superalloys fundamentals and applications*. UK, Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 372 p.
23. Гарибов Г.С. Эволюция механических характеристик заготовок дисков со снижением крупности гранул // *Технология легких сплавов*. 2014. №4. С. 58–61.
24. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Волков А.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Металловедческие аспекты производства заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов методом ГИП // *Технология легких сплавов*. 2014. №3. С. 54–59.