

УДК 620.179.

*И.С. Краснов<sup>1</sup>, Д.С. Ложкова<sup>1</sup>, М.А. Далин<sup>1</sup>*

## **ОЦЕНКА ДЕФЕКТНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСЧЕТА РИСКА РАЗРУШЕНИЯ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122

*Рассмотрены вопросы построения распределения частот и размеров дефектов в полуфабрикатах и заготовках дисков ГТД из титановых сплавов для случая отсутствия статистической информации о выявленных при неразрушающем контроле дефектах. Предложен способ проведения оценки дефектности материала, учитывающий индивидуальные схемы сканирования при ультразвуковом контроле. Приведен математический аппарат, позволяющий провести численную оценку дефектности для заготовок и полуфабрикатов деталей из титановых сплавов.*

**Ключевые слова:** дефектность, допустимые повреждения, ГТД, титановый сплав, основные детали двигателя.

*I.S. Krasnov<sup>1</sup>, D.S. Lozhkova<sup>1</sup>, M.A. Dalin<sup>1</sup>*

## **EVALUATION OF DEFICIENCY OF TITANIUM ALLOY FORGINGS FOR PROBABILISTIC CALCULATION OF GAS TURBINE ENGINE DISKS FRACTURE RISK**

*The paper observes the issues of calculation of anomalous distribution of frequencies and sizes of defects in titanium alloy billets and forgings for gas turbine engine disks, for the case of absence of statistical information of defects detected during non-destructive testing. Deficiency evaluation method is proposed, taking into account individual scanning schemes at ultrasonic testing. A mathematical apparatus is given, which makes it possible to numerically evaluate deficiency for titanium alloy billets and disks for gas turbine engine.*

**Keywords:** deficiency, damage tolerance, gas turbine engine, titanium alloy, engine critical parts.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Раздел современных авиационных правил «Рекомендательный циркуляр. Авиационные правила» РЦ АП-33.70-1 [1], содержащий требования к установлению ресурса основных деталей авиационных двигателей, предписывает, в дополнение к традиционному методу, также подтверждать назначенный ресурс с использованием метода, основанного на модели допустимости повреждений. Этот метод учитывает вероятность разрушения детали из-за дефектов, в том числе внутренних металлургических дефектов материала, образовавшихся в процессе изготовления заготовки. Для вероятностного расчета безопасного ресурса основных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) по критерию допустимости повреждений, Юго-западным исследовательским институтом (Southwest Research Institute, США) разработано специализированное программное

обеспечение DARWIN. Дефектность материала детали (в виде графика распределения размеров и частот появления дефектов) является входным параметром при расчете безопасного ресурса в программе DARWIN наряду с данными о физических и механических свойствах материала во всем диапазоне рабочих температур, 3D-моделью детали, режимами ее нагружения в полетном цикле [2].

Дефектность – ожидаемое количество дефектов, в том числе металлургического происхождения, в единице массы материала, как функция размеров этих дефектов. В настоящее время графики распределения получены только для зарубежных титановых сплавов, изготавливаемых по технологиям тройного вакуумно-дугового переплава или плавки с холодным подом, что учтено в РЦ АП-33.70-1. Из-за отсутствия информации о дефектности материала применение вероятностного подхода к установлению ресурса с использованием программы DARWIN для основных деталей ГТД из других материалов невозможно, а промежуточные подходы, допустимые в РЦ АП-33.70-1, дают заведомо заниженные значения ресурса. Таким образом, получение статистически обоснованной численной оценки дефектности материалов основных деталей ГТД, изготавливаемых из титановых, жаропрочных никелевых сплавов и сталей [3–10], является крайне важной задачей, способной повысить конкурентоспособность новых отечественных ГТД, предназначенных для гражданской авиации.

Во ФГУП «ВИАМ» ранее разработаны подходы [11,12], которые выбраны в качестве основных при проведении оценки дефектности. Приведенные в работе [11] алгоритмы оценки дефектности заготовок дисков ГТД из титановых сплавов также предусматривают порядок действий для случая отсутствия выявленных дефектов в известном количестве проконтролированных заготовок, что является наиболее распространенным случаем в условиях отечественного производства полуфабрикатов основных деталей ГТД из титанового сплава. Так, предложено рассчитывать вероятность появления дефекта в единице массы материала как параметр генеральной совокупности  $P$  биномиального распределения, поэтому дальнейший расчет по построению графика дефектности проводился дискретно, с разбиением области размеров дефектов на участки, каждый из которых характеризовался определенным значением вероятности обнаружения дефекта. Недостатком такого подхода является некоторая зависимость получаемого результата от выбранного количества участков разбиения и диапазона области размеров дефектов (в работе [11] диапазон выбирался аналогично графикам, приведенным в FAA-AC 33.14-1 [13]), что является источником погрешности получаемых результатов.

В данной работе предложен алгоритм, позволяющий строить графики дефектности для титановых сплавов с большей точностью, без разбиения на участки.

### Подходы к определению дефектности

Рассматривая вероятность наличия дефекта в единице массы материала как бинарное событие, в алгоритм вносится допущение: в одной единице массы материала может быть несколько дефектов, вероятность чего должна быть учтена. Поэтому для более точной оценки необходимо выбирать как можно меньшую единицу массы материала таким образом, чтобы полученное число  $P$  получалось значительно меньше единицы. Таким образом, если вероятность появления одного дефекта в единице массы материала будет иметь порядок  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ , вероятность появления второго дефекта будет, соответственно, на 5 и более порядков ниже, что не внесет существенной ошибки в итоговый результат.

В процессе контроля могут применяться различные методы, охарактеризованные своими графиками вероятности обнаружения, каждый единичный объем материала

детали может быть проконтролирован одним или несколькими методами контроля или же не проконтролирован вовсе (например, «мертвые» зоны при ультразвуковом контроле). В связи с этим следующим этапом разработанного алгоритма является определение средневзвешенной функции вероятности обнаружения  $POD(a)$ , которая характеризует вероятность обнаружения дефекта размера  $a$  в материале, проконтролированном всеми методами и способами, предусмотренными технологией неразрушающего контроля (НК).

Весь объем материала можно условно разделить на  $n$  зон, каждая из которых контролируется по индивидуальной схеме сканирования, с собственными показателями вероятности обнаружения  $POD_n(a)$ . Так, на рис. 1 приведен эскиз детали, на котором показаны зоны, проконтролированные по различным схемам. Вследствие проведения контроля по различным схемам, основные параметры выявляемости дефектов, установленные по графикам  $POD(a)$  в различных зонах заготовки, существенно отличаются. Под основными параметрами выявляемости рассматриваются параметры, указанные в ГОСТ Р 58989–2020 [14]: вероятности обнаружения дефектов заданного размера и/или размера дефекта, выявляемого с вероятностью 50 % ( $a_{50}$ ), 90 % ( $a_{90}$ ), 95 % ( $a_{95}$ ) при доверительной вероятности 50 %, а также размера дефекта, выявляемого с вероятностью 90 % при доверительной вероятности 95 % ( $a_{90/95}$ ).

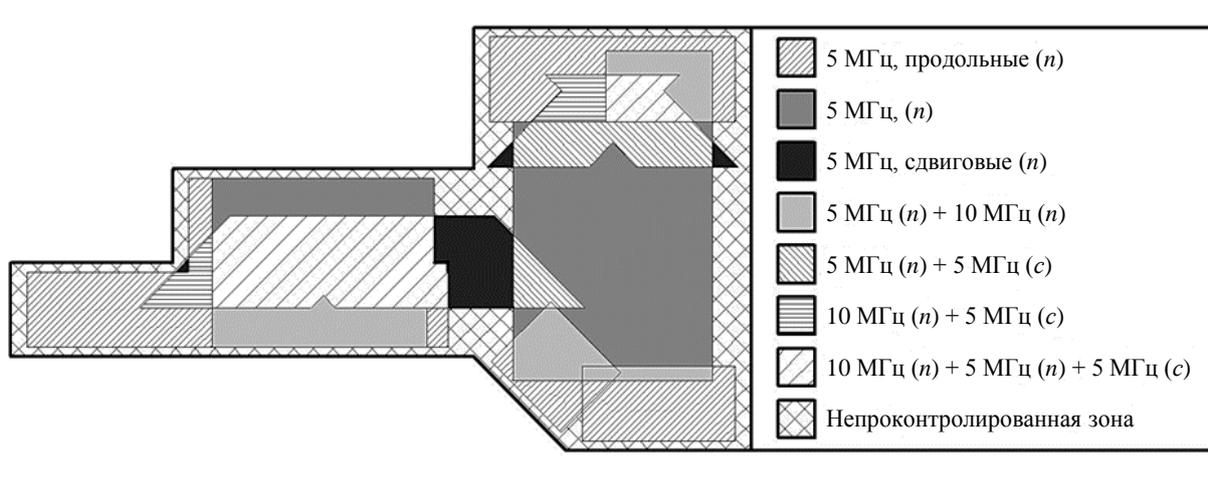


Рис. 1. Схематическое изображение сечения полуфабриката с наложенными индивидуальными зонами контроля

Отличие в показателях, с одной стороны, может быть объяснено тем, что в различных зонах контролируемого полуфабриката направление линий течений зерна, вдоль которых в большинстве случаев ориентирован наибольший размер дефекта, может существенно отличаться и тем самым влиять на общую картину выявляемости. С другой стороны, в различных зонах объекта контроля из-за геометрических особенностей, а также из-за требований к полноте контроля могут быть использованы различные схемы сканирования. Например, одна область может быть проконтролирована только с использованием преобразователя (ПЭП) с центральной частотой 10 МГц с вводом в объект контроля продольных ультразвуковых колебаний, а другая – с использованием ПЭП на 5 МГц с вводом продольных и сдвиговых волн, а также ПЭП на 10 МГц с вводом продольных волн. Поэтому при определении средневзвешенной функции вероятности обнаружения  $POD_n(a)$  необходимо учитывать вклад в итоговый параметр каждой зависимости  $POD(a)$  с учетом индивидуальных схем контроля.

Определение  $POD_n(a)$  для каждой зоны с индивидуальной схемой сканирования подробно рассмотрено в работе [15].

Принимая вероятность обнаружения дефекта в непроконтролированном объеме материала равной нулю, средневзвешенная функция  $POD(a)$  определяется как

$$POD(a) = \frac{M_1 \cdot POD_1(a) + M_2 \cdot POD_2(a) + \dots + M_n \cdot POD_n(a)}{M_1 + M_2 + \dots + M_n + M_0}, \quad (1)$$

где  $POD_1(a) \dots POD_n(a)$  – вероятность обнаружения дефекта размера  $a$  в зонах  $1 \dots n$ ;  $M_1 \dots M_n$  – количество единиц материала, проконтролированного по схеме контроля с вероятностью обнаружения  $POD_1(a) \dots POD_n(a)$ ;  $M_0$  – количество единиц непроконтролированного материала.

Дефектность материала для целей оценки допустимой повреждаемости, в том числе и для расчета в программе DARWIN, принято представлять в виде графика кумулятивной функции  $E(a)$ , характеризующего ожидаемое количество дефектов с размером больше  $a$  в единице массы материала детали, оставшихся после НК. После того как будет рассчитана средневзвешенная функция вероятности обнаружения, дефектность материала  $E(a)$  можно определить на основе изначальной дефектности  $E_{изн}(a)$ , которая представляет собой график, характеризующий ожидаемое количество дефектов с размером больше  $a$  в единице массы материала заготовки, которые содержатся в ней до того, как она попадет на НК. Определив изначальную дефектность, т. е. содержание дефектов до проведения НК, и вероятность обнаружения дефектов при НК, можно найти дефектность материала детали (количество пропущенных дефектов) и количество выявленных дефектов. Однако в большинстве случаев график  $E_{изн}(a)$  отсутствует.

В работе [16] сделано предположение, что график  $E_{изн}(a)$  в двойных логарифмических координатах представляет собой прямую, которая может быть задана однозначно двумя параметрами – наклоном  $Slope$  и положением по вертикали  $scale\ factor\ (SF)$ :

$$E_{изн}(a) = SF \cdot 10^{-Slope \log(a)} = SF \cdot a^{-Slope}. \quad (2)$$

Эти параметры определены на основе анализа данных о выявленных газонасыщенных включениях за продолжительное время, приведенных в базах данных *JETQC* и *DPD-3D*. Следует отметить, что в США за несколько лет на заводах даже в биллетах и дисках тройного переплава и плавки с холодным подом при ультразвуковом контроле выявлено несколько десятков дефектов, так что определение параметров графика  $E_{изн}(a)$  проводилось на пригодных для обработки статистических данных. Анализируя графики дефектности титановых сплавов, приведенные в работе [16], отмечено, что в зависимости от года производства и применяемой технологии получения слитка, у графика изначальной дефектности меняется только параметр  $SF$ , а наклон  $Slope$  остается приблизительно одинаковым. Пример графиков изначальной дефектности из работы [16], построенных для различных способов изготовления и состояний деформации, приведен на рис. 2.

Следует отметить, что параметр  $SF$ , полученный изначально по результатам анализа баз данных о выявленных при ультразвуковом контроле дефектах, откорректирован с учетом данных по имевшейся статистике событий, связанных с металлургическими дефектами в титановых дисках при коммерческой эксплуатации двигателей, в то время как параметр  $Slope$  признан правильным и не изменялся, в связи с чем отсутствуют основания предполагать, что он не подходит для российских титановых сплавов.

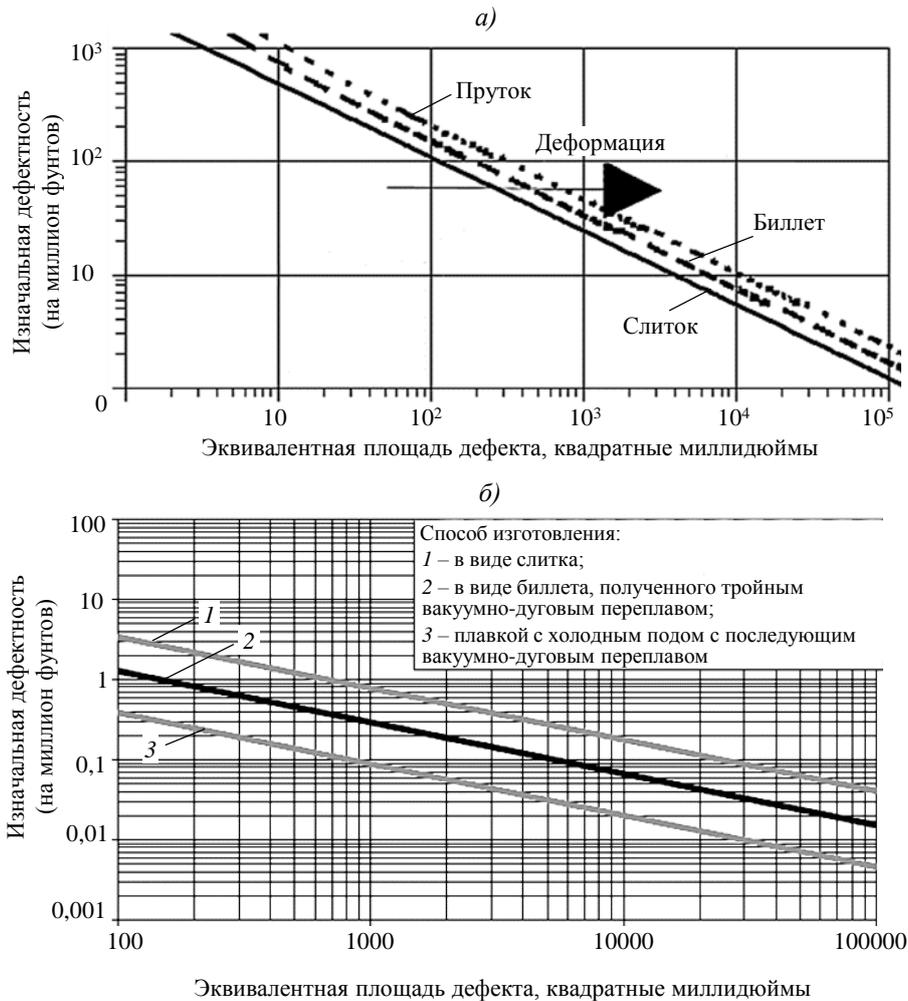


Рис. 2. Сравнительные графики изначальной дефектности из работы [16] для различных состояний деформации (а) и разных способов изготовления заготовок (б)

На основании этого сделано допущение, что параметр *Slope* известен и равен соответствующему параметру у зарубежных сплавов. Дальнейший расчет был направлен на определение величины *SF* при известном объеме проконтролированного материала и количества выявленных дефектов в нем.

Значения изначальной дефектности  $E_{изн}(a)$  и количество дефектов, выявленных при ультразвуковом контроле в единице массы материала заготовки с размером больше  $a$ ,  $N_{выявл}(a)$  связаны между собой через вероятность обнаружения  $POD(a)$  – график, характеризующий вероятность обнаружить дефект размером  $a$  применяемым методом НК. Вычислить количество выявленных дефектов  $N_{выявл}(a)$ , перемножив  $POD(a)$  и  $E_{изн}(a)$ , невозможно, так как  $POD(a)$  не является такой же обратной кумулятивной функцией. Поэтому для вычислений ввели функцию  $\frac{dE_{изн}(a)}{da}$ , характеризующую плот-

ность вероятности наличия в единице объема материала дефекта размером  $a$ . Плотность вероятности обнаружить дефект размером  $a$ , в результате проведения контроля единицы объема материала, будет являться произведением плотности вероятности наличия в единице объема материала дефекта размером  $a$  на вероятность обнаружения дефекта размера  $a$ , характеризующую данную технологию НК:

$$\frac{dN_{\text{выявл}}(a)}{da} = POD_{\text{общ}}(a) \cdot \frac{dE_{\text{изн}}(a)}{da}. \quad (3)$$

Подставив  $E_{\text{изн}}(a)$  из выражения (2) и взяв производную функции  $\frac{dE_{\text{изн}}(a)}{da}$ , получаем

$$\frac{dN_{\text{выявл}}(a)}{da} = POD_{\text{общ}}(a) \cdot (-SF \cdot Slope \cdot a^{-Slope-1}). \quad (4)$$

Проинтегрировав обе части выражения (4), получаем

$$N_{\text{выявл}}(a) = SF \cdot \int_{\infty}^a POD_{\text{общ}}(x) \cdot (-Slope \cdot x^{-Slope-1}) dx, \quad (5)$$

$$SF = \frac{N_{\text{выявл}}(a)}{\int_{\infty}^a POD_{\text{общ}}(x) \cdot (-Slope \cdot x^{-Slope-1}) dx}. \quad (6)$$

В работе [10] вероятность появления дефекта  $P$  в единице массы материала детали принималась равной верхней границе доверительного интервала биномиального распределения с доверительной вероятностью  $\varepsilon = 0,5$ , которая может быть выражена через квантили распределения Фишера:

$$P = \frac{(k+1)}{k+1 + (M-k)F_{2(M-k), 2(k+1), (\frac{\varepsilon}{2})}}, \quad (7)$$

где  $P$  – верхняя граница доверительного интервала;  $M$  – объем выборки;  $k$  – число благоприятных исходов (выявленных дефектов);  $F_{2(M-k), 2(k+1), (\frac{\varepsilon}{2})}$  – квантиль уровня  $\alpha = \varepsilon/2$  распределения

Фишера со степенями свободы  $f = 2(M-k)$  и  $g = 2(k+1)$ ;  $P$  является ожидаемым количеством выявленных дефектов всех размеров в расчете на единицу массы материала, что означает  $N_{\text{выявл}}(0) = P$ , и в свою очередь выражение (6) преобразуется следующим образом:

$$SF = \frac{P}{\int_{\infty}^a POD_{\text{общ}}(x) \cdot (-Slope \cdot x^{-Slope-1}) dx}. \quad (8)$$

С пределами интегрирования, указанными в выражении (8), интеграл в знаменателе, вероятно, не сходится в нуле. Во всяком случае, ни численного, ни аналитического решения получить не удалось. Однако установлено, что при значениях  $a$  менее  $1 \text{ мм}^2$  значение подынтегральной функции очень мало (выявить такие дефекты практически невозможно), так что существенной разницы в результате при выборе верхнего предела интегрирования равным  $1 \text{ мм}^2$  или  $0,1 \text{ мм}^2$  нет. Верхний предел интегрирования выбран равным  $0,16 \text{ мм}^2$  (100 квадратных миллидюймов), что соответствует минимальному значению размеров дефектов, приведенному на графиках дефектности в работе [13] и используемому в программе DARWIN, – специализированном программном обеспечении для расчета рисков разрушения деталей в эксплуатации. Можно предположить, что влияние дефектов меньшего размера на вероятность разрушения диска в эксплуатации ничтожно мало и может не учитываться. Исходя из этого:

$$SF = \frac{P}{\int_{\infty}^{0,16} POD_{\text{общ}}(x) \cdot (-Slope \cdot x^{-Slope-1}) dx}. \quad (9)$$

Таким образом, на основе рассчитанного значения из выражений (7) и (2) однозначным образом определяется значение функции  $E_{\text{изн}}(a)$ .

Дефектность материала заготовки  $E(a)$ , т. е. количество пропущенных при НК дефектов размера больше  $a$  в одном килограмме материала, может быть определена аналогично выражению (3):

$$\frac{dE(a)}{da} = \frac{dE_{\text{изн}}(a)}{da} \cdot (1 - POD(a)). \quad (10)$$

Таким образом, итоговая формула для расчета дефектности материала

$$E(a) = -Slope \cdot SF \cdot \int_{\infty}^a (1 - POD(x)) \cdot x^{-Slope-1} dx. \quad (11)$$

### Заключения

Предложен способ построения непрерывных графиков распределения частот и размеров дефектов для заготовок дисков основных деталей ГТД из титановых сплавов для возможности использования метода расчета ресурса, основанного на модели допустимости повреждений. Способ учитывает влияние на итоговую зависимость вероятности обнаружения дефектов, возможности использования индивидуальных схем сканирования в различных областях заготовки, а также отсутствие необходимой статистической информации по выявленным дефектам в производстве заготовок дисков основных деталей ГТД из титановых сплавов. Приведен математический аппарат, позволяющий провести численную оценку дефектности для заготовок и полуфабрикатов деталей из титановых сплавов.

### Библиографический список

1. Методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах: РЦ АП-33.70-1 / Межгосударственный авиационный комитет. М.: Авиаиздат, 2012. 31 с.
2. An Executive Update on the Turbine Rotor Material Design (TRMD) Program // 6th Annual FAA/Air Force/NASA/Navy Workshop on the Application of Probabilistic Methods to Gas Turbine Engines. 2003. 21 p.
3. Kablov E.N. Chemistry in Aviation Materials Science // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 967–969.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 13–19.
5. 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.
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. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2007. № 1. С. 4–8.
8. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Сидоров С.А., Бубнов М.В. Изготовление крупногабаритных штамповок дисков ГТД из слитков промышленного производства Ø320 мм сплава ЭК151-ИД // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2.

9. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.
10. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
11. Ложкова Д.С., Краснов И.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок дисков ГТД из титановых сплавов // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 61–67.
12. Ложкова Д.С., Краснов И.С. Экспериментальные исследования по оценке дефектности сварных соединений основных деталей ГТД // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 10–16.
13. Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors: FAA Advisory Circular AC 33.14-1. Washington: Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2001. 128 p.
14. ГОСТ Р 58989–2020. Двигатели газотурбинные авиационные. Неразрушающий контроль основных деталей. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
15. Ложкова Д.С. Оценка вероятности обнаружения дефектов при автоматизированном иммерсионном ультразвуковом контроле полуфабрикатов из титановых сплавов с использованием математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2018. 197 с.
16. The development of anomaly distributions for aircraft engine titanium disk alloys / American Institute of Aeronautics and Astronautics // AIAA Meeting Paper: 38<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamic, and Materials Conference. 1997. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1997-1068> (дата обращения: 02.03.2021). DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1997-1068>.