
Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-21-34

ПРОБЛЕМЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЕФЕКТНОСТИ ГРАНУЛИРУЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Д.М. Герасимов¹, И.С. Краснов¹, М.А. Далин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме оценки ожидаемого содержания неметаллических включений и других дефектов в материале, используемом для изготовления роторных деталей турбин и компрессоров авиационных газотурбинных двигателей. Показана важность наличия объективной информации о дефектах, не выявляемых методами неразрушающего контроля, для достоверного определения безопасного ресурса двигателя. Рассмотрены различные методы получения и обработки информации о количестве и размерах дефектов в материале, перечислены их преимущества и недостатки. Обоснован выбор исследований, направленных на разработку методики количественной оценки дефектов в гранулируемых сплавах.

Ключевые слова: гранулируемые жаропрочные никелевые сплавы, дефектность, газотурбинный двигатель, неразрушающий контроль

Для цитирования: Герасимов Д.М., Краснов И.С., Далин М.А. Проблемы количественной оценки дефектности гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 21–34. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-21-34.

Scientific article

PROBLEMS OF QUANTITATIVE ASSESSMENT OF DEFECTIVENESS IN GRANULATED NICKEL-BASE SUPERALLOYS

D.M. Gerasimov¹, I.S. Krasnov¹, M.A. Dalin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article addresses the problem of assessing the expected content of non-metallic inclusions and other defects in materials used for manufacturing rotary components of turbines and compressors for aircraft gas turbine engines. The importance of objective information on defects not detected by non-destructive testing methods for the reliable determination of the safe service life of the engine is highlighted. Various methods for collecting and processing information on the quantity and size of defects in the material are reviewed, with their advantages and disadvantages listed. The choice of research directions aimed at developing a methodology for quantitative assessment of defects in granulated alloys is reasoned.

Keywords: powder metallurgy nickel-based superalloys, defectiveness, gas turbine engine, non-destructive testing

For citation: Gerasimov D.M., Krasnov I.S., Dalin M.A. Problems of quantitative assessment of defectiveness in granulated nickel-base superalloys. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 21–34. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-21-34.

Введение

Жаропрочные никелевые сплавы нашли широкое применение в ответственных узлах газотурбинных двигателей (ГТД). Эти материалы обладают высокой термической стабильностью, жаропрочностью и устойчивостью к окислению при высоких температурах, что делает их идеальными для применения в экстремальных условиях [1]. К дискам и другим роторным деталям ГТД предъявляются строгие требования по качеству и надежности. Такие детали работают в условиях циклических нагружений [2], из-за чего даже небольшая внутренняя несплошность может стать причиной роста усталостной трещины и привести к разрушению детали.

В настоящее время диски турбин ГТД из жаропрочных никелевых сплавов изготавливают по двум различным технологиям: традиционным путем – деформацией слитка (деформируемые сплавы) и с применением порошковой металлургии (гранулируемые сплавы). Гранулируемые жаропрочные никелевые сплавы обладают рядом преимуществ по сравнению с деформируемыми. Кроме более высоких эксплуатационных характеристик, они свободны от ряда типичных металлургических дефектов, характерных для деформируемых сплавов. Примером такого дефекта деформируемых сплавов является несплошность «корона», возникающая при вакуумно-дуговом переплаве слитка, трудно выявляемая существующими методами неразрушающего контроля и способная привести к разрушению диска при эксплуатации [3].

Однако процесс изготовления гранулируемых материалов также сопряжен с риском возникновения дефектов. Основной тип металлургических дефектов у таких сплавов – неметаллические включения [4], которые могут привноситься из различных источников (например, из примесей в исходных шихтовых материалах, внутренней части футеровки тигля плавильной печи или являться частицами шлака). Другие виды дефектов – межгранульные и внутригранульные поры, однако их размер и объемное содержание крайне малы. Они редко являются причиной разрушения при малоцикло-вой усталости (МЦУ) – менее 1 % от всех разрушений образцов. Дефекты принято делить на присущие материалу (*intrinsic*) с размером <200 мкм и посторонние (*rogue*) с размером >200 мкм. Такое деление связано с технологией рассева гранул, практически исключая попадание в материал заготовок любых частиц с максимальным линейным размером, превышающим в 1,6 раза размер ячейки сита, используемого для выделения гранул нужной фракции. Посторонние включения могут попасть в материал в результате нарушения технологического процесса переработки гранул или вследствие несовершенства применяемого оборудования. Количество присущих материалу дефектов может достигать >1000 шт. в 1 кг материала. Посторонние включения встречаются существенно реже – типичным является одно включение на несколько сотен килограммов материала [5]. Электростатическая сепарация гранул позволяет существенно снизить количество неметаллических включений любых размеров в материале. Применение методов неразрушающего контроля компактированных заготовок (в первую очередь ультразвукового) позволяет снизить вероятность наличия посторонних включений в готовой детали. Однако, несмотря на высокую контролепригодность гранулируемых сплавов и постоянное совершенствование методов и средств ультразвукового контроля (УЗК), сложность выявления дефектов в гранулируемых никелевых сплавах остается серьезной проблемой. Для объективной оценки и ограничения риска разрушения дисков ГТД за рубежом и в РФ при сертификации двигателя разработчик должен подтвердить (путем проведения соответствующих расчетов), что диск из гранулируемого сплава не разрушится в пределах одобренного ресурса из-за внутренней несплошности. Данное требование следует из указаний норм летной годности АП-33 (33.70) [5],

устанавливающих необходимость доказывать при сертификации двигателя, что его основные детали, ресурс которых устанавливается в циклах, не разрушатся в пределах одобренного ресурса из-за дефектов в материале.

В соответствии с рекомендательным циркуляром [6], основным рекомендуемым подходом для подтверждения того, что диски не разрушатся из-за дефектов в материале, является «вероятностная оценка риска допустимости повреждений», при которой входными данными для расчета безопасного ресурса являются в первую очередь механические свойства материала и условия нагружения детали в полете. Кроме этого, для расчета необходимы оценки ожидаемого количества металлургических дефектов различного размера в материале детали. При отсутствии таких данных о дефектности материала циркуляр РЦ-АП-33.70-2 допускает и другие промежуточные варианты установления соответствия. Однако только вероятностные оценки риска разрушения могут быть использованы применительно к проблемам поддержания летной годности, связанным с недостаточностью ресурса детали и некоторым состоянием детали, которые не могут быть исключены с помощью доступных технологических процессов изготовления и методов контроля состояния. Иными словами, наличие данных о дефектности материала может позволить при сертификации двигателя обоснованно увеличить назначенный ресурс детали или интервалы между техническими осмотрами двигателя, что существенно влияет на его конкурентоспособность.

Ведущие зарубежные моторостроительные корпорации не публикуют применяемые подходы к оценке допустимости повреждений, однако по косвенным данным [7] можно сделать вывод, что для гранулируемых никелевых сплавов применяется именно вероятностный подход, и количественная оценка дефектности используемых ими гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов на этапе сертификации двигателей была проведена.

Данная статья посвящена анализу состояния количественной оценки дефектности гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов в РФ и за рубежом.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Опасность неверной оценки дефектности гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов

Ошибки при оценке дефектности материалов основных деталей ГТД из гранулируемых сплавов могут привести к серьезным последствиям. Завышение оцененного значения дефектности может вызвать необоснованное снижение расчетного ресурса детали. В свою очередь занижение оценки дефектности основных деталей из гранулируемых никелевых сплавов, допущенное на этапе сертификации двигателя и обнаруженное после начала его широкой коммерческой эксплуатации, приводит к необходимости массового отзыва двигателей для проведения внепланового технического обслуживания и замены деталей с тяжелыми экономическими последствиями для изготовителей двигателя и эксплуатантов.

Известные случаи недооценки дефектности, приведшие к снижению безопасности эксплуатации двигателей, связаны с тем, что на этапе одобрения ресурса и сертификации двигателей разработчику не было известно о возможности попадания в материал нового типа дефекта. Так, например, в марте 2020 г. во Вьетнаме на самолете Airbus A321 при попытке взлета разрушился ГТД V2500 производства компании Pratt & Whitney. В результате расследования производитель установил, что при изготовлении заготовки

диска первой ступени турбины высокого давления из гранулируемого жаропрочного никелевого сплава в материал попало включение размером $0,40 \times 0,06$ мм. При высоко-температурной термообработке неметаллическое включение вызвало образование внутреннего трещиноподобного (плоскостного) дефекта размером $3,0 \times 1,9$ мм. Дефект располагался в ступичной части заготовки глубоко под поверхностью и имел радиально-аксиальную ориентацию, вследствие чего он не был выявлен при стандартном УЗК заготовки. Концентрация напряжений, вызванная наличием дефекта, под действием эксплуатационных нагрузок привела к росту усталостной трещины и последующему разрушению диска [8]. Далее, 24 декабря 2022 г. при взлете из аэропорта Гвадалахары (Мексика) на другом аэробусе произошло разрушение диска седьмой ступени компрессора высокого давления двигателя PW1100G того же производителя. Диск был изготовлен из другого гранулируемого жаропрочного никелевого сплава. Проведя анализ, компания Pratt & Whitney установила, что двигатель вышел из строя из-за дефекта такого же типа, который стал причиной инцидента в марте 2020 г. Для снижения риска попадания загрязнений в материал деталей, производитель ввел девять технологических мероприятий [7]. Однако поскольку до этого металл с повышенной дефектностью использовался компанией Pratt & Whitney для изготовления основных деталей ГТД в течение 6 лет, потребовалось экстренное (ранее первоначально одобренного срока) проведение инспекции дисков ~ 3000 находящихся в эксплуатации двигателей. Единственным эффективным способом обнаружить внутренний радиально-аксиальный дефект в дисках оказался УЗК с применением волн, вводимых под углом к поверхности (angled ultrasonic inspection – AUSI). Проведение такого контроля дисков требует снятия двигателя с самолета и занимает 250–300 дней. В результате с 2023 г. в среднем 350 самолетов по всему миру одновременно выведены из эксплуатации, авиакомпаниям приходится сокращать количество выполняемых рейсов. Финансовые потери компании Pratt & Whitney оцениваются в 6–7 млрд долл. США [7].

Похожая, но менее масштабная проблема была обнаружена в 2023 г. компанией General Electric. Загрязнение материала представляло собой включения из стали, попавшие в гранулируемый жаропрочный никелевый сплав из-за недостатков процесса производства гранул. Такие включения могут снижать усталостную долговечность материала и приводить к преждевременному разрушению диска. Диски нескольких двигателей CF6 и GE90, изготовленные из материала, потенциально способного содержать такие включения, было предписано заменить [9].

Представление результатов оценки дефектности

В циркуляре РЦ-АП-33.70-2 для вероятностного расчета безопасного ресурса предлагается использовать специализированное программное обеспечение (ПО). Входными данными в ПО в первую очередь являются механические свойства материала и условия нагружения детали в полете. Кроме этого, для расчета необходимы оценки ожидаемого количества металлургических дефектов различного размера в материале детали, обычно представляемые в виде распределения дефектов по размерам и частоте появления, т. е. графика функции обратного кумулятивного распределения, характеризующей ожидаемое количество дефектов (по оси ординат) с размером больше определенного (по оси абсцисс) в единице массы материала детали. В ПО при вероятностной оценке допустимой повреждаемости для гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов (как и для всех сплавов кроме титановых) под размером дефекта понимается его максимальный линейный размер. В данной статье (если не указано иное) под размером дефекта понимается именно его максимальный линейный размер. Следует

отметить, что для применения промежуточных подходов к допустимой повреждаемости в качестве размера на графике распределения размеров и частоты появления дефектов может потребоваться указание площади дефекта в максимальном сечении.

Диапазон размеров дефектов, в котором должна быть выполнена оценка, ограничен снизу тем фактом, что при размере дефекта <30 мкм усталостная трещина с большей вероятностью возникнет в материале не от дефекта, а от границы зерен, которая в анизотропных материалах также является концентратором напряжений [10].

Как показано в работе [11], дефекты в гранулируемых сплавах при решении стереологических задач с достаточной степенью достоверности можно представлять в виде эллипсоидов. Размер и форма эллипсоида однозначно характеризуется длиной его главных осей a , b и c , где a – длина наибольшей оси, c – наименьшей. Форма такой модели дефекта определяется соотношением длин осей (a/b и b/c) и при расчете в ПО задается в виде параметров математического ожидания и среднеквадратичного отклонения распределения этих соотношений. Эти параметры также должны быть установлены при оценке дефектности материала.

Ориентация дефекта в пространстве определяется тремя углами между главными осями эллипсоида и осями координат детали. Параметры распределения указанных углов, также как и параметры распределения размеров дефектов, вводятся при расчете в ПО. Следует отметить, что углы наклона дефекта в пространстве (в детали) могут иметь некоторую упорядоченность или преимущественную ориентацию в отдельных зонах детали только в случае применения технологии «горячее изостатическое прессование (ГИП) + деформация». Для отечественных деталей, получаемых методом прямого ГИП, ориентация дефектов в пространстве будет случайной. Это означает, что все три угла, задающие ориентацию дефекта в пространстве, будут распределены по равномерному закону в диапазоне от 0 до π радиан.

Анализ способов получения первичной информации для оценки дефектности

Для оценки дефектности гранулируемых сплавов могут применяться различные методы исследования. Агентством по авиационной безопасности Европейского союза разработан сертификационный меморандум [12], который предлагает следующие способы сбора количественной информации о дефектах в гранулируемых никелевых сплавах:

– металлографическое исследование шлифов позволяет определить все дефекты, будь то поры или включения, однако исследованию подвергается лишь относительно небольшой объем материала, что приводит к необходимости экстраполяции результатов;

– испытания на растяжение больших прутков и последующая фрактография – предполагается, что при этом пруток порвется в сечении, содержащем наибольший дефект, и размер этого дефекта можно будет измерить на изломе. Однако это произойдет, только если наибольший дефект будет соответствующим образом ориентирован к направлению приложения нагрузки. Данный способ позволяет исследовать достаточно большие объемы материала, но обнаружен при этом будет только дефект наибольшего размера в каждом образце. Утверждается, что для построения графика дефектности может быть использовано распределение Гумбеля;

– испытания на МЦУ и последующая фрактография – рекомендуется использовать образцы большего размера, чем обычно, для более быстрого набора статистических данных, однако размер образцов ограничен максимальным усилием имеющихся разрывных машин. При этом аналогично предыдущему способу будет обнаружен только дефект наибольшего размера в каждом образце, и для построения графика дефектности требуется специальная математическая обработка результатов;

– разделение гранул в тяжелой жидкости, при котором материал в виде порошка погружается в жидкость с плотностью меньше, чем у гранул, но больше, чем у керамических включений. Таким образом, металлические гранулы опускаются на дно, а неметаллические включения всплывают. Преимущества способа в том, что таким образом дефектность определяется непосредственно, без применения какого-либо математического аппарата и вероятностной оценки, для измерений доступны все габаритные размеры дефекта. Однако данный способ не учитывает деформацию заготовки и, таким образом, может использоваться только для материалов при прямом ГИП, а также не позволяет оценивать поры;

– растворение в кислотах, которые растворяют металл, но не керамику. Применять данный способ затруднительно на материалах, содержащих вольфрам, и, как и в предыдущем случае, невозможно оценивать поры;

– вскрытие дефектов, обнаруженных при исследовании ультразвуковым методом, возможно для больших объемов материала и выявления как керамических включений, так и пор. Способ позволяет выявлять относительно большие дефекты вследствие ограничений чувствительности УЗК.

Проблемы металлографических исследований

Как указано ранее, металлографические методы позволяют достоверно оценить дефектность только в диапазоне небольших размеров дефектов. По мнению зарубежных исследователей [13], необходимый объем металлографических исследований гранулируемых сплавов должен составлять существенно более 100 см^2 шлифов. Однако даже при такой внушительной площади исследуемых шлифов металлографические исследования позволяют оценить дефектность материала только в диапазоне размеров до 60–70 мкм. С увеличением размера дефектов их количество резко снижается, поэтому даже незначительное увеличение требуемого диапазона размеров дефектов приведет к необходимости кратного увеличения площади исследуемых шлифов и соответствующему увеличению трудоемкости. Для объективной оценки дефектности в диапазоне размеров >60 мкм целесообразно комбинировать металлографические исследования с другими методами оценки.

Другой научной проблемой применения металлографических методов является необходимость определения объемного содержания включений на основе информации о дефектах, обнаруженных на шлифах. Размер дефекта на шлифе, как правило, не совпадает с его максимальным размером в трехмерном объеме – сечение обычно случайно проходит через включение. В стереологических задачах нередко требуется построение графика, отражающего плотность вероятности наличия дефекта определенного размера $a \times b \times c$ в единице объема – это делается на основе статистических данных о числе и размерах дефектов, выявленных металлографическими методами.

В статье [14] доказано, что для дефектов произвольной формы, а также для эллипсоидов с произвольными осями a , b и c , строгое математическое решение задачи восстановления объемного распределения по срезам принципиально невозможно.

Тем не менее если соотношения между полуосями эллипсоидов известны, задачу удается решить с использованием метода максимума правдоподобия [15]. Однако тестирование данного подхода на искусственных образцах, содержащих заранее заданные включения, продемонстрировало неоднозначные результаты: в одном случае достоверность была подтверждена, а в другом – метод максимума правдоподобия показал неудовлетворительное качество оценки.

В большинстве современных публикаций (например, в обзоре [11] по жаропрочным никелевым сплавам) содержатся ссылки на фундаментальную работу [14], в которой

предложен так называемый «развертывающий» алгоритм. Он позволяет с использованием распределения размеров дефектов на шлифах оценить параметры этих дефектов уже в объеме материала. Однако этот математический метод опирается на некоторые важные допущения:

– все включения имеют форму сфероидов, т. е. эллипсоидов с двумя равными полуосями;

– предполагается, что в материале содержатся либо только продолговатые сфероиды (с равными полуосями b и c), либо только сплюснутые сфероиды (с равными полуосями b и a).

В алгоритме, представленном в работе [15], численное решение стереологического уравнения выполняется для определенных дискретных размеров и форм дефектов. Для этого весь диапазон размеров и параметров формы разбивается на k и s интервалов соответственно, что неминуемо влечет за собой случайные ошибки дискретизации и снижает точность итоговой оценки. Таким образом, хотя использование алгоритма, представленного в работе [16], и возможно, представляется целесообразным продолжить исследования в направлении метода максимума правдоподобия, включая верификацию получаемых результатов.

Проблемы фрактографических исследований

Имея большой опыт испытания образцов из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, специалисты НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ выразили сомнения в возможности применения испытаний на растяжение больших прутков для оценки дефектности материала. Разрушение прутка по дефекту при статическом нагружении маловероятно. Возможно, рекомендации в сертификационном меморандуме [12] составлены для сплавов, получаемых методом «ГИП + деформация», и в этой части не применимы для материалов, получаемых методом прямого ГИП. Поэтому для оценки дефектности рассмотрим только фрактографические исследования изломов образцов, разрушенных в результате испытаний на МЦУ.

Несмотря на существенно больший (по сравнению с методом металлографии) объем исследуемого металла, диапазон размеров дефектов, в котором фрактографические исследования позволяют получить достоверную информацию о дефектности, также ограничен. Диаметр рабочей части образца, предназначенного для проведения испытаний на МЦУ, для жаропрочных сплавов составляет от 5 до 10 мм [17, 18], что соответствует объему рабочей части образца – не более 2 см^3 . Даже по результатам испытания нескольких десятков образцов обнаружить дефекты размером $>160 \text{ мкм}$ невозможно.

К ключевым проблемам фрактографических исследований относится также их выраженная локальность: анализ ограничивается исключительно областью излома, вследствие чего получить комплексное представление о распределении дефектов по всему объему материала оказывается весьма затруднительно. В сертификационном меморандуме [12] для минимизации подобных неопределенностей рекомендовано использовать распределение Гумбеля. Этот метод позволяет оценивать параметры исходного распределения по наибольшим значениям, полученным в серии выборок (в предположении, что образец всегда разрушается по наибольшему дефекту). Однако этот статистический метод предполагает ряд ограничений – в частности, требуется, чтобы искомое распределение было ограничено, что не очевидно для распределения дефектов в материале. Кроме того, весь имеющийся математический аппарат по оценке параметров исходного распределения на основе данных о максимальных значениях в выборке при помощи статистики Гумбеля разработан для исходного распределения, подчиняющегося нормальному закону, и найти известное аналитическое решение для исходного распределения произвольной формы не удалось.

В качестве альтернативного, более универсального способа авторами данной статьи предложено применять сочетание методов Монте-Карло и максимума правдоподобия. Метод Монте-Карло основан на многократном статистическом моделировании случайных выборок, что позволяет получать приближенные численные результаты даже для сложных или неразрешимых аналитически задач, особенно при отсутствии точной информации о распределении дефектов. С помощью метода максимума правдоподобия можно оценивать неизвестные параметры распределения дефектов путем максимизации функции правдоподобия – универсальный статистический способ для работы с различными видами данных независимо от типа их распределения. Опробование этих методов на симулированных данных показало, что оценка возможна, но неопределенность в полученной оценке растет с уменьшением размера дефекта. Для снижения возникновения возможных ошибок целесообразно применять эти методы совместно с металлографическими исследованиями, имеющими низкую погрешность в диапазоне размеров дефекта <60 мкм.

Однако независимо от применяемых методов статистической обработки результатов следует учитывать, что образец не всегда разрушается по самому большому дефекту. Например, если разрушение происходит по дефекту, локализованному в середине образца, можно с большой долей уверенности считать, что этот дефект является самым большим по размеру во всей рабочей части образца. Но возникновение трещины ближе к поверхности заметно осложняет ситуацию: из-за возрастания концентрации напряжений именно на периферии зачастую инициируется разрушение [10]. Для дефектов плоскостного характера на вероятность разрушения образца влияет ориентация дефекта относительно направления нагружения. Это приводит к тому, что дефект, послуживший причиной разрушения, вовсе не обязательно максимален по размеру, а более крупные внутренние дефекты могут остаться необнаруженными. В подобных случаях использование распределения Гумбеля требует введения соответствующих корректировок.

Несмотря на перечисленные проблемы, фрактографические исследования остаются перспективным методом для количественной оценки дефектности в диапазоне размеров дефектов от 60 до 160 мкм.

Проблемы ультразвукового контроля

Основным ограничением применения ультразвукового исследования для сбора информации о дефектах является чувствительность метода. При серийном контроле заготовок из гранулируемых сплавов чувствительность контроля соответствует выявлению плоскодонного отражателя диаметром 0,4 мм. Это означает, что при контроле будут выявлены дефекты, по своей отражающей способности эквивалентные указанному плоскодонному отражателю. Однако дефект может быть значительно большего размера, но из-за своей формы и неоптимальной ориентации относительно направления ввода ультразвуковых колебаний может быть пропущен. О другой возможной причине пропуска дефекта упоминается в сертификационном меморандуме [12] на странице 6: выявляемость дефекта зависит от того, имеется ли когезия между материалом дефекта и основным материалом.

Очевидно, что если дефект будет выявлен при УЗК, заготовка будет забракована и не пойдет в дальнейшее производство. Но так как выявление дефекта при УЗК из-за описанных ранее причин носит вероятностный характер, необходима оценка вероятности обнаружения дефектов с целью определения количества «пропущенных» при УЗК дефектов. Определение вероятности обнаружения дефектов при УЗК – отдельная задача, которая требует либо изготовления специальных образцов, либо сложного математического аппарата, и ее необходимо решать для каждого отдельно взятого случая

применения УЗК: для различных материалов, способов изготовления и технологии контроля вероятность обнаружения дефектов будет различной [19, 20].

Поскольку проведение УЗК не гарантирует выявление всех дефектов заданного размера (т. е. существует ненулевая вероятность того, что после контроля в заготовках останутся необнаруженные дефекты), возникает необходимость оценивать дефектность для подобных дефектов. Использование металлографических и фрактографических исследований перекрывает диапазон размеров дефектов до 160 мкм, следовательно, необходимо увеличить чувствительность УЗК для обеспечения перекрытия всего диапазона размеров дефектов.

Для этого предложен и опробован факультативный контроль на повышенной чувствительности (плоскодонный отражатель диаметром 0,2 мм), а также контроль продольными волнами, вводимыми под углом к поверхности. Основными причинами ограничения чувствительности УЗК являются затухание и рассеяние ультразвуковых колебаний в материале из-за чего уменьшается отношение сигнал/структурный шум. Для увеличения этого отношения и, соответственно, увеличения чувствительности использовали фокусированные ультразвуковые преобразователи, которые позволяют сфокусировать ультразвуковой пучок на требуемой глубине, изменяя расстояние от торца преобразователя до поверхности ввода ультразвуковых колебаний. Фокальную зону преобразования, в которой ультразвуковой пучок обладает наибольшей интенсивностью, можно сдвигать по глубине и таким образом проводить «послойный» ультразвуковой контроль на повышенной чувствительности.

При опробовании такого контроля на заготовках из гранулируемого жаропрочного сплава обнаружено несколько эхо-сигналов, эквивалентных по своей отражающей способности плоскодонным отражателям диаметром от 0,2 до 0,26 мм. Места расположения указанных эхо-сигналов вырезаны из заготовок и вскрыты с помощью излома (рис. 1). Установлено, что все выявленные дефекты являются включениями. Площадь дефектов на изломе составила от 25542 до 34059 мкм². Эквивалентный площади диаметров включений на изломе составил от 180 до 211 мкм.

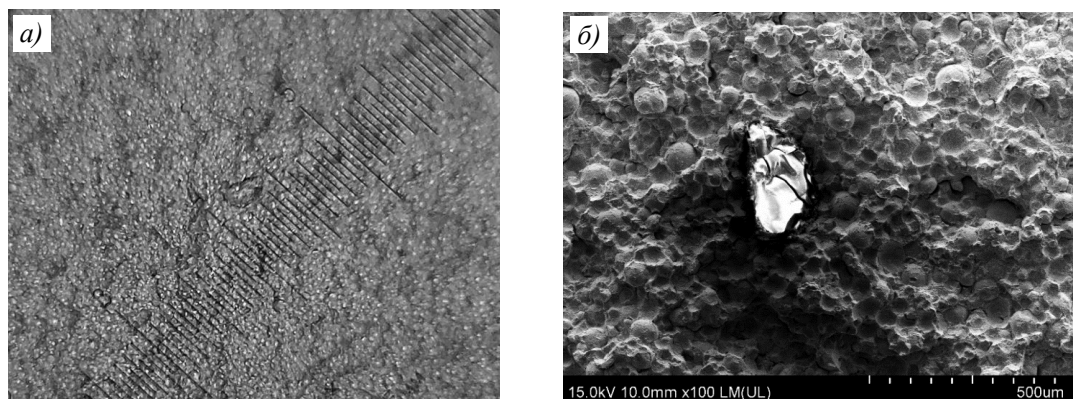


Рис. 1. Внешний вид включения на оптическом (а) и электронном (б) микроскопах

В настоящее время ультразвуковой метод неразрушающего контроля большого объема заготовок является единственным способом количественной оценки возможного содержания в материале дефектов, относящихся к «посторонним». К таким дефектам относятся и упомянутые ранее радиально-аксиальные трещины, и железные включения. На настоящий момент нет оснований предполагать, что эти два типа дефектов характерны для гранулированных жаропрочных никелевых сплавов, выпускаемых предприятиями РФ. Однако поскольку крупные посторонние включения с большой вероятностью могут

привести к преждевременному разрушению детали при эксплуатации, учет возможности наличия таких включений при построении графика дефектности, по-видимому, необходим.

Томография как альтернативный способ оценки дефектности

Помимо вышеперечисленных способов, для оценки дефектности может использоваться рентгеновская компьютерная томография (РКТ). Диапазон размеров дефектов, на который может распространяться оценка с использованием РКТ, – от 40 до 160 мкм. Нижняя граница размеров дефектов обусловлена тем, что даже при использовании микрофокусной рентгеновской трубки, максимально возможного увеличения и высокоразрешающего плоскопанельного детектора дефекты размером 40 мкм с высокой вероятностью могут быть пропущены. Верхняя граница связана с тем, что дефекты размером >160 мкм встречаются в материале крайне редко, и для обнаружения статистически значимого количества дефектов такого размера потребуется томографическое исследование сотен образцов. По перекрываемому диапазону размеров дефектов РКТ является альтернативой фрактографическим исследованиям изломов образцов, поэтому ее следует сравнивать именно с этим методом. К достоинствам РКТ следует отнести возможность регистрации дефектов всех размеров в исследуемом объеме материала, а не только одного наибольшего. Однако эксперименты, проведенные авторами данной статьи на образцах для испытаний на МЦУ, показали, что при РКТ не обнаруживается существенная часть дефектов размером 40–90 мкм, которые впоследствии становятся причиной разрушения образца при испытании на МЦУ. Причинами пропуска дефектов могут быть:

- плоскостной характер дефекта, при котором один из его габаритных размеров существенно меньше, чем два других, и в результате он не образует радиационного контраста, достаточного для его обнаружения;

- плотность материала включения, сопоставимая с плотностью никелевого сплава. Так, один из видов включений в сплаве ЭП741П содержит оксид гафния [21], плотность которого соответствует плотности никелевого сплава, что будет препятствовать формированию изображения этого дефекта на томограмме.

Еще одним известным недостатком РКТ является весьма сильная зависимость размера и количества зафиксированных дефектов от установленных параметров ПО, используемого при расшифровке и анализе томограмм. Дело в том, что результатом восстановления внутренней структуры исследуемого объекта после проведения его экспозиции является трехмерный цифровой массив вокселей (трехмерных пикселей), каждому из которых присвоено значение уровня серого, соответствующее среднему значению поглощения рентгеновского излучения материалом этого вокселя (больше поглощение – ниже уровень серого). Типичный размер вокселя при исследовании дефектности составляет $10 \times 10 \times 10$ мкм. Однако разрешающая способность системы ниже, чем это может показаться на основе размера вокселя. При этом величина уровня серого подвержена влиянию случайного шума. Упомянутый недостаток РКТ проявляется, например, при измерении пористости углепластиков. В работе [22] показано, как различные алгоритмы выбора порога обнаружения приводят к значениям этого порога от 35583 до 47086, в результате чего величина объемной доли пор одного образца, измеренная по одной и той же томограмме, варьируется от 3,81 до 10,42 % при фактическом значении ~6 %.

Эксперименты с проведением РКТ образцов для МЦУ с рабочей частью диаметром 4–5 мм показали, что автоматизированный способ поиска дефектов, основанный на пороговом значении уровня серого, при РКТ не применим. Применение модуля автоматизированного поиска дефектов Porosity/Inclusion Analysis неэффективно, так как

контраст как пор, так и плотных включений оказался слишком низким. Варьирование критериев поиска приводило либо к значительному пропуску дефектов, либо к отнесению к дефектам шумов изображения. На рис. 2 схематично показано, как разрешающая способность и шумовые характеристики делают невозможной точную оценку размера и количества дефектов: при выборе порога 1 оба дефекта будут зарегистрированы, но будет также ложно обнаружен отсутствующий дефект, обусловленный шумом, а при выборе порога 2 один из дефектов будет пропущен.

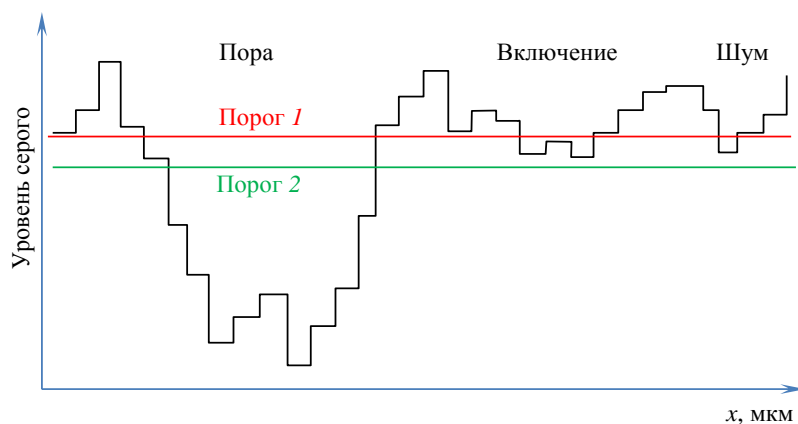


Рис. 2. Типичный график изменения уровня серого вдоль одной линии, проходящей через пору и включение. Меньшие значения уровня серого соответствуют меньшей плотности материала (дефекту)

Поэтому дефекты при использовании РКТ для оценки дефектности гранулируемых сплавов необходимо находить и определять размеры вручную. При этом методические указания для оператора, обеспечивающие однозначность и повторяемость такой расшифровки, позволяющие если не гарантированно фиксировать все дефекты с размером >60 мкм, то хотя бы исключить ложное обнаружение дефектов и обеспечить несмещенную оценку размеров обнаруженных дефектов, в настоящее время отсутствуют.

Таким образом, для получения надежных результатов оценки дефектности с применением РКТ следует, по-видимому, предварительно разработать методику такой оценки.

Казалось бы, к достоинствам томографии следует отнести более низкие (по сравнению с испытаниями на МЦУ) трудоемкость и стоимость работ, однако следует отметить, что РКТ одного образца занимает около одной смены, а с учетом амортизации оборудования и необходимости последующей обработки результатов себестоимость такого исследования соизмерима с себестоимостью испытаний на МЦУ.

Заключения

Для оценки дефектности заготовок из гранулируемых жаропрочных сплавов (с учетом преимуществ и недостатков рекомендованных методов) и перекрытия диапазона размеров дефектов, влияющих на эксплуатационные характеристики, целесообразно выбрать три способа: металлографическое исследование шлифов, испытания на МЦУ с последующей фрактографией, а также вскрытие дефектов, обнаруженных при исследовании ультразвуковым методом. Для использования вышеуказанных подходов необходимо совершенствовать математические методы обработки результатов, получаемых при металлографических и фрактографических исследованиях, повышать чувствительность УЗК и вероятностную оценку выявляемости дефектов при его применении. Возможно также применение РКТ взамен фрактографии, для чего необходимо разработать единый методический подход к оценке количества и размеров дефектов.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
2. Рьжков П.В., Горбовец М.А., Ходинев И.А. Определение параметров модели пластичности при циклическом нагружении жаропрочного никелевого сплава при повышенной температуре // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). С. 72–87. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-72-87.
3. National Transportation Safety Board. Aircraft accident report. 2018. URL: <https://www.ntsb.gov> (дата обращения: 09.01.2025).
4. Domas P.A., Roth P.G. Probabilistic Life Prediction Methods // Meeting the Challenges for Practical Application: Sixth international fatigue congress. Berlin, Germany, 1996. Vol. II. P. 1251.
5. Нормы летной годности двигателей воздушных судов: АП-33: утв. Постановлением 32-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства. 6-е изд., с поправками 1–5. М.: Авиаиздат, 2025. С. 7–11.
6. РЦ-АП-33.70-2. Методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах: рекомендательный циркуляр АР МАК. М., 2023. С. 25.
7. Class action amended consolidated class action complaint for violation of the federal securities laws // United States District Court District of Connecticut. URL: <https://www.saxenawhite.com> (дата обращения: 09.01.2025).
8. Investigation result of serious incident Vietnam Airlines Uncontained Engine Failure AIRBUS A321 MSN 5306 (VN-A392) Flight VN92: Final Report / Civil Aviation Authority of Vietnam. 2020. 36 p.
9. Airworthiness Directives; International Aero Engines, AG Engines // Federal Register. 2024. Vol. 89. No. 15. P. 49098.
10. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). С. 126–136. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
11. McClung R.C., Enright M.P., Liang W. Integration of NASA-developed lifing technology for PM alloys into DARWIN: The NASA STI. San Antonio, Texas, 2011. 74 p.
12. The integrity of nickel powder metallurgy rotating critical parts for gas turbines: Certification Memorandum. European Union Aviation Safety Agency, 2017. P. 1–11.
13. Kantzos P., Bonacuse P., Telesman J. et al. The Effect of Powder Cleanliness on the Fatigue Behavior of Powder Metallurgy Ni-Disk Alloy Udimet 720 // Superalloys. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2004. P. 409–417.
14. Cruz-Orive L.M. Particle Size-Shape Distributions: the General Spheroid Problem I: Mathematical Model // Journal of Microscopy. 1976. Vol. 107. P. 235–253.
15. Bonacuse P., Kantzos P., Telesman J. Ceramic inclusions in powder metallurgy disk alloys: characterization and modeling: NASA/CR-2002-211682. Cleveland, Ohio, 2002. 38 p.
16. Cruz-Orive L.M. Particle Size-Shape Distributions: the General Spheroid Problem II: Stochastic Model and Practical Guide // Journal of Microscopy. 1977. Vol. 112. P. 153–167.
17. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-4-59-70.
18. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 80–94. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
19. Чертищев В.Ю., Далин М.А., Бойчук А.С., Краснов И.С. Обзор статистических методов оценки вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле // В мире неразрушающего контроля. 2021. Т. 24. № 2 (92). С. 4–14.

20. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). С. 115–122. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
21. Трунькин И.Н., Артамонов М.А., Овчаров А.В., Васильев А.Л. Исследование содержащих гафний дефектов в гранулируемом никелевом сплаве ЭП741НП, используемом для изготовления авиационных двигателей // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2019. Т. 18. № 2. С. 89.
22. Kastner J., Plank B., Salaberger D., Sekelja J. Defect and Porosity Determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography // *2nd International Symposium on NDT in Aerospace: Proceedings*. Wels, Austria, 2010. P. 5.

References

1. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation technology. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
2. Ryzhkov P.V., Gorbovets M.A., Hodinev I.A. Determination of the parameters of the plasticity model under cyclic loading of a heat-resistant nickel alloy at elevated temperatures. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 72–87. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-72-87.
3. *National Transportation Safety Board. Aircraft accident report*. 2018. Available at: <https://www.ntsb.gov> (accessed: January 09, 2025).
4. Domas P.A., Roth P.G. Probabilistic Life Prediction Methods. *Meeting the Challenges for Practical Application: Sixth international fatigue congress*. Berlin, Germany, 1996, vol. II, p. 1251.
5. *Airworthiness Standards for Aircraft Engines: AP-33: approved by the Resolution of the 32nd Session of the Aviation and Airspace Utilization Council*. 6th ed., with amendments 1–5. Moscow: Aviaizdat, 2025, pp. 7–11.
6. RC-AP-33.70-2. *Methodological Materials for the Implementation of Requirements for Main Engine Components, the Service Life of Which is Established in Cycles*: Advisory Circular of the Interstate Aviation Committee (AR IAC). Moscow, 2023, p. 25.
7. Class action amended consolidated class action complaint for violation of the federal securities laws. *United States District Court District of Connecticut*. Available at: <https://www.saxenawhite.com> (accessed: January 09, 2025).
8. *Investigation result of serious incident Vietnam Airlines Uncontained Engine Failure AIRBUS A321 MSN 5306 (VN-A392) Flight VN92*: Final Report. Civil Aviation Authority of Vietnam, 2020, 36 p.
9. *Airworthiness Directives; International Aero Engines, AG Engines*. Federal Register, 2024, vol. 89, no. 15, p. 49098.
10. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Influence of average cycle stress on characteristics of low-cycle fatigue of high-temperature nickel alloy VZh175. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 126–136. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
11. McClung R.C., Enright M.P., Liang W. *Integration of NASA-developed lifing technology for PM alloys into DARWIN*: The NASA STI. San Antonio, Texas, 2011, 74 p.
12. *The integrity of nickel powder metallurgy rotating critical parts for gas turbines: Certification Memorandum*. European Union Aviation Safety Agency, 2017, pp. 1–11.
13. Kantzos P., Bonacuse P., Telesman J. et al. The Effect of Powder Cleanliness on the Fatigue Behavior of Powder Metallurgy Ni-Disk Alloy Udimet 720. *Superalloys*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2004, pp. 409–417.
14. Cruz-Orive L.M. Particle Size-Shape Distributions: the General Spheroid Problem I: Mathematical Model. *Journal of Microscopy*, 1976, vol. 107, pp. 235–253.
15. Bonacuse P., Kantzos P., Telesman J. *Ceramic inclusions in powder metallurgy disk alloys: characterization and modeling*: NASA/CR-2002-211682. Cleveland, Ohio, 2002, 38 p.

16. Cruz-Orive L.M. Particle Size-Shape Distributions: the General Spheroid Problem II: Stochastic Model and Practical Guide. *Journal of Microscopy*, 1977, vol. 112, pp. 153–167.
17. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-4-59-70.
18. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 80–94. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
19. Chertishchev V.Yu., Dalin M.A., Boychuk A.S., Krasnov I.S. Review of statistical methods for assessing the probability of detecting defects in non-destructive testing. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2021, vol. 24, no. 2 (92), pp. 4–14.
20. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 115–122. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: January 09, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
21. Trunkin I.N., Artamonov M.A., Ovcharov A.V., Vasiliev A.L. Study of hafnium-containing defects in granulated nickel alloy EP741NP used for the manufacture of aircraft engines. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2019, vol. 18, no. 2, p. 89.
22. Kastner J., Plank B., Salaberger D., Sekelja J. Defect and Porosity Determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography. *2nd International Symposium on NDT in Aerospace: Proceedings*. Wels, Austria, 2010, p. 5.

Информация об авторах

Герасимов Дмитрий Михайлович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Краснов Иван Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Далин Михаил Альбертович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry M. Gerasimov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan S. Krasnov, Lead Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail A. Dalin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.10.2025.
The article was submitted 03.10.2025; approved and accepted for publication after reviewing 21.10.2025