

УДК 620.179.16

Оценка дефектности заготовок из гранулируемых никелевых жаропрочных сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации

Герасимов Дмитрий Михайлович

admin@viam.ru

Краснов Иван Сергеевич

admin@viam.ru

Бойчук Александр Сергеевич

admin@viam.ru

НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены различные методы получения и обработки информации о количестве и размерах дефектов в гранулируемых никелевых жаропрочных сплавах. Показана важность наличия объективной информации о дефектах, не выявляемых методами неразрушающего контроля, для достоверного расчета безопасного ресурса двигателя. Обоснован выбор направлений исследований, направленных на разработку методики количественной оценки дефектов в гранулируемых сплавах.

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

Введение. Надежность и долговечность роторных дисков ГТД зависит, в том числе, от дефектности исходного материала, даже небольшая внутренняя несплошность может стать причиной роста усталостной трещины и привести к разрушению детали. Гранулируемые сплавы превосходят деформируемые по эксплуатационным характеристикам и допускают меньше типичных металлургических дефектов (например «корону») [1]. Тем не менее, они не защищены от появления неметаллических включений и других дефектов. В соответствии с рекомендательным циркуляром [2], основным рекомендуемым подходом для подтверждения того, что диски не разрушатся из-за дефектов в материале, является «вероятностная оценка риска допустимости повреждений», для этого необходимы оценки ожидаемого количества металлургических дефектов различного размера в материале детали.

Оценка дефектности. Завышение или занижение дефектности оказывает прямое воздействие на расчетный ресурс детали и эксплуатационные издержки. Ошибки при оценке дефектности материала основных деталей ГТД из гранулируемых сплавов могут привести к серьезным последствиям, к примеру разрушениям дисков турбин Pratt & Whitney (2020, 2022), что повлекло многомиллиардные убытки и массовый простой самолетов [3]. В связи с этим, необходим единый метод, обеспечивающий проведение достоверной и объективной оценки дефектности.

Количественная оценка дефектов предъявляет требования к объему и качеству первичной информации о включениях и порах. Информация представляется в виде распределений по размерам и частотам появления дефектов.

Агентством по авиационной безопасности Европейского союза разработан сертификационный меморандум [4], который предлагает следующие способы сбора количественной информации о дефектах в никелевых гранулируемых сплавах: металлографическое исследование шлифов, испытания на растяжение больших прутков и последующая фрактография, фрактографические исследования после МЦУ, разделение гранул в тяжелой жидкости, растворение в кислоте, вскрытие дефектов, обнаруженных при исследовании ультразвуковым методом.

Каждый из перечисленных методов работает в ограниченном диапазоне размеров обнаруживаемых дефектов. Вследствие чего, для построения полноценного графика распределения размеров и частот появления дефектов необходимо применение комбинации нескольких методов.

Проблемы методов сбора первичной информации. Методы разделения гранул в тяжелой жидкости не учитывает деформацию заготовки и таким образом, может быть использован только для материалов для прямого ГИП. При растворении в кислоте применяются кислоты, которые растворяют металл, но не керамику, и применять данный способ затруднительно на материалах, содержащих вольфрам. В обоих случаях невозможно оценивать поры.

Металлография ограничена по максимальному размеру выявляемого дефекта (до 60–70 мкм), и необходимый объем исследований для получения объективной оценки должен быть существенно больше 100 см² шлифов. Из-за резкого снижения количества дефектов с увеличением их размера, даже незначительное увеличение требуемого диапазона размеров дефектов приведет к необходимости кратного увеличения площади исследуемых шлифов и соответствующему увеличению трудоемкости.

Фрактография образцов после испытаний на МЦУ позволяет оценить диапазон размеров дефектов 60–160 мкм, однако исследуется преимущественно наибольший дефект в каждом образце, что создает специфические задачи для интерпретации данных. Традиционные подходы требуют корректировок, чтобы учитывать различия в локализации и ориентации дефектов.

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. Однако разработаны и опробованы способы повышения чувствительности контроля (плоскодонный отражатель диаметром 0,2 мм), а также контроль продольными волнами, вводимыми под углом к поверхности, что, с соответствующими ограничениями, позволяет проводить оценку дефектности в диапазоне размеров более 160 мкм.

Помимо рекомендованных в работе [4] способов, рассмотрена рентгеновская компьютерная томография, которая перспективно перекрывает диапазон размеров 40–160 мкм. Однако по результатам исследований установлено, что дефекты при использовании РКТ для оценки дефектности гранульных сплавов необходимо искать и образмеривать вручную. Единая методики оценки

и расшифровки в настоящее время отсутствует, из-за чего перед использованием РКТ необходимо разработать методику такой оценки.

Заключение. На основании проведенного обзора методов получения первичной информации и возможных путей их развития сделан вывод, что для получения объективной и воспроизводимой количественной оценки рекомендуется комбинировать металлографическое исследование шлифов, испытания на МЦУ с последующей фрактографией и вскрытие дефектов после УЗК. Возможно использование РКТ как замены фрактографии после разработки единой методики оценки. Для использования вышеуказанных подходов требуется совершенствование математических методов обработки результатов.

Список источников

- [1] National Transportation Safety Board. Aircraft accident report. URL: <https://www.nts.gov> (accessed 23.01.2026).
- [2] РЦ-АП-33.70-2. *Методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах*. Рекомендательный циркуляр АР МАК, 2023.
- [3] 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> (accessed 23.01.2026).
- [4] The integrity of nickel powder metallurgy rotating critical parts for gas turbines: Certification Memorandum. EASA Proposed CM No.: Proposed CM-PIFS-013 Issue 01. European Union Aviation Safety Agency, 2017, pp. 1–11.