DOI: 10.24892/RIJIE/20260312

Анализ распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей авиационных двигателей*

Яковлев М.Г., Ширваньянц Г.Г., Газина П.А.
Филиал АО «ОДК» «НИИД».
г. Москва, Российская Федерация
m.yakovlev@uecrus.com, g.shirvanyanc@uecrus.com, p.gazina@uecrus.com

Аннотация. **Разрушение деталей авиационных газотурбинных двигателей от многоцикловой усталости является доминирующим фактором экономических потерь при эксплуатации авиационной техники.**

В работе представлены результаты межлабораторного исследования в рамках выполнения НИР по теме «Исследование влияния способов поверхностного упрочнения и контроль остаточных напряжений на деталях ГТД». Участниками исследования были 10 организаций входящих в структуру АО «ОДК» и 8 внешний организаций. Для исследования филиалом АО «ОДК» «НИИД» («Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей») была изготовлена партия образцов по принципу «Один материал, одна геометрия, одна технология изготовления». На основании собранных данных оценили повторяемость и воспроизводимость результатов измерений конкретным методом, а также сравнили результаты измерений остаточных напряжений, полученные разными методами. В настоящей работе рассматривается анализ полученных результатов измерений остаточных напряжений следующими методами: методом Давиденкова-Биргера и методом дифракции рентгеновских лучей.

Целями данного межлабораторного исследования являлась оценка возможностей отечественных предприятий и научных организаций в части контроля остаточных напряжений и оценка компетентности заводских и научно-исследовательских лабораторий на основе анализа результатов типовых измерений остаточных напряжений.

***Ключевые слова*: поверхностные остаточные напряжения, метод Давиденкова-Биргера, метод дифракции рентгеновских лучей.**

Введение

Повышение требований к эксплуатационным характеристикам, экономичности и надежности авиационных двигателей создает порой неразрешимые сложности при выборе материалов и разработке технологических процессов изготовления из этих материалов, наиболее нагруженных деталей - вентилятора, компрессора и турбины, прежде всего лопаток и дисков. Решить данную проблему можно только с использованием комплексного подхода, включающего с себя разработку новых материалов, совершенствование применяемых и разработку новых технологических способов изготовления деталей и способов обеспечения качества деталей, в том числе упрочнения и модифицирования их поверхностного слоя. Общая тенденция в авиационном двигателестроении остается неизменной - на первом месте находятся проблемы снижения затрат на производство и эксплуатацию двигателей при снижении их массы и повышении рабочих характеристик. Основные требования к двигателям новых поколений: уменьшение массы двигателя в 1,5...2 раза, удельного расхода топлива - на 15...30 %; повышение надежности на 60...80 %; обеспечение ресурса двигателя, соответствующего 0,5...1 ресурса фюзеляжа.

Одним из успешно применяемых в двигателестроении подходом повышения надежности, в т.ч. ресурса изделий является применение поверхностного упрочнения их деталей [1-4].

Существуют методы упрочнения, основанные на поверхностном пластическом деформировании (ППД), в результате которого, в поверхностном слое детали возникают сжимающие остаточные напряжения. Наличие в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений обусловливает повышение трещиностойкости и, соответственно, повышение сопротивления усталости элементов конструкций, т.к. зарождение и развитие трещин происходит с поверхности детали, испытывающей растягивающие напряжения при эксплуатационном циклическом нагружении.

Трещины усталости возникают обычно в зонах конструктивных концентратов напряжения, на участках поверхности деталей со следами грубой механической обработки, а также в зонах эксплуатационных повреждений (забоины, царапины), возникающих при попадании в двигатель посторонних предметов (песок, камни, птицы).

Повреждения лопаток и других деталей двигателя попадающимися в газовоздушный тракт двигателя посторонними предметами, фреттингом или коррозией могут инициировать усталостные разрушения и обуславливают необходимость проведения дорогостоящих инспекций, ремонтных работ и досрочного съема двигателя с крыла.

Другим основным подходом обеспечения надежности, в т.ч. ресурса газотурбинных двигателей является контроль поверхностных остаточных напряжений (ПОН) в процессе производства. Если не для всех деталей ГТД существует

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

необходимость в наличии сжимающих ПОН в поверхностном слое, например, для деталей, работающих при высоких температурах, то практически для всех деталей ГТД, испытывающих нагрузки, необходимо при изготовлении обеспечивать отсутствие растягивающих ПОН.

Контроль ПОН может осуществляться разрушающими и неразрушающими методами. Однако проанализировать распределение ПОН по глубине поверхностного слоя возможно только разрушающими методами.

В отечественном авиадвигателестроении применяются: разрушающий метод – измерения деформации в процессе электрохимического стравливания поверхностного слоя металла образца, вырезанного из детали (метод ак. Н.Н. Давиденкова – И.А. Биргера (далее – Н.Н. Давиденкова) и неразрушающий метод - рентгеновской дифракции [5-8]. Рентгеновский метод является неразрушающим в пределах до 5-20 мкм от поверхности (глубина проникновения рентгеновских лучей) в зависимости от материала объекта. Для построения эпюры распределения ПОН до глубины их фактического залегания необходимо производить послойное непрерывное травление металла, что переводит метод в разряд разрушающих.

Отраслевой нормативной базы на неразрушающий метод - рентгеновской дифракции с применением современных рентгеновских дифрактомеров в России нет.

Единственным документом в России, устанавливающим нормы на ПОН в лопатках и дисках ГТД является «Руководство по нормированию ПОН», «ЦИАМ», 1973 г. [9]. Оно до сих пор актуально и применяется в двигателестроительной отрасли, поскольку излагает в себе подходы, основывающиеся на устоявшихся методах статистической обработки результатов измерений. Необходима актуализация Руководства лишь в части адаптации к современным электронно-вычислительным возможностям.

Единственным нормативным документом, регламентирующим порядок определения ПОН разрушающим методом Давиденкова является Руководящий технический материал – РТМ 1.4.971-81 «Определение остаточных напряжений в поверхностном слое различных элементов лопаток и дисков ГТД», НИАТ, 1981г. [10]. Данный РТМ также требует актуализации и адаптации к современным средствам контроля.

Методы определения поверхностного остаточного напряжения.

Существующие экспериментальные методы определения ПОН делятся на разрушающие, повреждающие и неразрушающие.

Разрушающие методы:

- метод Н.Н. Давиденкова, который наиболее распространен на отечественных предприятиях отрасли;
- рентгеновский метод - с послойным травлением, который применяется для построения эпюры ПОН по глубине.

Повреждающие (механические) методы:

- метод вдавливания – для него не требуется подготовка образцов, возможно применение в полевых условиях, не нарушает физические свойства исследуемых объектов, а также возможность проведения исследований в сварных швах. К недостаткам можно отнести незначительное повреждение поверхности детали, т.е. невозможность использования метода на особо точных деталях двигателя;
- метод сверления – получил наибольшее распространение из-за высверливания на глубину до десятых долей мм, при наличии припусков повреждение устраняется при механической обработке детали. Широко распространен за рубежом. Сущность метода заключается в измерении деформации (тензорезисторы, спекл-интерферометрия) на исследуемой поверхности в процессе сверления отверстия в глубину с пересчетом получаемой информации в напряжения;
- метод надреза (slitting) – тонкой фрезой с измерением глубины надреза с большой точностью – аналогичен методу сверления.

Для методов сверления и надреза отмечено влияние дополнительных ПОН, образующихся при сверлении и надрезе.

В отечественном двигателестроении, из перечисленных выше разрушающих методов, наиболее широко применяется метод Н.Н. Давиденкова.

Общий принцип определения остаточных напряжений этим методом предполагает вырезку образца из детали и удаление послойно материала образца с помощью травления, а также расчет действующих на поверхности раздела напряжений по перемещениям или деформациям оставшейся части тела.

В основном используются расчеты по упрощенным формулам без учета факторов, существенно влияющих на величину остаточных напряжений. При этом на геометрические параметры исследуемого образца, его форму, во многих случаях накладываются ограничения (сложная форма заменяется простой).

Продолжаются работы по совершенствованию метода и внедрению на предприятиях отрасли (филиал АО «ОДК» «НИИД», НИАТ, Рыбинский университет, НИ ИрГТУ и ОАО "Корпорация "Иркут" и др.).

Достоинством метода является - результат в виде эпюры распределения ОН по глубине, отсутствие зависимости от структурного состояния материала (крупнозернистость и пр.). К недостаткам можно отнести – значительную трудоемкость, методологические проблемы с вырезкой и травлением образца, отсутствие возможности локальных измерений, а также ограничение по возможности производить измерения ПОН на расстоянии первых 5 мкм от поверхности.

Для метода Н.Н. Давиденкова в России используются в основном аппараты из серии разработки филиала АО «ОДК» «НИИД» – ПОВКОН-Тензор, МерКулОН «Тензор» (рис. 1), разработки Рыбинского государственного университета - АСБ-1, а также Иркутского технологического университета – УДИОН-2 и др.

Автоматизированный комплекс контроля ПОН методом Давиденкова – МерКулОН «Тензор-3», разработанный в филиале АО «ОДК» «НИИД», является единственным в РФ сертифицированным (№ 26030 RU.E.28.003.A) Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, зарегистрированным в Государственном реестре средств измерений под № 33350-06 и допущенным к применению в Российской Федерации.

Зарубежных аналогов в публикациях последнего времени не обнаружено.

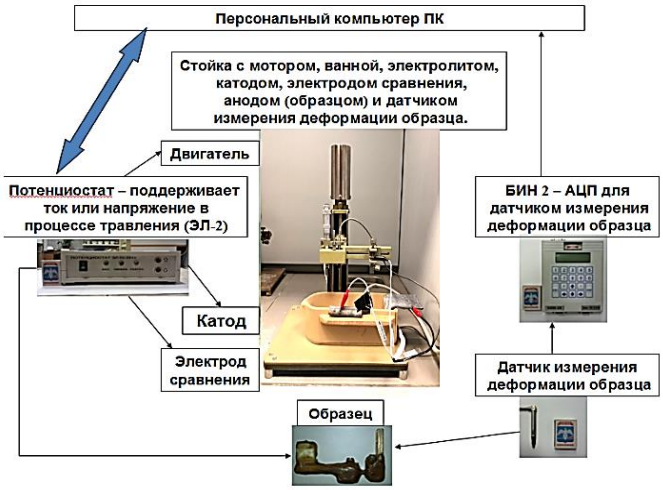

Рис. 1. Автоматизированный комплекс контроля ПОН методом Давиденкова – МерКулОН «Тензор-3», разработанный в филиале АО «ОДК» «НИИД»

Неразрушающие методы: методы, позволяющие без разрушения детали строить эпюры ПОН по глубине (шумы Баркгаузена, лазерно-ультразвуковой метод, электромагнитный метод, акустический метод, вихретоковый метод, метод резистометрии) [11-17].

Метод резистометрии, основанный на явлении скин-эффекта – метод АФЧХ (амплитудно-фазо-частотной характеристики). Метод АФЧХ является относительно новой разработкой, основанный на измерении эффективного удельного сопротивления (ЭУС) электроконтактным методом на аппаратуре СИТОН (скан-идентификатор технологических остаточных напряжений).

Для проведения измерений величины остаточных напряжений для этих методов требуется проведение калибровки, т.е. установление корреляционных зависимостей между измеряемым параметром среды (сопротивлением, скоростью звука и т.д.) и остаточными напряжениями в МПа. Их применение пока не выходит из области экспериментов.

Наиболее востребованными являются методы с получением эпюры распределения ПОН без повреждения объекта, такие как:

- метод акустоупргости с использованием лазерных источников ультразвука;
- электромагнитный метод (вихретоковый дефектоскоп Вектор-50);
- экспериментально-расчетный метод определения остаточных напряжений в изделиях из металлов и сплавов, основанный на измерении эффективного удельного сопротивления электроконтактным методом (аппарат СИТОН).
- метод нейтронной дифрактометрии - позволяет получать результат на глубине больше 200 мкм, что сильно ограничивает область его применения.

К недостаткам метода применительно к авиадвигателестроению следует отнести использование метода для исследования массивных материалов и изделий, большой размер коллиматора (от 0,5-1 мм до нескольких см), а также необходимость доставки объектов исследования на стационарную установку (ядерный реактор).

Для метода нейтронографии в России имеется нейтронный Фурье - дифрактометр высокого разрешения ФДВР на импульсном реакторе ИБР-2 (г. Дубна).

Рентгенографические методы – наиболее распространены в мире и на предприятиях отрасли в России (метод $Sin^2\ \psi$, метод обратной съемки (cos α).

Из всех методов определения ПОН за рубежом используют рентгеновский метод $Sin^2\ \psi$. Метод неразрушающий в пределах до 5-20 мкм от поверхности в зависимости от материала объекта. При этом выдается усредненное значение ПОН по глубине. Для построения эпюры распределения ПОН по глубине необходимо производить послойное травление, что вносит дополнительные ограничения на получение результатов. При этом он переходит в разряд разрушающих методов.

Достоинствами метода являются: высокая производительность; широкие возможности по измерению ПОН в труднодоступных местах; высокая локальность, определяемая площадкой "освещаемой" рентгеновским лучом и глубиной проникновения рентгеновского излучения, на которых происходит усреднение деформации.

Деформация определяется не параллельно поверхности, а под некоторым углом к нормали, лежащим обычно в интервале $0° \leq \psi \leq 60°$, что позволяет определять напряжение на поверхности без знания межплоскостного расстояния неискаженного материала и в произвольном направлении φ.

Имеется возможность определения полного тензора деформаций в случае, когда известны точные значения периодов решетки в ненапряженном состоянии.

Для рентгеновского метода $Sin^2\ \Psi$ в России используются дифрактометры общего назначения типа ДРОН. Поскольку они не специализированы для измерений ПОН, то устройство их гониометра не позволяет анализировать детали сложной формы в труднодоступных местах. Рентгеновских анализаторов ПОН у нас в стране не производят. В России наиболее распространены для рентгеновского метода $Sin^2\ \Psi$ рентгеновские анализаторы остаточных напряжений Xstress 3000 G3R фирмы «Stresstechgroup» (Финляндия) и роботизированный лабораторный дифрактометр для определения остаточных напряжений GNR StressX фирмы GNR Analytical Instruments (Италия).

Основные отличия рентгеновского анализатора остаточных напряжений GNR StressX (Италия) от других анализаторов напряжений следующие.

Дифрактометр имеет высокоэффективный детектор, который позволяет использовать компактную измерительную головку и работать на большом расстоянии от исследуемого объекта, а также с изменением диапазона и асимметрии углов сканирования.

Имеется возможность проводить неразрушающий контроль в труднодоступных зонах деталей: пазы дисков, внутри отверстий различных диаметров, во впадинах резьбы, на рабочих поверхностях и во впадинах зубьев шестерен и т.д.

Прибор полностью автоматизирован и прост в работе. Исключает юстировку, что сокращает временные издержки в работе. Анализатор не подвержен перегреву даже при круглосуточной работе.

Имеется возможность получения тензора напряжений и использование его для верификации расчетов при математическом моделировании и расчета НДС деталей с учетом действия остаточных напряжений.

Кроме этих двух анализаторов для образцов и деталей с простой формой используют обычные дифрактометры фирм RIGAKU (Япония) и American Stress Technology (США).

Для рентгеновского метода Cos α используется аппарат для обратной съемки рентгеновский анализатор μ-X360s, Япония. В России аналога такого прибора нет.

К недостаткам рентгеновского метода следует отнести:
- снижение точности в случае существования неоднородности напряженного состояния по глубине слоя проникновения рентгеновских лучей;
- наличие ярко выраженной кристаллографической текстуры;
- неточность упругих постоянных (E, ν)), т.к. в создании дифракционной картины участвуют лишь определенным образом ориентированные кристаллы, обладающие упругой анизотропией, в отличие от механических методов, когда материал ведет себя как квазиизотропный.

Остальные методы или успешно применяются в местах их разработки или еще находятся в состоянии разработки.

Механические методы позволяют измерить только сумму главных напряжений, что сильно ограничивает их применение, в особенности для случаев, когда эти напряжения имеют разные знаки.

В этом смысле наиболее эффективным методом измерения остаточных напряжений является рентгеновский метод, который позволяет определить все компоненты тензора напряжений, не разрушая объекта исследований. Тем не менее, применять необходимо в том числе и метод Давиденкова, так как они дополняют друг друга в зоне до 5 мкм от поверхности, и в тех случаях, когда структура материала неблагоприятна для рентгеновского метода.

Межлабораторное исследование поверхностных остаточных напряжений

Целями исследования являются:
- оценка возможностей отечественных предприятий и научных организаций в части контроля ПОН;
- оценка компетентности заводских и научно-исследовательских лабораторий на основе анализа результатов типовых измерений ПОН;
- разработка мероприятий по повышению квалификации лабораторий-участников.

В рамках достижения этих целей в «НИИД» была изготовлена партия образцов по принципу «Один материал, одна геометрия, одна технология изготовления».

Далее указанные образцы рассылались организациям-участникам для проведения измерений ПОН. Каждая организация-участник должна была измерить ПОН заявленным методом и предоставить полученные результаты для формирования общей выборки.

На основании собранных результатов требовалось оценить повторяемость и воспроизводимость результатов измерений конкретным методом, а также сравнить результаты измерений ПОН, полученные разными методами.

В настоящем разделе представлен анализ полученных результатов измерений ПОН следующими методами:
- методом Давиденкова-Биргера;
- методом дифракции рентгеновских лучей;

Объектами исследований являлись образцы-пластинки из титанового сплава ВТ6 размерами 90,0×7,5×3,0 мм (рис. 2) изготовленные в «НИИД».

Рис. 2. Внешний вид образца-пластинки

Образцы вырезаны из прутка электроэрозионным методом проволокой, плоскости шириной 7,5 мм шлифованы. С целью снятия остаточных напряжений после шлифования образцы подвергнуты вакуумному неполному отжигу при температуре 630 °С в течение 2-х часов. Обе плоскости образцов шириной 7,5 мм и длиной 50 мм упрочнены стальными подшипниковыми шариками диаметром Ø 1,5 мм ультразвуковым методом. Концы образцов по 200 мм не упрочнены ввиду особенностей камеры обработки.

При обработке результатов измерений принято допущение о том, что значения ПОН на одинаковой глубине, измеренные на различных образцах, подчиняются нормальному закону распределения. Для каждого значения глубины вычислялись среднее арифметическое значение и среднее квадратическое (стандартное) отклонение (СКО) для ограниченной выборки.

Результаты обработки измерений ПОН, полученных методом Давиденкова-Биргера

На рис. 3-4 приведены эпюры распределения ПОН по глубине неупрочнённых и упрочнённых образцов, а также эпюра средних значений и границы интервалов.

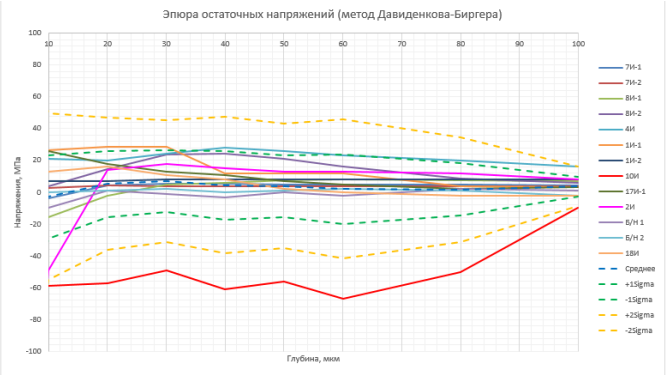

Рис. 3. Эпюра распределения ПОН по глубине в неупрочнённых образцах

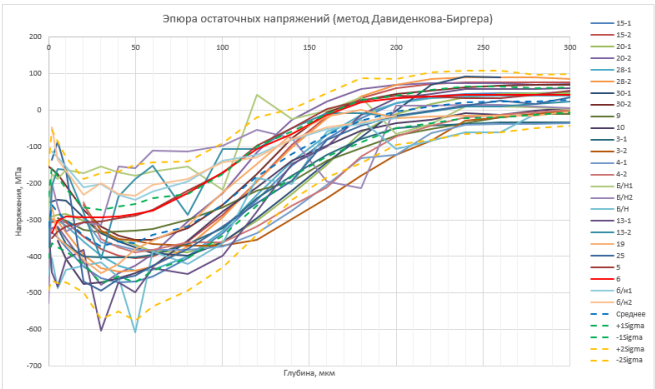

Рис. 4. Эпюра распределения ПОН по глубине в упрочнённых образцах

Результаты обработки измерений ПОН, полученных методом дифракции рентгеновских лучей

На рис. 5 приведены эпюры распределения поверхностных остаточных напряжений по глубине упрочнённых образцов, а также эпюра средних значений и границы интервалов.

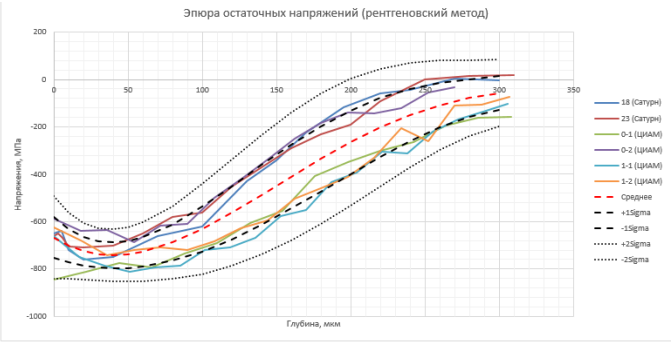

Рис. 5. Эпюра распределения ПОН по глубине в упрочнённых образцах

При обработке результатов измерений принято допущение о том, что значения остаточных напряжений на одинаковой глубине, измеренные на различных образцах, подчиняются нормальному закону распределения.

Предприятия, которые входят в состав Объединенной двигателестроительной корпорации, работают с двумя методами: метод Давиденкова-Биргера и рентгеновский метод контроля поверхностных остаточных напряжений.

Обработанные результаты измерений остаточных напряжений в упрочняющих образцах представлены на рис. 6.

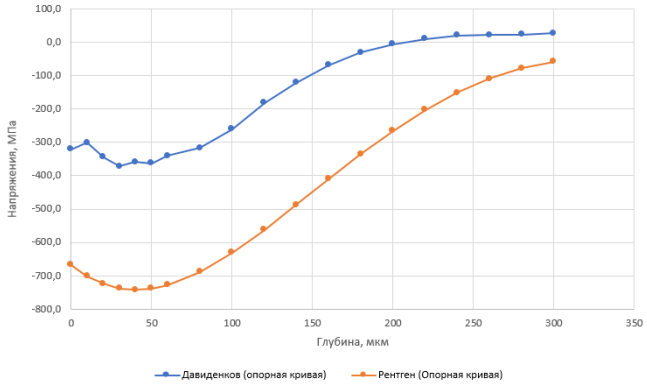

Рис. 6. Результаты измерений остаточных напряжений в упрочняющих образцах, проведенных методом Давиденкова-Биргера и рентгеновским

Заключение (Выводы)

По результатам проведенных исследований остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из титанового сплава ВТ6, упрочненных ультразвуковым методом, сделан ряд выводов, касающихся особенностей измерений остаточных напряжений различными методами.

1. Остаточные напряжения, определенные методом Давиденкова-Биргера и рентгеновским методом, в основном не выходят за пределы интервала ±2СКО (среднее квадратическое отклонение), что показывает определенную стабильность результатов определения ПОН в организациях-участниках. Более того, ПОН, полученные методом Давиденкова-Биргера в неупрочненных образцах, за редким исключением лежат в интервале ±1СКО.

2. Результатами исследований двух методов на образцах из титанового сплава ВТ6 показано, что рентгеновский метод дает значения ПОН, как минимум в два раза большие по сравнению с методом Давиденкова-Биргера, что следует учитывать при назначении норм на ПОН в конструкторской и технологической документации.

3. Остаточные напряжения, определенные методом Давиденкова-Биргера, имеют больший разброс значений ПОН. Объяснить это можно многими факторами:

- особенностью процесса упрочнения, приводящей к определенной шероховатости поверхности, которая влияет на процесс неравномерного стравливания поверхности;
- различными составами электролита, в котором происходило травление упрочненного поверхностного слоя образцов (у всех организаций-участников состав электролита разный, как по химическому составу, так и в количественном соотношении компонентов электролита);
- нестабильностью начальной фазы травления, в результате чего увеличивается дисперсия значений ПОН, ближайших к поверхности. На скорость травления, а, следовательно, и стабильность показаний прибора, влияет изменение потенциала поверхности в начальном этапе травления (0-5 мкм) из-за большой шероховатости поверхности (неравномерности, волнистости, дефекты и др.) или наводороживания образцов из титановых сплавов, вследствие адсорбции кислорода из электролита в момент включения тока травления.
- на отечественных установках измерения остаточных напряжений МерКулОн «Тензор-3» (разработанных в филиале АО «ОДК» «НИИД») вводится корректировка процесса травления с возможностью временного отключения и регулировки тока травления. Поэтому достаточно корректными следует считать результаты, полученные этим методом на глубине от поверхности 2-5 мкм и более.
- на разброс значений поверхностных остаточных напряжений также может влиять различная по длине область травления образца (в некоторых случаях образцы травились на части образца длиной 1 см), что обуславливается меньшим прогибом образца, и, возможно, неточностью показаний перемещений датчика;
- также на результат измеряемых ПОН влияет и метод обработки кривой деформирования, полученной в результате травления образца, сплайн-обработка которой может внести существенные коррективы в получаемую эпюру ПОН.
- учитывая перечисленные факторы, в дальнейшем при проведении перекрестных исследований ПОН необходимо четко прописать данные условия для достижения более точных результатов получения ПОН в организациях-участниках.

На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости систематического проведения межлабораторных сравнительных измерений остаточных напряжений среди предприятий авиадвигателестроительной отрасли и других заинтересованных научно-исследовательских лабораторий [18-20].

Литература

1. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

2. Сулима А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. М.: Машиностроение, 1996. – 279 с.

3. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

4. Дальский А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев, А.М. Дмитриев, А.Г. Колесников и др. – М.: Издательство МАИ, 2000. – 364 с.

5. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – Государственное научно-техническое издательство «Машиностроительная литература», 1963. – 223 с.

6. Технологические остаточные напряжения / Под ред. д.т.н. проф. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.

7. Ягодкин Ю.Д. Методы исследования состояния поверхностного слоя деталей двигателей летательных аппаратов. Учеб. пособие / Ю.Д. Ягодкин, М.В. Зверев, В.В. Шорин, В.А. Шулов. – М.: МАИ, 1987. – 87 с.

8. Яблокова Н.А. Анализ напряженно-деформированного состояния лопаток ГТД рентгеноструктурным и механическими методами // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Наука и образование. – 2011. – №1.

9. Руководство по нормированию остаточных напряжений. – ЦИАМ, 1973.

10. Руководящий технический материал – РТМ 1.4.971-81 «Определение остаточных напряжений в поверхностном слое различных элементов лопаток и дисков ГТД». – НИАТ, 1981. – 77 с.

11. ГОСТ Р 56664-2015 Контроль неразрушающий. Определение напряженного состояния материала изделий машиностроения методами акустоупругости. Общие требования.

12. ГОСТ Р 52731-2007 Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования.

13. Быченок В.А. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 7. – С. 45-50.

14. Валетов В.А. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов. Учеб. пособие / В.А. Валетов, С.Д. Васильков, А.Н. Сисюков, О.С. Юльметова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 92 с.

15. Васильков С.Д. Исследование остаточных напряжений резистивным электроконтактным методом / С.Д. Васильков, С.А. Тальнишних // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 8. – С. 30-33.

16. Улыбин А.В. Использование резистивного электроконтактного метода для контроля напряжённо-деформированного состояния элементов стальных конструкций / А.В. Улыбин, С.Д. Васильков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2006. – №6. – С. 155-160.

17. Антонов А.А. Возможности оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях / А.А. Антонов, А.П. Летуновский // В мире неразрушающего контроля. – 2018. – Т. 21, №1. – С. 10-13. – DOI: 10.12737/article_5aaf8356d7dbe1.54756766

18. Исследование влияния способов поверхностного упрочнения и контроль уровня остаточных напряжений на деталях ГТД: отчет о НИР. – Филиал АО «ОДК» «НИИД». – 99 с.

19. Формирование научно-методической и нормативной базы по обеспечению и контролю поверхностных остаточных напряжений (ПОН) в деталях ГТД: отчет о НИР. – ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». – 70 с.

20. Яковлев М.Г. Контроль поверхностных остаточных напряжений в деталях ГТД / М.Г. Яковлев, Г.Г. Ширваньянц, П.А. Газина // Инновационные технологии, оборудование и материалы машиностроительных производств (МашТех-2025). Том 2. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2025. – С.322-324.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260312

Analysis of the Distribution of Residual Stresses in the Surface Layer of Aircraft Engine Parts

Yakovlev M.G., Shirvanyants G.G., Gazina P.A.

Branch of JSC UEC NIID

Moscow, Russian Federation

m.yakovlev@uecrus.com, g.shirvanyanc@uecrus.com, p.gazina@uecrus.com

Abstract. **Failure of aircraft gas turbine engine components due to high-cycle fatigue is a dominant factor in economic losses during aviation equipment operation.**

We present the results of an interlaboratory study conducted as part of R&D work on the topic "Investigation of the influence of surface hardening methods and residual stress control on GTE components." The study involved 10 organizations within the structure of United Engine Corporation (UEC) and 8 external organizations. For the study, a batch of specimens was manufactured by the UEC branch "NIID" (Scientific Research Institute of Technology and Organization of Engine Production) following the principle of "One material, one geometry, one manufacturing technology." Based on the collected data, the repeatability and reproducibility of measurement results for each specific method were assessed, and the results of residual stress measurements obtained by different methods were compared. This article analyzes the results of residual stress measurements obtained by the following methods: the Davidenkov-Birger method and X-ray diffraction (XRD).

The objectives of this interlaboratory study were to assess the capabilities of domestic enterprises and research organizations in the field of residual stress control and to evaluate the competency of industrial and research laboratories based on the analysis of results from standard residual stress measurements.

Keywords: surface residual stresses, Davidenkov-Birger method, X-ray diffraction method.