

- электролитов на основе метакрилового сополимера // Высокомолекулярные соединения. - 2005. - Т. 47. - № 11. - С. 56 – 61
7. Горюшкин В.Ф., Бендре Ю.В. др. Особенности коррозионной стойкости технически чистого титана ВТ1-0 после комплексного электровзрывного легирования и последующей электронно-пучковой обработки // Вестник ТГУ. – 2013. - Т18. - №4. – С.1739-1740
 8. Иванов Ю.Ф., Кобзарева Т.Ю. и др. Модификация структуры и свойств поверхностного слоя сплава ВТ6 электровзрывным легированием и электронно-пучковой обработкой. – 2014. – С.213-216
 9. Иванов Ю.Ф. Закономерности и механизмы формирования нано- и субмикроструктурной многофазной структуры в поверхностных слоях металлов и сплавов при импульсной электронно-пучковой обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2008. - №1. – С.47-52

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

М.В. БУРКОВ^{1,2}, В.А. НАГИБИН¹

¹Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: burkovispms@mail.ru

STUDY OF STRAIN FOLDS FORMATION PROCESSES DURING CYCLIC LOADING OF ALUMINUM SPECIMENS

M.V. BURKOV^{1,2}, V.A. NAGIBIN¹

¹Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science

E-mail: burkovispms@mail.ru

***Abstract.** The formation of strain texture on aluminum specimen during cyclic tension was investigated. In order to study the differences of strain texture of solid material and thin foil, the images of both specimen's surface and aluminum foil adhesively bonded to the specimen were evaluated. The images were captured using microscope equipped with digital camera and numerically evaluated using set of informative parameters. The informative parameters and their behavior throughout cyclic tests are being analyzed and discussed.*

Введение

Усталостное разрушение является одной из главных причин выхода из строя высоконагруженных конструкций в различных отраслях промышленности: авиации, судостроении, нефтехимии и др. При этом во многих отраслях разрушение может приводить к аварийным ситуациям и катастрофам. Избежать его можно, своевременно обнаружив дефект или повреждение средствами неразрушающего контроля (НК) и проведя ремонт [1]. Существует множество методов НК, обладающих различным диапазоном применимости, чувствительностью и достоверностью контроля. Однако статистика НК свидетельствует о том, что в подавляющем количестве обследованных деталей (более 90-95 %) дефекты не обнаруживаются и конструкция может продолжать эксплуатироваться. Кроме того для проведения контроля часто требуется остановка эксплуатации, что часто требует дополнительных затрат или про-

сто ведет к простому техник. Таким образом, сегодня концепция планового контроля с четко определенными интервалами начинает вытесняться другим подходом, в литературе называемым Condition Based Monitoring, т.е. контролю по состоянию конструкции. Однако для успешной реализации данного подхода требуется дополнительная информация об условиях и нагрузках, в которых работает конструкция. Так новые промышленные объекты, здания, мосты часто оснащаются сетью распределенных датчиков (тензорезисторов, термометров, акселерометров и др.), что позволяет получать полную картину о нагружении и судить об остаточном ресурсе и необходимости либо полномасштабного контроля, либо ремонта.

Таким образом, данные системы позволяют вести встроенный контроль механического состояния (Structural Health Monitoring). Однако во многих отраслях, например, в авиации, где очень жестко стоит проблема снижения массы летательных аппаратов и оборудования, такие системы находятся на этапе лабораторных исследований: необходимо разработать компактные датчики и систему регистрации информации, а также надежные алгоритмы обработки информации и принятия решения. При этом те преимущества, которые могут предоставлять такие системы значительно окупают все затраты, являясь источниками информации о наличии/возникновении повреждений и позволяя существенно повысить безопасность эксплуатации. Помимо этого можно будет расширить временные интервалы между точками плановой полномасштабной диагностики.

Одним из подходов к встроенному контролю деталей является оценка состояния материала с помощью датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ) [1]. Суть методики, основанной на использовании ДДИТ, заключается в оптическом наблюдении за поверхностью тонкой фольгой-датчиком, наклеенной на исследуемый материал. В процессе циклического деформирования на поверхности фольги образуется деформационный рельеф, регистрируемый видеодатчиком. Его количественная оценка позволяет анализировать наработку материала и его текущее состояние. Так, например, К. Паже из Европейского авиастроительного концерна «Эйрбас» в [2] обсуждает применение ДДИТ в авиастроении. Автор рассматривает датчики на основе тонких пленок, области их применения, устанавливает требования к функциям датчиков и эксплуатационным условиям окружающей среды, обсуждаются испытания на надежность, необходимые для соответствия требованиям авиационной отрасли.

Однако для достоверной оценки рельефа на данных датчиках необходимо изучить особенности и закономерности его формирования, а также разработать информативные параметры для получения количественной оценки. В работе была поставлена задача: испытать образцы технически чистого алюминия на одноосное циклическое растяжение, в процессе которого зарегистрировать и проанализировать изменение рельефа на поверхности материала и на фольге высокочистого алюминия А99999, наклеенной на поверхность.

Материал и методика исследований

Для определения предела прочности образцов технически чистого алюминия А1 провели испытание на статическое растяжение на электромеханической испытательной машине Instron 5582. На Рис. 1 представлен чертеж образцов, испытанных в данной работе.

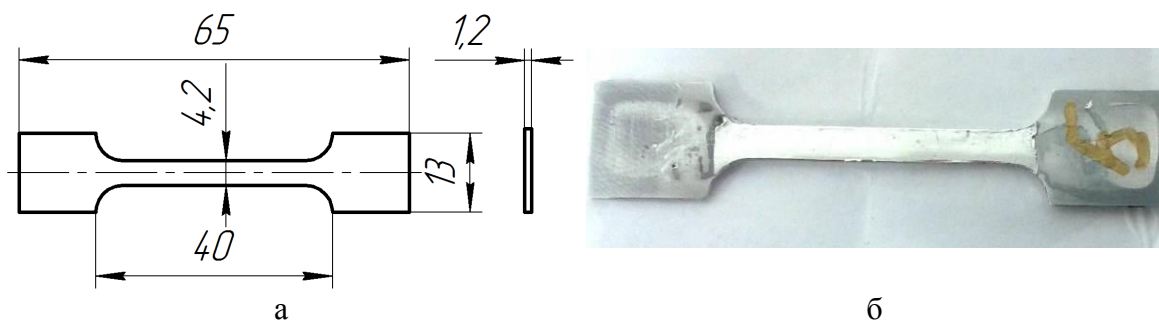


Рисунок 1 - Чертеж образца технически чистого алюминия А1 для испытаний (а) и фотография образца (б)

Для испытаний на циклическое одноосное растяжение использовали сервогидравлическую испытательную машину BiSS 00-201, оснащенную гидравлическими захватами. На основании данных, полученных при статических испытаниях были получены следующие механические характеристики алюминиевого сплава А1 ($\sigma_b=88,3$ МПа, $\sigma_{\text{тц}} \approx 69,5$ МПа) и рассчитаны параметры циклического нагружения. Синусоидальное циклическое нагружение с частотой 10 Гц и асимметрией цикла $R=0,1$ начинали с величины максимальной нагрузки нагрузки цикла $\sigma_{\text{max}}=0,6 \cdot \sigma_b$, далее повышая ее согласно методике, которая будет описана ниже. Для регистрации изображений образца использовали микроскоп Альтами MB0670 с цифровой камерой Basler piA2400-17gc с максимальным разрешением изображений 2454x2056. Освещение осуществлялось с помощью бокового светоделительного ввода, в качестве источника использован светодиодный осветитель.

Для анализа изображений рельефа рассчитывали следующие информативные параметры: среднеквадратичная ошибка (Mean square error – MSE), информационная энтропия (Shannon entropy – H), фрактальная размерность (Fractal dimension – D_f). Параметр MSE может быть рассчитан только по паре изображений, в то время как для вычисления двух остальных достаточно одного текущего изображения. Более подробно методики расчета каждого из них представлены в работах [2,3].

Результаты и обсуждение

Циклические испытания проводили по следующей схеме: включали фотографирование поверхности образца и записывали изображение исходного состояния, далее запускали циклическое нагружение и после наработки 500 циклов визуально контролировали состояние фольги на предмет появления деформационных складок и регистрировали цифровое изображение. Циклическое нагружение с величиной $\sigma_{\text{max}}=0,6 \cdot \sigma_b$ было выбрано в качестве начального, далее после наработки в 1000 циклов при отсутствии признаков появления деформационного рельефа увеличивали верхнюю нагрузку на $0,05 \cdot \sigma_b$. Графически данная схема нагружения приведена на рис. 2. Обнаружено, что деформационный рельеф начинает образовываться при верхней нагрузке циклического нагружения, соответствующей $0,8 \cdot \sigma_b$. После повышения верхней нагрузки цикла до данного значения изображения регистрировали каждую 1000 циклов, по достижению которых нагружение останавливалось, устанавливалась нагрузка $0,1 \cdot \sigma_{\text{min}}$ (рассчитанная для начального значения $0,6 \cdot \sigma_b$). Это было необходимо для того, чтобы обеспечить постоянство положения образца при фотографировании для последующего расчета информативных параметров.

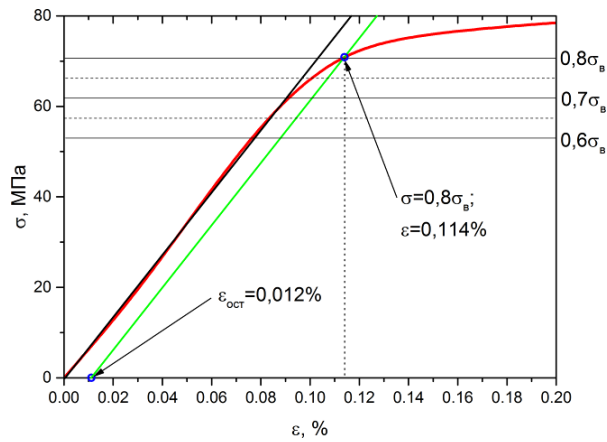


Рисунок 2 - Теоретически рассчитанная схема нагружения образца алюминиевого сплава А1

Из Рис. 2 видно, что при нагружении образца до величины растягивающих напряжений равных $0,8 \cdot \sigma_b$ после разгрузки образца будут наблюдаться остаточные пластические деформации величиной $\epsilon_{ост} \sim 0,012\%$. Данная диаграмма была рассчитана теоретически на основании известных механических характеристик данного сплава и достаточно хорошо соответствует экспериментальным наблюдениям отмеченным выше: так при нагружении с верхней нагрузкой цикла $0,8 \cdot \sigma_b$ рельеф стабильно формируется, в то время как при циклическом нагружении с нагрузкой $0,75 \cdot \sigma_b$ никаких изменений поверхности не наблюдается, т.к. при данной нагрузке образец деформируется упруго.

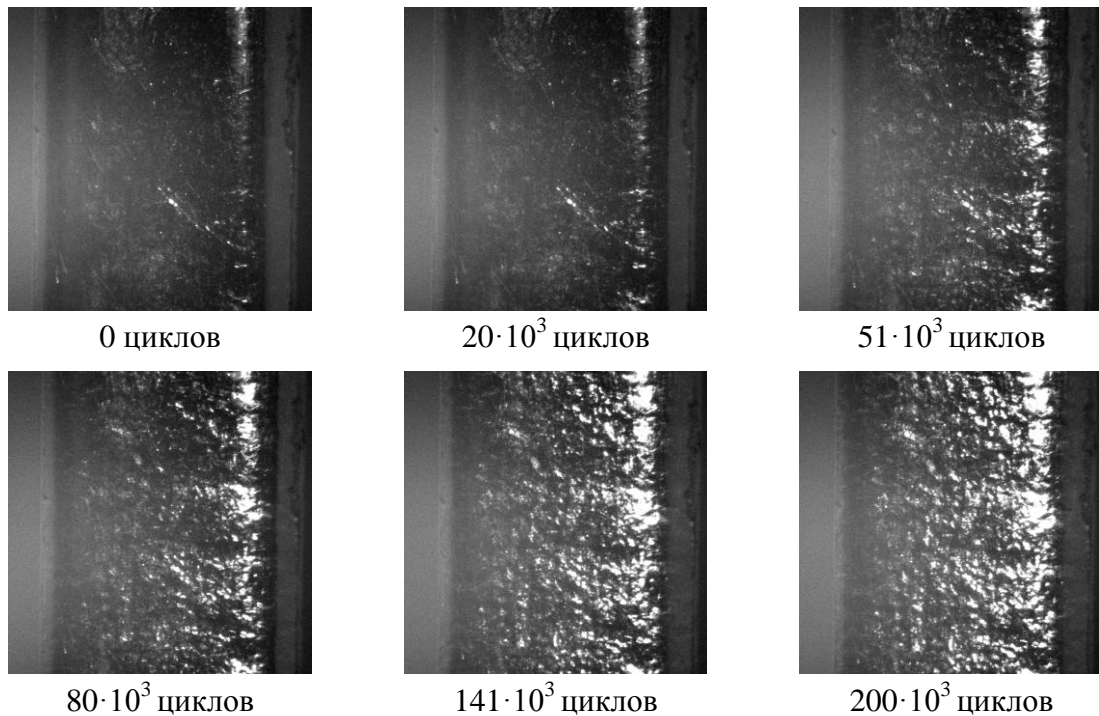


Рисунок 3 - Фотографии рельефа на поверхности образца в зависимости от наработки, циклов

На Рис. 3 показаны фотографии поверхности образца, на которых в процессе циклического нагружения можем наблюдать постепенный рост деформационного

рельефа. Образование рельефа на поверхности образца до $20 \cdot 10^3$ циклов не наблюдается в связи с тем, что до данной наработки верхняя нагрузка была ниже предела пропорциональности, а вся эта стадия нагружения является подготовительной. После увеличения верхней нагрузки цикла до $\sim 0,8 \cdot \sigma_b$ параметры испытания оставались постоянными до достижения предельной наработки 200 тыс. циклов, соответствующей среднецикловой усталости. В связи с очень высокой вязкостью данного сплава разрушения образцов по достижению данного значения не происходило, а испытания останавливались, прежде всего, в связи с неизменностью сформированного на поверхности рельефа.

На Рис. 4 показаны фотографии поверхности фольги, наклеенной на поверхность образца. Методика нагружения (подготовительная стадия и рабочий режим) была идентичной той, что использовалась для образца без фольги. Можно наблюдать, что в данном случае деформационный рельеф растет быстрее, чем для образца на Рис. 3.

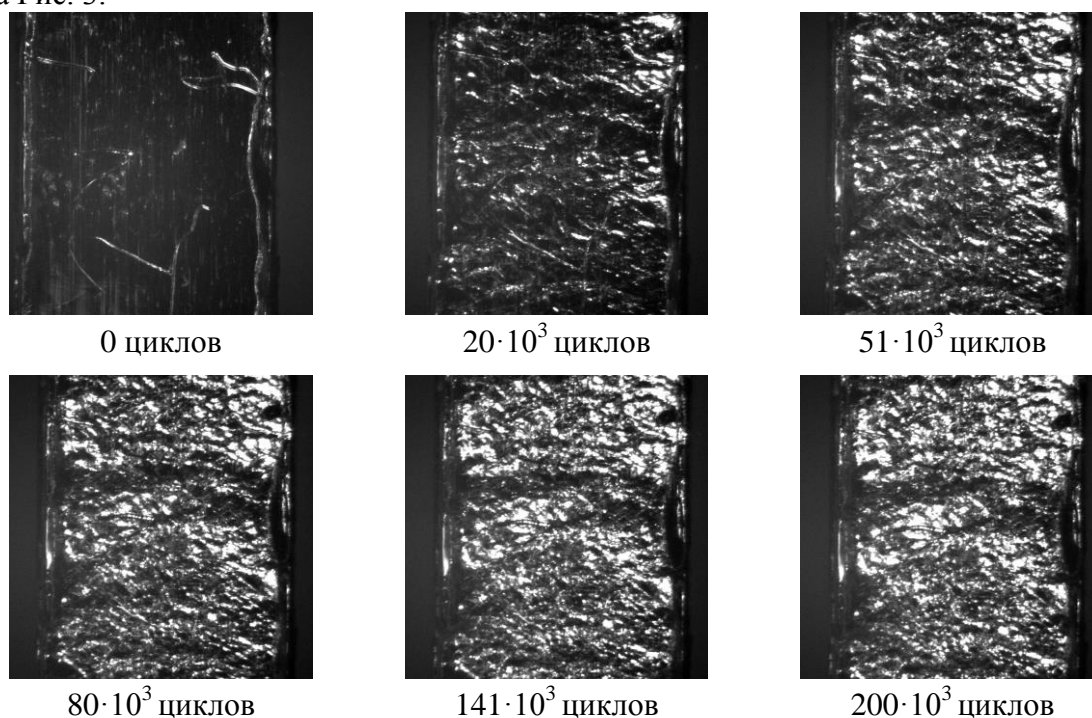


Рисунок 4 - Фотографии рельефа фольги, наклеенной на поверхности образца в зависимости от наработки, циклов

Это связано наиболее вероятно с тем, что тонкая фольга подвергается большим пластическим деформациям, нежели объемный образец. Если сравнивать результаты, полученные для двух экспериментов, можно заключить, что качественно рельеф отличается для этих двух случаев. Так в первом (Рис. 3) рельеф на изображении имеет «точечный» вид с разупорядоченным характером, напоминающим «апельсиновую кожуру». В то время как на поверхности фольги (Рис. 4) наблюдается более упорядоченный тип рельефа, в котором можно обнаружить складки, ориентированные под углом близким к $40-45^\circ$, т.е. направления максимальных касательных напряжений.

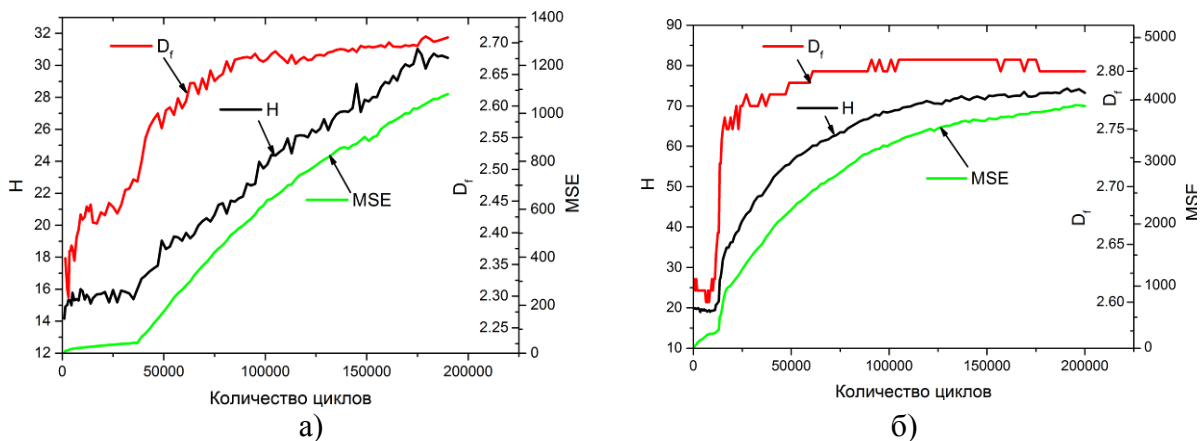


Рисунок 5 - Графики информативных параметров, рассчитанных для изображений рельефа поверхности образца (а) и рельефа фольги (б)

Расчет информативных параметров (Рис. 5) также подтверждает выводы сделанные при качественном анализе цифровых изображений: т.е. рельеф на поверхности фольги формируется быстрее, чем на поверхности образца. Это заключение основывается на более быстром росте информативных параметров для второго образца (Рис. 5,б). Анализируя полученные данные можно выделить следующие особенности и закономерности:

- графики параметров MSE и H практически идентичны друг другу, имеют одинаковый характер изменения и относительные значения;

- фрактальная размерность, позволяющая оценить характер рельефа независимо от освещенности, меняется для обоих образцов отлично от параметров H и MSE характеризующих изменение яркости и среднеквадратичной ошибки между двумя изображениями, соответственно;

- при достижении величины наработки 100 и 150 тыс. циклов параметры ФР и MSE/H практически перестают меняться, что связано с неизменностью рельефа, сформировавшегося на поверхности фольги (Рис. 5,б);

- однако информативные параметры MSE/H для первого образца (Рис. 5,а) не свидетельствуют о постоянстве рельефа и продолжают изменяться вплоть до наработки в 200 тыс. циклов. Анализируя параметр ФР для данного образца, который после достижения наработки 125 тыс. циклов остается практически постоянным, можно заключить, что ФР более точно описывает наблюдающиеся на изображениях процессы – так визуально после наработки в 100 тыс. циклов рельеф практически не менялся.

Выводы

Проведены циклические испытания образцов алюминиевого сплава А1, в процессе которых оптическим способом регистрировали изображения поверхности и наклеенной на поверхность фольги. Выявлено, что при превышении предела пропорциональности при циклическом нагружении, после каждого цикла нагружения наблюдается остаточная пластическая деформация, приводящая к формированию деформационного рельефа. Обнаружено качественное отличие двух типов рельефа, формирующихся на поверхности образца и на фольге, а также разная скорость его образования.

Список литературы

1. Hellier, Chuck, Handbook of Nondestructive Evaluation, (2001) McGraw-Hill Professional, New York, USA.
2. Паже К. Применение датчиков на основе тонких металлических пленок для контроля целостности конструкций воздушных судов // Физическая мезомеханика. — 2007. — Т. 10, № 6. — С. 43-48.
3. Панин С.В., Любутин П.С., Бурков М.В., Алтухов Ю.А., Хижняк С.А., Кузнецов В.П. Исследование различных критериев оценки серии оптических изображений в методе датчика деформации интегрального типа // Вычислительные технологии. – 2014. – Т. 19. – №3. – С. 103-118.
4. Mikhail Burkov, Sergey Panin, Pavel Lyubutin, Alexander Eremin, Pavlo Maruschak, Abdellah Menou, Aluminum Foil Based Fatigue Sensor for Structural Health Monitoring of Carbon Fiber Composites // Procedia Technology (8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2014, 9-10 October 2014, Tirgu Mures, Romania) – V. 19 – 2015 – P. 307–312.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23

А.С.СМИРНОВА^{1,2}, А.В.ГОРБУНОВ², А.Г.МАЛИКОВ³, В.Е.ПАНИН^{1,2}, Ю.И.ПОЧИВАЛОВ¹,
А.М.ОРИШИЧ³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

³Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

E-mail: nasO@mail2000.ru

THE INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY WELDED JOINTS

A. S. SMIRNOVA^{1,2}, A. V. GORBUNOV², V. E. PANIN^{1,2}, Y. I. POCHIVALOV², A. G. MALIKOV³, A. M. ORISHICH³

¹ National Research Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

³Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

E-mail: nasO@mail2000.ru

Abstract. The structure and mechanical properties of welded joints of VT23 titanium alloy received by method of laser welding with the subsequent thermomechanical treatment (TMP1 and TMP2) including ultrasonic mechanical forging were investigated. The results showed that the fatigue life of welded joints in TMP2 multiply increases compared with fatigue life of the welded connection samples in the delivery. The structure of the welded joint formed by laser welding has a gradient highly non-equilibrium coarse-grained structure based on α -phase. The structure with a defect density monotonically decreases with increasing distance from the surface into the material. As follows from a presented data, the fatigue life of the VT23 titanium alloy has increased more than threefold.

Введение

Одним из главных требований, предъявляемых к конструкционным материалам, авиационной техники является обеспечение высоких значений их усталостной прочности и долговечности. Особую значимость это требование имеет применительно к сварным соединениям. На сегодняшний день одним из наиболее перспек-