

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ С ОТВЕРСТИЯМИ, ИМИТИРУЮЩИМИ ОТВЕРСТИЯ ПОД СТЯЖНЫЕ БОЛТЫ В ДИСКЕ ТУРБИНЫ ГТД

© 2011 В. С. Вакулук¹, В. А. Кирпичёв¹, В. Ф. Павлов¹, В. П. Сазанов²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²Волжское конструкторское бюро ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Самара

Исследованы остаточные напряжения в плоских образцах с отверстиями из сплавов ЭИ698ВД и ЭП742 после изготовления по существующей технологии и после ультразвукового упрочнения. Установлено, что ультразвуковое упрочнение приводит к созданию в поверхностном слое отверстий сжимающих остаточных напряжений значительной величины.

Образцы с отверстием, сплавы ЭИ698ВД и ЭП742, остаточные напряжения, ультразвуковое упрочнение.

Остаточные напряжения в плоских образцах с отверстиями из сплавов ЭИ698ВД и ЭП742, имитирующими отверстия под стяжные болты в дисках турбины ГТД, определялись по результатам исследования колец толщиной 1,8 мм, вырезанных из образцов на электроэрозионном станке специальным полым цилиндрическим электродом. Расчёт остаточных напряжений проводился по методике работы [1], причём дополнительные остаточные напряжения за счёт отделения кольца от образца полагали равными нулю, так как они не превышали 0,4 МПа.

Определялись окружные σ_θ остаточные напряжения в зоне отверстий диаметром 10 мм плоских образцов толщиной 5 мм (ЭИ698ВД) и 10 мм (ЭП742), обработанных по существующей технологии (без упрочнения) и на различных режимах ультразвукового упрочнения (УЗУ).

Образцы из сплава ЭИ698ВД. Режимы ультразвукового упрочнения плоских образцов толщиной 5 мм из сплава ЭИ698ВД приведены в табл. 1, где $d_{ш}$ – диаметр шариков, h – расстояние от образца до концентратора-наконечника, $\tau^{\text{т}}$ – время обработки.

Результаты определения остаточных напряжений в зоне отверстий, обработанных по существующей технологии (без упрочне-

ния), представлены на рис. 1, где показано поле рассеяния окружных σ_θ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a и средняя по восьми образцам эпюра напряжений. Можно видеть, что при обработке отверстий по существующей технологии в поверхностном слое создаются сжимающие остаточные напряжения величиной от -100 МПа до -300 МПа с глубиной залегания от 0,05 мм до 0,15 мм. Обращает на себя внимание значительное рассеяние остаточных напряжений, свойственное любой механической обработке, однако в этом случае обработки отверстий ни в одном из образцов не наблюдалось растягивающих остаточных напряжений.

На рис. 2 представлены осреднённые в каждом варианте по двум образцам эпюры остаточных напряжений в зоне отверстий образцов, обработанных УЗУ. Из данных рис. 2 следует, что УЗУ приводит к созданию в зоне отверстий значительных сжимающих остаточных напряжений (от -800 до -1300 МПа), величина и глубина залегания которых зависит от времени обработки τ и расстояния h между концентратором-наконечником установки и плоскостью образца. С увеличением времени обработки от 30 до 90с при неизменном $h = 6,5$ мм максимум остаточных напряжений увеличивается и смещается от поверхности отверстия. Одновременно увеличивается и толщина по-

верхностного слоя с сжимающими остаточными напряжениями от 0,15 до 0,2 мм, что может оказать существенное влияние на сопротивление усталости диска турбины ГТД [2]. Уменьшение расстояния h в рассмотренных пределах влечёт за собой снижение максимальных сжимающих остаточных напряжений.

Таблица 1. Режимы ультразвукового упрочнения образцов из сплава ЭИ698ВД

Вариант упрочнения	Режимы УЗУ		
	d_{ul} , мм	h , мм	τ , с
1	1,0	9,2	90
2	1,0	6,5	30
3	1,0	6,5	60
4	1,0	6,5	90
5	1,0	3,5	90

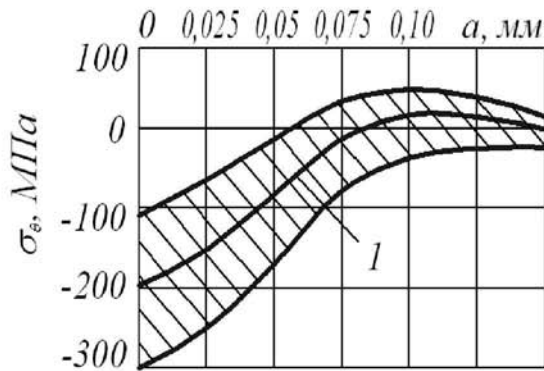


Рис. 1. Поле рассеяния окружных σ_θ остаточных напряжений в зоне отверстий образцов из сплава ЭИ698ВД, обработанных по существующей технологии: 1 – средняя эпюра напряжений

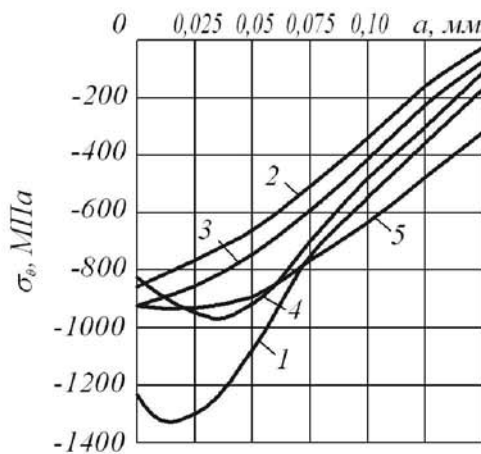


Рис. 2. Окружные σ_θ остаточные напряжения в зоне отверстий образцов из сплава ЭИ698ВД после УЗУ; номера эпюр соответствуют вариантам упрочнения табл. 1

Следует обратить внимание на тот факт, что при обработке УЗУ образцов с отверстием из сплава ЭИ698ВД рассеяние остаточных напряжений в пределах каждого варианта режимов упрочнения было наименьшим из всех исследованных случаев. Это обстоятельство можно объяснить относительно небольшим рассеянием остаточных напряжений и их постоянством по знаку в исходных образцах с отверстием (рис. 1).

Образцы из сплава ЭП742. Режимы ультразвукового упрочнения плоских образцов толщиной 10 мм из сплава ЭП742 представлены в табл. 2. В каждом варианте упрочнения УЗУ исследовалось по три образца. На рис. 3 приведено поле рассеяния окружных σ_θ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a образцов, обработанных по существующей технологии, то есть без упрочнения, а также средняя эпюра. Видно, что в отличие от образцов из сплава ЭИ698ВД (рис. 1), остаточные напряжения в этом случае имеют большое рассеяние и до глубины 0,06 мм являются преимущественно растягивающими, достигая 260 МПа на поверхности отверстия. Это обстоятельство может существенно сказаться на сопротивлении усталости образцов с отверстиями, изготовленных по существующей технологии [2].

Таблица 2. Режимы ультразвукового упрочнения образцов из сплава ЭП742

Вариант упрочнения	Режимы УЗУ		
	d_{ul} , мм	h , мм	τ , с
1	1,0	6,5	20
2	1,0	6,5	40
3	1,0	6,5	60
4	1,0	6,5	80

Осреднённые эпюры окружных σ_θ остаточных напряжений в зоне отверстий после различных вариантов режимов УЗУ представлены на рис. 4, а поле рассеяния по каждому варианту – на рис. 5. Можно видеть, что после всех вариантов упрочнения в поверхностном слое создаются сжимающие

остаточные напряжения, величина которых повышается с увеличением времени обработки, причём с увеличением длительности УЗУ увеличивается рассеяние остаточных напряжений.

Следует обратить внимание на значительно меньшую (в 2-2,5 раза) величину сжимающих остаточных напряжений в образцах толщиной 10 мм из сплава ЭП742, чем в образцах толщиной 5 мм из сплава ЭИ698ВД при примерно таком же времени обработки. Это различие можно объяснить, во-первых, проявлением наследственности, так как в исходных образцах из сплава ЭП742 (рис. 3) действовали значительные растягивающие остаточные напряжения, нестабильные как по величине, так и по характеру распределения. Нестабильность исходных остаточных напряжений привела к существенному рассеянию напряжений после УЗУ, что иллюстрируют данные рис. 5, где показаны также эпюры средних остаточных напряжений. Необходимо отметить, что такого рассеяния напряжений при всех вариантах упрочнения образцов из сплава ЭИ698ВД не наблюдалось.

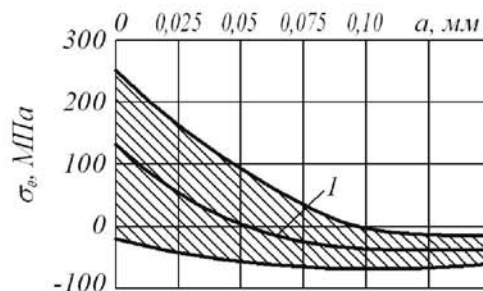


Рис. 3. Поле рассеяния окружных σ_θ остаточных напряжений в зоне отверстий образцов из сплава ЭП742, обработанных по существующей технологии: 1 – средняя эпюра напряжений

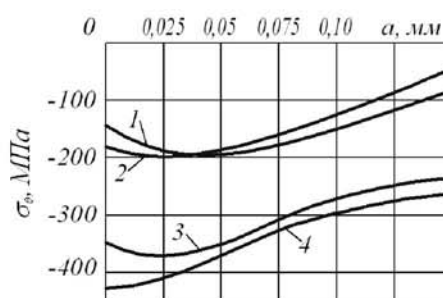
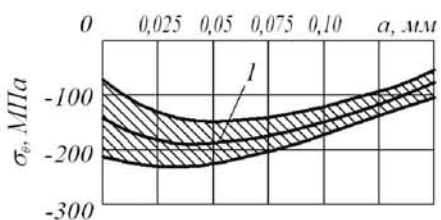
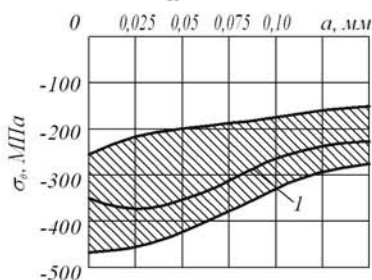


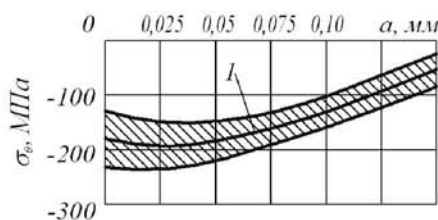
Рис. 4. Окружные σ_θ остаточные напряжения в зоне отверстий образцов из сплава ЭП742 после УЗУ; номера эпюр соответствуют вариантам упрочнения табл. 2



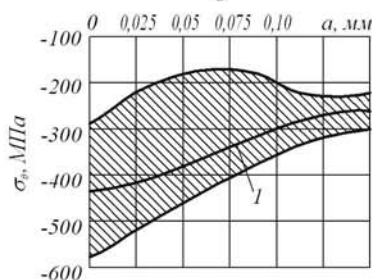
а



б



в



г

Рис. 5. Поля рассеяния окружных σ_θ остаточных напряжений в зоне отверстий образцов из сплава ЭП742, обработанных УЗУ по вариантам табл. 2: а – вариант 1, б – вариант 2, в – вариант 3, г – вариант 4; 1 – средняя эпюра напряжений

Второй причиной меньших остаточных напряжений после УЗУ в образцах из сплава ЭП742 может быть большая толщина образца (10 мм против 5 мм), которая при-

водит к меньшему упрочнению поверхности отверстий и, как следствие, к более низким сжимающим остаточным напряжениям.

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что остаточные напряжения в зоне отверстий образцов, имитирующих отверстия в дисках турбины ГТД под стяжные болты, из сплава ЭИ698ВД после обработки по существующей технологии являются преимущественно сжимающими, из сплава ЭП742 – растягивающими и имеют существенное рассеяние. После обработки УЗУ в зонах отверстий возникают сжимающие остаточные напряжения величиной до -1300 МПа в образцах из сплава ЭИ698ВД и до -420 МПа в образцах из сплава ЭП742. При этом в образцах из сплава ЭП742 напряжения имеют большее рассеяние, причиной которого является, по-видимому, наследственность.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках АВИЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/13944).

Библиографический список

1. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок [Текст] / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С. 32-42.
2. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 64 с.

RESIDUAL STRESSES IN THE SPECIMENS WITH OPENINGS IMITATING OPENINGS FOR COUPLING BOLT INTO THE TURBINE OF JET ENGINES

© 2011 V. S. Vakuljuk¹, V. A. Kirpichyev¹, V. F. Pavlov¹, V. P. Sazanov²

¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

²CJSC Volzhskoe design bureau RSC «Energiya» named S.P. Korolyov, Samara

The residual stresses in the flat specimens with openings made of ЭИ698ВД and ЭП742 alloys after ultrasonic treatment is studied. It is established that ultrasonic treatment creates great values of compressing residual stresses in the surface layer of openings.

Specimens with opening, ЭИ698ВД and ЭП742 alloys, residual stresses, ultrasonic treatment.

Информация об авторах

Вакулюк Владимир Степанович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Павлов Валентин Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, начальник отдела прочности ЗАО Волжское конструкторское бюро РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. г. Самара. Тел.: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Vakuljuk Vladimir Stepanovich, candidate of technical science, associate professor of department «strength of materials», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Kirpichyev Victor Alekseevich, doctor of technical science, professor, decan of aircraft faculty, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846)267-45-27. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Pavlov Valentin Fjodorovich, doctor of technical science, professor, Head of department «strength of materials», Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.

Sazanov Vyacheslav Petrovich - candidate of technical science, chief of department of strength of CJSC Volzhskoe design bureau RSC «Energiya» named S.P. Korolyov. E-mail: sopromat@ssau.ru. Area of research: mechanics of residual stresses.