

лопатки от совместного действия указанных методов упрочняющей обработки, и при этом варьировать зоны приложения и уровни остаточных напряжений.

Моделирование ОН осуществлялось на основе использования начальных напряжений, которые определяются расчётно-экспериментальным методом [4]. Для моделирования сквозного наклёпа кромок использованы эпюры ОН с глубиной залегания ~0,9 мм, приведённые в работе [1]. Расчётному прогнозированию подвергались следующие параметры лопатки: максимальные прогиб пера, разворот концевого поперечного сечения относительно корневого сечения и удлинение лопатки. Результаты расчётов различных режимов упрочняющей обработки на лопатке с длиной пера 120 мм показали, что при одинаковом сквозном упрочнении только одних кромок уже возникают существенные деформации, превышающие технологические допуски.

При загрузке эквивалентных начальных напряжений 400 МПа, рассчитанных по остаточным напряжениям согласно методике [4], при ширине наклёпанных кромок 6 мм прогиб пера лопатки составил 2,20 мм, разворот поперечного сечения пера 0,57 град, удлинение 0,34 мм. При дополнительном упрочнении дробеструйной обработкой всей поверхности пера деформации лопатки увеличиваются до 2,23 мм, 0,57 град и 0,38 мм, соответственно. Полученные

результаты более чем в 2 раза превышают технологические допуски, следовательно, при назначении режимов упрочнения необходимо учитывать возможные деформации лопаток и регулировать уровень ОН.

Библиографический список

1. Ножницкий Ю.А., Фишгойт А.В., Ткаченко Р.И., Теплова С.В. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоёв. / Вестник двигателестроения. 2006. № 2. С. 8-16.
2. Prevéy P.S., Jayaraman N., Shepard M.J. Improved HCF Performance and FOD Tolerance of Surface Treated Ti-6-2-4-6 Compressor Blades. [Электронный документ] // 9th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference. 2004. P. 10.
3. Букатый А.С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учётом геометрии упрочняемых деталей. // 7-я междунар. конф. «Авиация и космонавтика-2008»: Тезисы докл. – М.: изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. С. 68.
4. Букатый С.А., Букатый А.С. Энергетический метод определения рациональных режимов упрочнения тонкостенных и маложёстких деталей ГТД поверхностным пластическим деформированием. / Авиационно-космическая техника и технология. 2009. – № 10 (67). С. 45-49.

УДК 621.787.539.319

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ШЛИЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ

©2016 В.С. Вакулюк, А.П. Морозов, В.В. Алёшкин, Л.В. Денисов, Д.В. Анохин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE FATIGUE RESISTANCE OF SPLINED PARTS

Vakulyuk V.S., Morozov A.P., Alyoshkin V.V., Denisov L.V., Anokhin D.V. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

The influences of various versions of splined parts manufacture technology on the endurance limit under torsion have been examined. It's been established that the influence evaluation can be made by the average integral residual stresses criterion in the dangerous section of spline tooth.

Изучалось влияние технологии изготовления полых шлицевых деталей из сталей 12Х2Н4А и 30ХГСА на остаточные напряжения и сопротивление многоциклового

усталости. Все детали имели 24 зуба, модуль $m = 1$ мм и изготавливались по стандартной технологии, принятой в авиационном двигателестроении (табл. 1).

Таблица 1 - Варианты технологии изготовления шлицевых деталей, результаты определения остаточных напряжений и испытаний на усталость

Материал	Партия	Вариант технологии изготовления	τ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\tau$
12Х2Н4А	1	фрезерование (исх. сост.)	231	–	–
	2	фрезерование + цементация	385	-579	0,266
	3	фрезерование + цементация + серебрение	369	-632	0,218
	4	фрезерование + цементация + обработка микрошариками	392	-802	0,201
30ХГСА	1	фрезерование (исх. сост.)	213	–	–
	2	фрезерование + цементация	384	-684	0,253

Окружные σ_φ остаточные напряжения во впадинах шлиц определялись расчётно-экспериментальным методом с использованием распределения остаточных напряжений образцов-свидетелей [1]. В связи с рассеянием остаточных напряжений, в каждой партии исследовалось по 28 – 30 деталей, а на рис. 1 представлены средние для каждой партии эпюры окружных σ_φ остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a , полученные в результате статистической обработки. Испытания шлицевых деталей на усталость при кручении в случае симметричного цикла проводились на машине РК-92; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости τ_{-1} представлены в табл. 1.

Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости при кручении $\Delta\tau_{-1}$ шлицевых деталей проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [2, 3]:

$$\Delta\tau_{-1} = \bar{\psi}_\tau \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

где $\bar{\psi}_\tau$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости при кручении.

Среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ вычислялись по толщине поверхностного слоя, равной 0,035 мм. По данным работы [3] именно такая критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости соответствует размеру поперечного сечения зуба шлица, где происходило разрушение. Значения $\bar{\sigma}_{ост}$ приведены в табл. 1. Коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости при кручении определялся по формуле (1) и его значения представлены в табл. 1. Анализ приведённых в табл. 1 данных показывает, что коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ составляет в среднем 0,234.

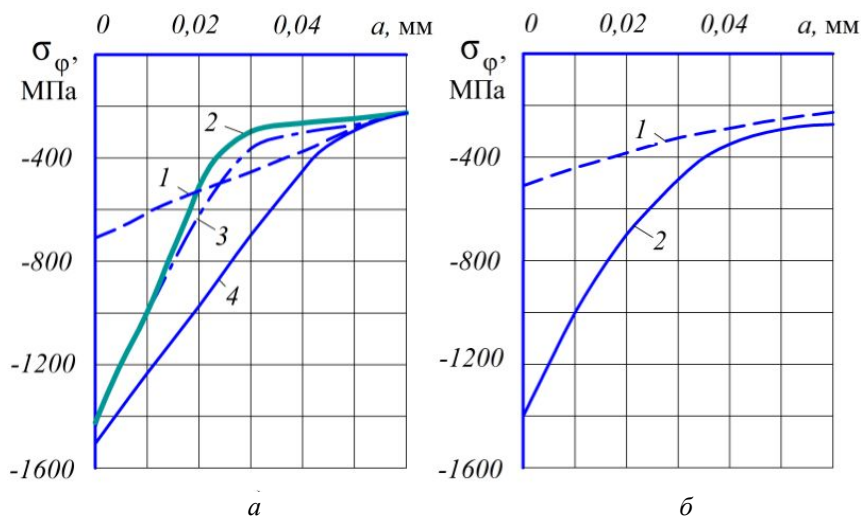


Рис. 1. Окружные σ_φ остаточные напряжения в шлицевых деталях из сталей 12Х2Н4А (а) и 30ХГСА (б) (номера эпюр соответствуют номерам партий деталей таблицы 1)

Известно [3], что при оценке влияния упрочнения по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений на предел выносливости при кручении коэффициент $\bar{\psi}_\tau$ в два раза меньше соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе. На основании обработки большого количества экспериментальных данных в работе [4] для коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ была получена следующая зависимость:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081 \alpha_\sigma, \quad (2)$$

где $\alpha_\sigma = 1,54$ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который был рассчитан методом конечных элементов для исследованных шлицевых деталей. Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленный по формуле (2) при $\alpha_\sigma = 1,54$, составляет значение 0,488, поэтому коэффициент $\bar{\psi}_\tau = \bar{\psi}_\sigma / 2 = 0,244$. Следовательно, полученное в настоящем исследовании среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_\tau = 0,234$ незначительно отличается от вычисленной с помощью зависимости (2)

величины коэффициента $\bar{\psi}_\tau$.

Библиографический список

1. Павлов В.Ф., Столяров А.К., Вакулюк В.С., Кирпичёв В.А. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 124 с.
2. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений. / Известия вузов. Машиностроение. – 1986. №8. С. 29-32.
3. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 125 с.
4. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Филатов А.П., Чирков А.В. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений. / Вестник УГАТУ. – 2011. Т. 15, № 4 (44). С. 81-85.

УДК 621.787:539.319

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ИЗ СПЛАВА ЭИ698 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ

©2016 В.А. Кирпичёв, А.П. Филатов, А.В. Чирков, О.В. Каранаева, П.Е. Киселёв

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

THE DEPENDENCE OF RESIDUAL STRESSES IN SPECIMENS MADE OF ALLOY ЭИ698 ON ULTRASONIC HARDENING REGIMES

Kirpichev V.A., Filatov A.P., Chirkov A.V., Karanaeva O.V., Kiselyov P.E. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

Residual stresses in flat specimens made of ЭИ698 alloy after ultrasonic hardening under different regimes have been studied. Optimal regimes of ultrasonic hardening have been determined on ground of the average integral residual stresses criterion.

Исследовались остаточные напряжения в плоских образцах прямоугольного поперечного сечения с размерами 100×12×3 мм из сплава ЭИ698, обработанных на ультразвуковой установке при различной массе шариков и времени упрочнения. Остаточные напряжения определялись механическим методом [1] при последо-

вательном удалении поверхностных слоёв образцов электрохимическим травлением и измерением возникающих при этом перемещений.

В табл. 1 представлены шесть режимов ультразвукового упрочнения (m – масса шариков, τ – время упрочнения). На каждом режиме исследовалось по два образца.