

Машиностроение

УДК 621.787:539.319

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ШЛИЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ

В.С. Вакулюк

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34
E-mail: sopromat@ssau.ru

Изучено влияние цементации, обработки микрошариками и серебрения на распределение остаточных напряжений и сопротивление многоциклового усталости шлицевых деталей из стали 12Х2Н4А и 30ХГСА. Установлено, что цементация и обработка микрошариками существенно увеличивают предел выносливости при кручении шлицевых деталей.

Ключевые слова: шлицевые детали, цементация, обработка микрошариками, серебрение, предел выносливости, остаточные напряжения.

Изучалось влияние технологии изготовления полых шлицевых деталей (рис. 1) из сталей 12Х2Н4А и 30ХГСА на остаточные напряжения и сопротивление многоциклового усталости. Все детали изготавливались по стандартной технологии, принятой в авиационном двигателестроении. Шлицы имели эвольвентный профиль, получивший наибольшее распространение ввиду высокой надежности и технологичности, и изготавливались фрезерованием методом обкатки на зубофрезерном станке.

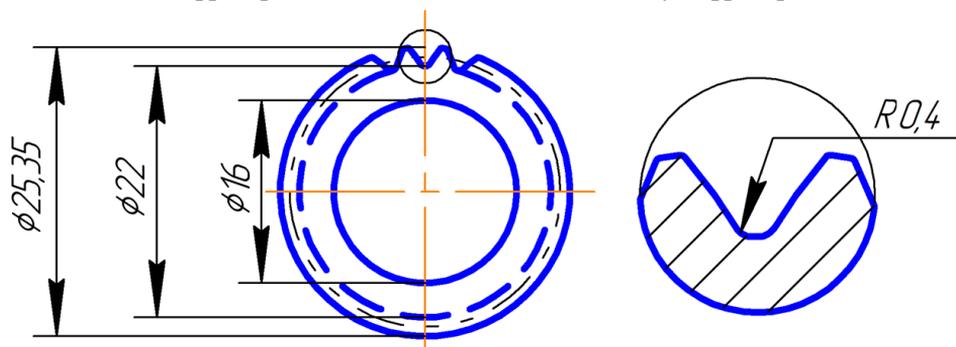


Рис. 1. Размеры шлицевой детали

Часть шлицевых деталей исследовалась непосредственно после фрезерования (исходное состояние), другая часть подвергалась химико-термической обработке по

Владимир Степанович Вакулюк (к.т.н.), доцент кафедры «Сопротивление материалов».

режимам, представленным в табл. 1, а также обработке микрошариками. Исследовались четыре партии шлицевых деталей из стали 12Х2Н4А и две – из стали 30ХГСА по вариантам технологии изготовления, приведенным в табл. 2.

Таблица 1

Режимы химико-термической обработки

Цементация		Закалка в соляной ванне		Низкий отпуск			Твердость поверхности, HRC	Твердость сердцевины, HRC	Толщина цементован- ного слоя, мм
T, °C	час	T, °C	час	охл.	T, °C	час			
900	5,5	790	13,5	масло	150	2	59 – 61	31 – 41	0,3 – 0,4

Таблица 2

Варианты технологии изготовления шлицевых деталей

Материал	№ партии	Вариант технологии изготовления
12Х2Н4А	1	Фрезерование (исходное состояние)
	2	Фрезерование + цементация
	3	Фрезерование + цементация + серебрение
	4	Фрезерование + цементация + обработка микрошариками
30ХГСА	1	Фрезерование (исходное состояние)
	2	Фрезерование + цементация

Меридиональные σ_{ϕ} остаточные напряжения во впадинах шлиц как до испытаний на усталость шлицевых деталей, так и после них определялись по методике, изложенной в работе [1]. Следует отметить, что после испытаний на усталость при напряжениях, близких к пределу выносливости, остаточные напряжения в деталях в исходном состоянии полностью снимались, а после химико-термической обработки практически не изменялись. Наблюдалось заметное рассеяние остаточных напряжений в пределах каждой партии деталей, причем наибольшее рассеяние напряжений имело место в деталях после фрезерования, то есть без химико-термической обработки.

В связи с рассеянием остаточных напряжений в каждой партии исследовалось по 28 – 30 деталей. На рис. 2 по толщине поверхностного слоя a представлены средние для каждой партии эпюры меридиональных σ_{ϕ} остаточных напряжений, полученные в результате статистической обработки [2]. Проверка результатов определения остаточных напряжений по критериям асимметрии и эксцесса показала, что рассеяние остаточных напряжений соответствует закону нормального распределения.

Из данных рис. 2 и табл. 3 видно, что цементация приводит к созданию в поверхностном слое впадин шлицевых деталей сжимающих остаточных напряжений на поверхности $\sigma_{\phi}^{нов}$ до -1450 МПа, а дополнительная (последующая) обработка микрошариками увеличивает эти напряжения до -1510 МПа. Покрытие цементованных шлицевых деталей электролитическим способом серебром при толщине слоя 3 – 6 мкм практически не изменяет остаточных напряжений на поверхности шлиц. Обработка микрошариками повышает сжимающие остаточные напряжения не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя. Распределение остаточных

напряжений в цементованных шлицевых деталях из сталей 12Х2Н4А и 30ХГСА различается незначительно, так как механические характеристики этих сталей близки.

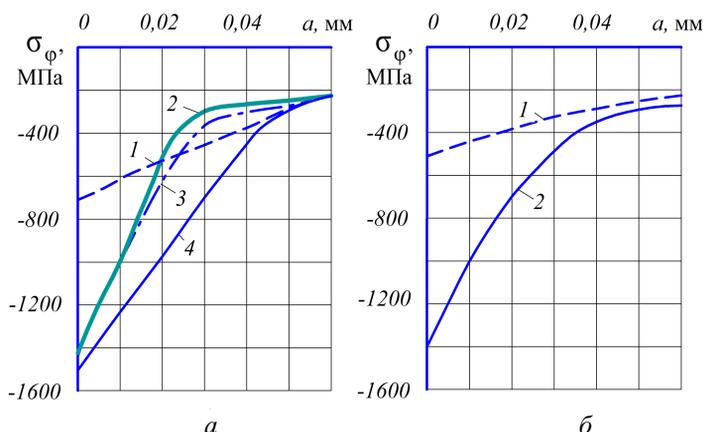


Рис. 2. Меридиональные σ_φ остаточные напряжения в шлицевых деталях из сталей 12Х2Н4А (а) и 30ХГСА (б); номера эпюр соответствуют номерам партий деталей табл. 2

Выявление и исключение грубых ошибок проводилось проверкой однородности результатов по квантилю максимального относительного отклонения. Значения меридиональных $\sigma_\varphi^{нов}$ остаточных напряжений на поверхности впадин шлиц приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения остаточных напряжений и испытаний на усталость

Материал	Номер партии	$\sigma_\varphi^{нов}$, МПа	τ_{-1} , МПа	$S_{\tau_{-1}}$, МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\tau$
12Х2Н4А	1	-740	231	3,2	—	—
	2	-1450	385	6,4	-579	0,266
	3	-1440	369	6,4	-632	0,218
	4	-1510	392	6,1	-802	0,201
30ХГСА	1	-520	213	5,6	—	—
	2	-1390	384	13,4	-684	0,253

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений $\sigma_\varphi^{нов}$, действующих на поверхности шлиц. Эти напряжения превышают не только предел текучести, но и предел прочности материала. В работе [3] показано, что наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений в поверхностно упрочненных образцах и деталях может достигать сопротивления разрыву S_k и даже превышать его, но не более чем на 15 %. Этот предел в настоящем исследовании не достигнут.

Испытания на усталость при кручении в случае симметричного цикла шлицевых деталей проводились в соответствии с ГОСТ 25.502-79 на машине РК-92, база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Партии шлицевых деталей для испытаний на усталость изготавливались одновременно с деталями для определения остаточных напряжений по вариантам технологии, приведенным в табл. 2. Как правило, в партии для испытаний на усталость было 13 – 15 деталей.

Испытания на усталость проводились по методу «лестницы» [4]. В соответствии с этим методом перед проведением испытаний основной партии деталей определялся приближенно предел выносливости по двум-трем деталям, а затем проводились испытания на усталость всей партии. Средние значения предела выносливости при кручении τ_{-1} , а также среднеквадратические отклонения $S_{\tau_{-1}}$ определялись по методике работы [4] и приведены в табл. 3.

Из данных табл. 3 можно видеть, что цементация шлицевых деталей приводит к существенному повышению сопротивления многоциклового усталости. Серебрение цементованных деталей несколько снижает, а обработка микрошариками повышает предел выносливости. Во всех случаях шлицевым деталям с большими сжимающими остаточными напряжениями соответствуют большие значения пределов выносливости. Следует отметить, что во всех партиях деталей усталостная трещина зарождалась в неконтактирующей части шлиц у дна впадин и развивалась вдоль оси деталей, не изменяя направления, то есть по тем площадкам, на которых действуют окружные σ_{φ} остаточные напряжения. Это обстоятельство указывает на то, что разрушение деталей носило усталостный характер.

Оценка влияния остаточных напряжений на приращение предела выносливости $\Delta\tau_{-1}$ шлицевых деталей проводилась по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ [5, 6]

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

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

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{\varphi}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (2)$$

$\sigma_{\varphi}(\xi)$ – меридиональные остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{kp}$ – расстояние от поверхности образца до текущего слоя, выраженное в долях t_{kp} ; t_{kp} – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ocm}$ в соответствии с формулой (2) вычислялись по толщине поверхностного слоя, равной 0,035 мм. По данным работы [6], именно такая критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости соответствует размеру поперечного сечения зуба шлица, где происходило разрушение. Значения $\bar{\sigma}_{ocm}$ приведены в табл. 3. Коэффициент $\bar{\psi}_{\tau}$ влияния остаточных напряжений на предел выносливости при кручении определялся по формуле (1), его значения представлены также в табл. 3. Анализ приведенных в табл. 3 данных показывает, что величина коэффициента $\bar{\psi}_{\tau}$ составляет в среднем 0,234.

Известно [7, 8], 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 ос-

новании обработки большого количества экспериментальных данных в работе [9] для коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$ была получена следующая зависимость:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081 \alpha_\sigma, \quad (3)$$

где $\alpha_\sigma = 1,54$ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который был рассчитан методом конечных элементов для шлицевых деталей с размерами, приведенными на рис. 1.

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, вычисленный по формуле (3) 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 (3) величины коэффициента $\bar{\psi}_\tau$.

Выводы

1. Остаточные напряжения в поверхностном слое впадин шлицевых деталей после изученных вариантов технологии изготовления имеют существенное рассеяние, что свидетельствует о наличии резерва прочности и надежности шлицевых соединений, который следует реализовать путем стабилизации остаточных напряжений.

2. Во всех рассмотренных случаях с увеличением сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое впадин шлиц наблюдается повышение сопротивления шлицевых деталей усталости, что позволяет рекомендовать использование результатов определения остаточных напряжений вместо проведения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость при разработке технологии изготовления шлицевых деталей.

3. Оценка влияния на сопротивление многоциклового усталости технологии изготовления шлицевых деталей по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений показала, что прогнозирование предела выносливости таких деталей представляется возможным с учетом распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя впадин шлиц, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости в опасном сечении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов С.И., Шатунов М.П., Вакулюк В.С.* Определение остаточных напряжений в шлицевых деталях // Получение деталей авиационной техники методами деформации металлов. – Куйбышев: КуАИ, 1981. – С. 143-148.
2. *Пустыльник Е.И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 341 с.
3. *Радченко В.П., Павлов В.Ф.* Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей // Прочность материалов и элементов конструкций: Труды международной научно-технической конференции. – ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.
4. *Школьник Л.М.* Методика усталостных испытаний. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
5. *Павлов В.Ф.* О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – № 8. – С. 29-32.
6. *Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С.* Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд. СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
7. *Иванов С.И., Павлов В.Ф., Прохоров А.А.* Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости при кручении в условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1988. – № 5. – С. 31-33.
8. *Павлов В.Ф., Прохоров А.А.* Связь остаточных напряжений и предела выносливости при кручении в

- условиях концентрации напряжений // Проблемы прочности. – 1991. – № 5. – С. 43-46.
9. *Кирпичёв В.А., Филатов А.П., Чирков А.В.* Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочненных деталей при различной степени концентрации напряжений // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 4 (44). – С. 81-85.

Статья поступила в редакцию 20 марта 2013 г.

THE INFLUENCE OF MANUFACTURE TECHNOLOGIE ON RESIDUAL STRESSES AND FATIGUE RESISTANCE OF SPLINED PARTS

V.S. Vakuljuk

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University
34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086

The paper examines cementation, microballs processing and silvering influence on residual stresses distribution and fatigue resistance of splined parts made of 12X2H4A and 30XГСА steels. It's been determined that cementation and microballs processing dramatically increase the endurance limit of splined parts under torsion.

Keywords: *splined parts, cementation, microballs processing, endurance limit, residual stresses.*

Vladimir S. Vakuljuk (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor: