

*В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, С.А. Колычев,
А.Э. Труфакин*

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ТИПА ДЕФОРМАЦИИ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Введение. В практике современного машиностроения широкое применение находят различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД), использование которых приводит к повышению сопротивления усталости деталей. Особенно эффективно применение ППД для деталей с концентраторами напряжений. Основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей играют сжимающие остаточные напряжения, наведённые в тонком поверхностном слое [1-5], поэтому учёт влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости чаще всего оценивается по остаточным напряжениям в опасном сечении деталей.

Методика учёта. Для учёта влияния упрочнения на приращение предела выносливости Δp_{-1} при симметричном цикле в случае изгиба ($\Delta \sigma_{-1}$), растяжения-сжатия ($\Delta \sigma_{-1p}$) и кручения ($\Delta \tau_{-1}$) деталей используются два критерия. Первый критерий – осевые остаточные напряжения на поверхности опасного сечения $\sigma_z^{нов}$; в этом случае приращение предела выносливости определяется по формуле

$$\Delta p_{-1} = \psi_p \cdot \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (1)$$

где ψ_p (ψ_σ, ψ_τ) – коэффициент влияния упрочняющей обработки на предел выносливости по критерию $\sigma_z^{нов}$.

Второй критерий – среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ост}$ [6], вычисленные по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости (рис. 1); в этом случае приращение предела выносливости определяется по формуле

$$\Delta p_{-1} = \bar{\psi}_p \cdot \left| \bar{\sigma}_{ост} \right|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau$) – коэффициент влияния упрочняющей обработки на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$;

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (3)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали по толщине поверхностного слоя y ; $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от поверхности детали до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$.

Многочисленными экспериментальными исследованиями [7-10] было установлено, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, возникающей в упрочнённой детали с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости, не зависит от типа деформации и определяется только размерами опасного поперечного сечения по формуле [7-10]

$$t_{кр} = 0,0216 D_1, \quad (4)$$

где D_1 – диаметр опасного поперечного сечения детали (рис. 1).

В исследовании изучалось влияние поверхностного пластического деформирования на предел выносливости при изгибе, растяжении-сжатии и кручении в случае симметричного цикла цилиндрических образцов из различных материалов с круговым надрезом полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм. Цилиндрические гладкие образцы диаметром $D = 10$ мм из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, сплава В93 для испытаний на изгиб, из сталей ЭИ961, 45, сплава Д16Т для испытаний на растяжение-сжатие, диаметром $D = 12$ мм из сталей ЭИ961, 40, сплава В95 для испытаний на кручение подвергались гидродробеструйной обработке (ГДО) стальными шариками диаметром 2 мм в течение 8 минут при давлении масла 0,28 МПа (стали), и 0,19 МПа (алюминиевые сплавы В93, Д16Т, В95) [9].

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись двумя методами: методом колец и полосок [11,12] и методом удаления части цилиндрической поверхности [13]. Необходимо отметить, что распределение остаточных напряжений, определённых двумя методами, имело хорошее совпадение.

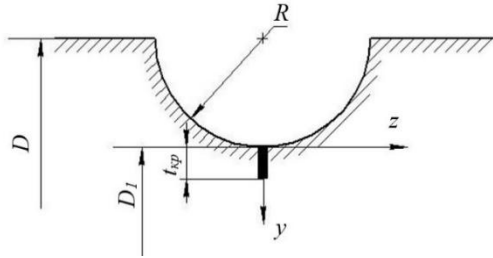


Рис. 1. Деталь с круговым надрезом полукруглого профиля и нераспространяющаяся трещина усталости

На неупрочнённые и упрочнённые ГДО гладкие образцы безнаклёпным способом (вначале фасонным резцом, а затем электрополированием) наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм (рис. 1). Остаточные напряжения в образцах с надрезом определялись аналитическим [14,15] и численным [16-20] методами. Результаты расчётов, выполненные двумя методами, практически совпали.

Испытания на усталость при симметричном цикле неупрочнённых и упрочнённых ГДО образцов с круговым надрезом полукруглого профиля $R = 0,3$ мм при чистом изгибе с вращением проводились на машине МУИ-6000, при растяжении-сжатии и кручении – на машине УММ-01; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости образцов при изгибе σ_{-1} , при растяжении-сжатии σ_{-1p} и при кручении τ_{-1} представлены в табл. 1 – 3.

Для определения критической глубины t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости упрочнённые образцы с надрезом, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при большем напряжении. Экспериментальные значения t_{kp} представлены в табл. 1 – 3. Средние значения критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $(t_{kp})_{cp}$, установленные в настоящем исследовании при изгибе $(t_{kp})_{cp} = 0,205$ мм, при растяжении-сжатии $(t_{kp})_{cp} = 0,201$ мм и при кручении $(t_{kp})_{cp} = 0,247$ мм практически не отличаются от значений, вычисленных по формуле (4), которые составляют при изгибе и растяжении-сжатии ($D_1 = 9,4$ мм) $t_{kp} = 0,203$ мм, при

кручении ($D_1 = 11,4$ мм) $t_{кр} = 0,246$ мм. Следовательно, проведённое исследование показывает, что для определения $t_{кр}$ формула (4) справедлива при изгибе, при растяжении-сжатии и при кручении.

В табл. 1 – 3 приведены также значения осевых остаточных напряжений на поверхности надрезов $\sigma_z^{нов}$, среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленных по формуле (3), коэффициентов влияния упрочняющей обработки ψ_σ, ψ_τ и $\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau$ по критериям $\sigma_z^{нов}$ и $\bar{\sigma}_{ост}$, определённых по формулам (1) и (2).

Табл. 1. Результаты испытаний образцов с надрезом $R = 0,3$ мм на усталость при изгибе и определения остаточных напряжений

Материал	Неупрочн. образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
30ХГСА	180	270	-620	0,145	0,204	-233	0,386
12Х18Н10Т	175	220	-268	0,168	0,207	-126	0,356
В93	67,5	100	-213	0,153	0,203	-96	0,339

Табл. 2. Результаты испытаний образцов с надрезом $R = 0,3$ мм на усталость при растяжении-сжатии и определения остаточных напряжений

Материал	Неупрочн. образцы σ_{-1p} , МПа	Упрочнённые образцы					
		σ_{-1p} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
ЭИ961	151,3	233,4	-500	0,164	0,198	-258	0,357
сталь 45	152,5	200	-478	0,099	0,206	-134	0,355
Д16Т	78,4	105	-160	0,166	0,200	-75,3	0,353

Табл. 3. Результаты испытаний образцов с надрезом $R = 0,3$ мм на усталость при кручении и определения остаточных напряжений

Материал	Неупрочн. образцы τ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
		τ_{-1} , МПа	$\sigma_z^{нов}$, МПа	ψ_τ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\tau$
ЭИ961	244	300	-790	0,070	0,240	-293	0,191
В95	37,5	72,5	-510	0,069	0,250	-193	0,180
сталь 45	150	166	-210	0,080	0,250	-94	0,170

Из представленных в табл. 1–3 данных следует, что среднее значение коэффициента влияния упрочняющей обработки на предел выносливости при изгибе по критерию $\sigma_z^{нов}$ составляет $(\psi_\sigma)_{cp} = 0,155$, при растяжении-сжатии – $(\psi_\sigma)_{cp} = 0,143$, при кручении – $(\psi_\tau)_{cp} = 0,073$, то есть средние значения коэффициентов ψ_σ, ψ_τ различаются незначительно. Однако следует отметить, что в настоящем исследовании крайние значения коэффициента ψ_σ составляют 0,099 (сталь 45) и 0,168 (12X18H10T), то есть отличаются в 1,7 раза. Для исследованных в монографии [9] образцов и деталей, подобное различие составляет 38 раз. Этот факт объясняется тем, что в настоящем исследовании распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине опасного поперечного сечения образцов с надрезом, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$, аналогичны, в отличие от многообразия характера распределения остаточных напряжений в работе [9].

Среднее значение коэффициента влияния упрочняющей обработки по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости при изгибе составляет $\bar{\psi}_\sigma = 0,360$, при растяжении-сжатии – $\bar{\psi}_\sigma = 0,355$, при кручении $\bar{\psi}_\tau = 0,183$, то есть в настоящем исследовании коэффициенты $\bar{\psi}_\sigma$ при изгибе и растяжении-сжатии практически одинаковы, а при кручении в два раза меньше. Следует отметить, что коэффициенты $\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau$ изменяются в меньших пределах, чем коэффициенты ψ_σ, ψ_τ , то есть учёт влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе, растяжении-сжатии и кручении образцов (деталей) в условиях концентрации напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ является более точным, чем по критерию $\sigma_z^{нов}$. При этом среднее значение коэффициента $\bar{\psi}_\tau$ в два раза меньше коэффициента $\bar{\psi}_\sigma$.

Заключение. В проведённом исследовании установлено, что учёт влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с надрезами следует проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

Коэффициент влияния на предел выносливости упрочнённых деталей при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений практически одинаков.

Коэффициент влияния на предел выносливости упрочнённых деталей при кручении в случае симметричного цикла по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений в два раза меньше, чем при изгибе и растяжении-сжатии.

Список использованных источников

1. Иванов С.И., Павлов В.Ф. О влиянии остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность образцов из стали 45 // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ. 1974. – Вып.1. – С. 96-100.

2. Иванов С.И., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 25-27.

3. 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.

4. Вакулюк В.С. Сопротивление усталости детали в зависимости от толщины упрочнённого слоя при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ. – 2012. – №3(34). – С. 172-176.

5. Кирпичёв В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых гладких деталей // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – №3(23). – С. 102-107.

6. Павлов В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29-32.

7. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22-26.

8. Павлов В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.

9. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

10. Иванов С.И., Павлов В.Ф., Минин Б.В., Кирпичёв В.А., Кочеров Е.П., Головкин В.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2015. – 170 с.

11. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

12. Иванов С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок. Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32-42.

13. Иванов С.И., Григорьева И.В. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.48. – С. 179-183.

14. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 3. – С. 88-95.

15. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Труды КуАИ. – Куйбышев: КуАИ, 1973. – Вып. 66. – С. 160-170.

16. Сазанов В.П., Чирков А.В., Самойлов В.А., Ларионова Ю.С. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании // Вестник СГАУ, 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.

17. Сазанов В.П. Исследование распределения компонентов остаточного напряжённого состояния в области наименьшего сечения поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом методом конечно-элементного моделирования // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3(34). – С. 158-161.

18. Сазанов В.П., Чирков А.В., Семёнова О.Ю., Иванова А.В. Моделирование остаточного напряжённого состояния детали в условиях концентрации напряжений с использованием программного комплекса PATRAN/ NASTRAN // Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки. – 2012. – №1 (33). – С. 106-114.

19. Сазанов В.П., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С., Павлов В.Ф. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндриче-

ской детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, №2 (68). – С. 35-40.

20. Павлов В.Ф., Сазанов В.П., Вакулюк В.С. К вопросу оценки влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости деталей по первоначальным деформациям образца-свидетеля // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – №1. Т. 21. – С. 55-62.

УДК 621.787:539.319

*В.П. Сазанов, А.В. Письмаров, В.К. Шадрин, С.А. Анисимов,
В.С. Майоров*

О ПРЕДЕЛЕ ВЫНОСЛИВОСТИ БОЛТОВ С НАКАТАННОЙ РЕЗЬБОЙ ПРИ ПОВЫШЕНИИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ЦИКЛА

Введение. Создание надёжных в эксплуатации и минимальных по массе разъёмных соединений в авиационной технике требует применения резьбовых деталей из высокопрочных материалов (стали и титановые сплавы) [1,2]. Наибольший практический интерес представляет вопрос повышения сопротивления усталости резьбового соединения при действии переменных нагрузок, так как предел выносливости высокопрочного материала при симметричном цикле составляет всего 20-30% от его предела прочности. Усилие предварительной затяжки соединения, назначаемое из условия нераскрытия стыка при действии эксплуатационных нагрузок, имеет достаточно значительную величину, которая по напряжениям в детали составляет до 0,5-0,7 от предела текучести материала и это приводит к существенной асимметрии цикла.

Методика исследования. Резервом повышения сопротивления усталости резьбовых деталей является использование технологий, которые позволяют создавать во впадинах профиля резьбы сжимающие остаточные напряжения. Одним из таких наиболее распространённых способов является изготовление резьбы накатыванием. Накатанная резьба имеет статическую прочность на 4-8% выше, чем нарезанная, а сопротивление усталости по сравнению с ней возрастает до 80-100% [1]. Вместе с тем асимметрия цикла напряжений при действии переменных нагрузок может