Список использованных источников

1. Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Самарский университет, 2012.

2. Захарова Н.В., Ларин А.П. Методы измерения и моделирования остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 41, № 6. – С. 508–516.

3. Иванов А.А., Петров В.П. Влияние гидродробеструйной обработки на остаточные напряжения и усталостную прочность стали 45 // Журнал материаловедения и обработки. – 2021. – Т. 12. – № 3. – С. 45-53.

4. Новиков П.А., Романова Е.М. Моделирование пластической деформации и распределения остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке стали 45 // Компьютерные технологии в машиностроении. – 2021. – Т. 17. – № 2. – С. 58-65.

5. Withers P.J., Bhadeshia H.K.D.H. Residual stress Part 1 – Measurement techniques // Materials Science and Technology. – 2001. – Vol. 17, №4. – P. 355-365.

УДК 621.787:539.319

В.Ф. Павлов, В.С. Вакулюк, Ю.Н. Петрова, Ю.А. Катанаева, И.Ю. Коваль

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Основную роль в повышении сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений после поверхностного пластического деформирования (ППД) играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для оценки влияния ППД на предел выносливости деталей используются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1-3], являются остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали. Формула для оценки предела выносливости при изгибе в случае симметричного цикла σ_{-1} упрочнённой детали в этом случае имеет следующий вид:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^{0} - \psi_{\sigma} \left| \sigma_{z}^{пов} \right|, \qquad (1)$$

где σ_{-1}^{0} – предел выносливости неупрочнённой детали, ψ_{σ} – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию $\sigma_{z}^{пов}$, $\sigma_{z}^{пов}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности опасного сечения упрочнённой детали.

При обработке деталей ППД часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей сжимающие остаточные напряжения уменьшаются. Это уменьшение бывает весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [4], но повышение предела выносливости наблюдается и в этих случаях.

Эти опыты указывают на то, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен учитывать распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения деталей.

Для определения второго критерия в статье [5] использовались результаты аналитического решения задачи [6] о распределении дополнительных остаточных напряжений в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [6], был предложен второй критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений влияния ППД на предел выносливости детали в следующем виде:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{0}^{1} \frac{\sigma_{z}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^{2}}} d\xi , \qquad (2)$$

где $\sigma_{z}(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали, $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$, $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённой детали при работе на пределе выносливости.

Предел выносливости упрочнённой детали σ_{-1} при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется по следующей формуле:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^{0} - \bar{\psi}_{\sigma} \cdot \left| \bar{\sigma}_{ост} \right| , \qquad (3)$$

где $\overline{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния ППД на предел выносливости по критерию $\overline{\sigma}_{ост}$.

Для проверки возможности применения обоих критериев при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на цилиндрических неупрочнённых и упрочнённых образцах из стали 20 диаметром 25 мм с круговыми надрезами полукруглого профиля. Сталь 20 имела следующие механические характеристики: σ_T = 395 МПа, $\sigma_в$ = 522 МПа, δ = 26,1 %, ψ = 65,9 %, S_k = 1416 МПа.

Гладкие образцы диаметром 25 мм упрочнялись пневмодробеструйной обработкой (ПДО) стальными шариками диаметром 1,5-2,5 мм в течение 10 минут, а также обкаткой роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилиях P = 0,5 кН (ОР1) и P = 1,0 кН (ОР2) с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Далее на неупрочнённые и упрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов R = 0,3 мм, R = 0,5 мм и R = 1,0 мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись экспериментально методом колец и полосок. Толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями при ОР больше, чем при ПДО, причём при увеличении усилия обкатки толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями увеличивается.

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. Дополнительные остаточные напряжения вычислялись аналитическим [6] и численным методами. Необходимо отметить, что результаты вычисления дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Величины сжимающих остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_z^{пов}$ представлены в табл. 1.

Следует обратить внимание на значительную величину сжимающих остаточных напряжений после обкатки роликом (ОР2), достигающих -908 МПа на дне надреза с радиусом R = 0,3 мм, что значительно больше

не только предела текучести, но и предела прочности стали 20. В статье [7] было доказано, что остаточные напряжения в упрочнённом слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали на 15%. В исследуемом случае этот предел не превышен, так как S_k = 1416 МПа.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами проводились на машине УММ-01; база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Значения предела выносливости образцов приведены в табл. 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, испытывались до разрушения при бóльших напряжениях. На изломах таких образцов были выявлены нераспространяющиеся трещины усталости, значения критической глубины $t_{кр}$ которых представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты испытаний образцов с надрезами на усталость и определения остаточных напряжений

Радиус надреза R	Неупроч. образцы σ_{-1}^0, МПа	Упрочнённые образцы						
		обработка	σ_{-1}, МПа	$\sigma_z^{пов}$, МПа	ψ_σ	$t_{кр}$, мм	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
R = 0,3 мм	107,5	ПДО	137,5	-343	0,087	0,540	-87	0,345
		ОР1	165	-787	0,073	0,510	-171	0,336
		ОР2	175	-908	0,074	0,520	-202	0,334
R = 0,5 мм	112,5	ПДО	130	-142	0,123	0,525	-52	0,337
		ОР1	150	-349	0,107	0,530	-111	0,338
		ОР2	172,5	-515	0,117	0,520	-169	0,355
R = 1,0 мм	112,5	ПДО	120	-46	0,163	0,490	-21	0,357
		ОР1	130	-92	0,190	0,510	-46	0,380
		ОР2	142,5	-145	0,207	0,495	-79	0,380

Из приведённых в табл. 1 данных видно, что пневмодробеструйная обработка и обкатка роликом образцов с надрезами приводят к значительному увеличению предела выносливости, причём с повышением усилия обкатки с P = 0,5 кН до P = 1,0 кН предел выносливости увеличивается. Приращение предела выносливости образцов с надрезом после обкатки роликом выше, чем после пневмодробеструйной обработки, что

объясняется бóльшей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при ОР, чем при ПДО, в результате чего произошло повышение сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении образцов с надрезами.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$ определялся по формуле (2) по толщине опасного сечения образцов, равной критической глубине $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости. Значения критерия $\overline{\sigma}_{ост}$ приведены в табл. 1.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию $\sigma_z^{пов}$ – остаточным напряжениям на поверхности опасного сечения – приводит к существенному рассеянию соответствующего коэффициента ψ_σ, вычисленного по формуле (1). Этот коэффициент в настоящем исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,207 (табл. 1), то есть изменяется в 2,8 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей на практике.

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по второму критерию $\overline{\sigma}_{ост}$ – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к значительно мéньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\overline{\psi}_\sigma$, вычисленного по формуле (3). Коэффициент $\overline{\psi}_\sigma$ в настоящем исследовании изменяется от 0,334 до 0,380, то есть изменяется в 1,07 раза.

Таким образом, в проведённом исследовании установлено, что оценку влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей с концентраторами напряжений из стали 20 следует проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ост}$.

Список использованных источников

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

2. Кравченко, Б.А. Обработка и выносливость высокопрочных материалов / Б.А. Кравченко, К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. – 131 с.

3. Серенсен, С.В. К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости / С.В. Серенсен, С.П. Борисов, Н.А. Бородин // Проблемы прочности. – 1969. – №2. – С. 3-7.

4. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения. – 1950. – №12. – С. 7-12.

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

6. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып.1. – С. 88-95.

7. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 354-357.

УДК 621.787:539.319

В.Ф. Павлов, А.А. Прохоров, С.А. Анисимов, П.А. Селищев, К.Ф. Матвеева

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Введение. В работе [1] было исследовано влияние на сопротивление многоцикловой усталости поверхностно упрочнённых деталей и образцов таких конструктивных факторов, как размеры опасного поперечного сечения и вида концентратора напряжений. В настоящем исследовании изучено влияние на предел выносливости такого конструктивного фактора, как глубина надреза при опережающем поверхностном пластическом деформировании обкаткой роликом цилиндрических деталей.