

Павлов В.Ф., Вакулюк В.С., Михалкина С.А., Алёшкин В.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАПРЯЖЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Влияние асимметрии цикла напряжений на сопротивление многоциклового усталости исследовалось на болтах М6 из сплава ВТ16. Половина всех болтов после накатывания резьбы подвергалась отжигу для снятия остаточных напряжений, наведённых при изготовлении резьбы. Резьба другой половины болтов накатывалась на предварительно отожжённых заготовках. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ по толщине a опасного сечения этих болтов как до испытаний на усталость, так и после, показано на рисунке 1. Из приведённых на рисунке 1 данных можно видеть, что остаточные напряжения во впадинах резьбы практически не изменяются после испытаний на усталость при различных средних напряжениях цикла σ_m , а также минимальных P_{min} и максимальных P_{max} нагрузках на болт. В отожжённых после накатывания болтах остаточные напряжения практически отсутствовали.

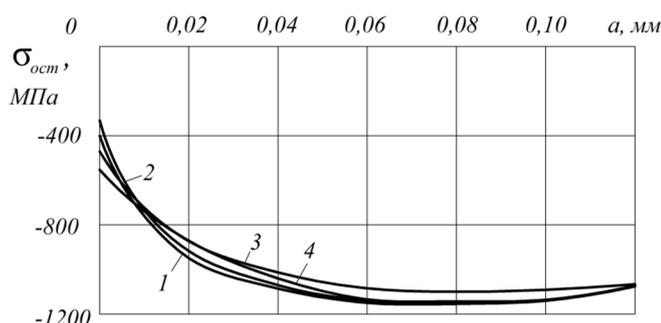


Рисунок 1 – Остаточные напряжения во впадинах резьбы болтов М6 из сплава ВТ16:

1 – до испытаний на усталость; 2 – после испытаний при $P_{min} = 2,0$ кН и $P_{max} = 12$ кН;

3 – после испытаний при $\sigma_m = 200$ МПа; 4 – после испытаний при $\sigma_m = 600$ МПа

Результаты экспериментального определения предельной амплитуды цикла напряжений σ_{Ra} при различных средних напряжениях цикла σ_m и расчёта критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [1] представлены в таблице 1. Из приведённых в этой таблице данных видно, что для отожжённых после накатывания болтов предельная амплитуда σ_{Ra} с увеличением среднего напряжения σ_m изменяется незначительно. Для накатанных после отжига болтов при всех исследованных значениях σ_m предельная амплитуда выше, причём с увеличением σ_m происходит монотонное уменьшение предельной амплитуды σ_{Ra} .

Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость болтов М6 при различных средних напряжениях цикла

σ_m , МПа	σ_{Ra} , МПа		$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	Опыт	Расчёт
	накатывание + отжиг	отжиг + накатывание		$\Delta\sigma_{Ra}^{on}$, МПа	$\Delta\sigma_{Ra}^{pac}$, МПа
200	46	153	-1030	107	103
350	44	123		79	72
400	39	111		72	68
600	37	61		24	16

По методике, изложенной в работе [2], строились диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений болтов М6 (рис. 2) с использованием механических характеристик сплава ВТ16: предел текучести $\sigma_{0,2}=920$ МПа, предел выносливости при растяжении-сжатии $\sigma_{-1p}=480$ МПа, сопротивление разрыву $S_k=1900$ МПа. Для резьбы М6 с гайкой при радиусе впадин $\rho_0=0,17$ мм теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 6,2$ [3]. Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ принимался равным α_σ . При указанных параметрах строилась диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений 1 (рисунок 2) для болтов без остаточных напряжений, то есть для отожжённых после накатывания резьбы болтов.

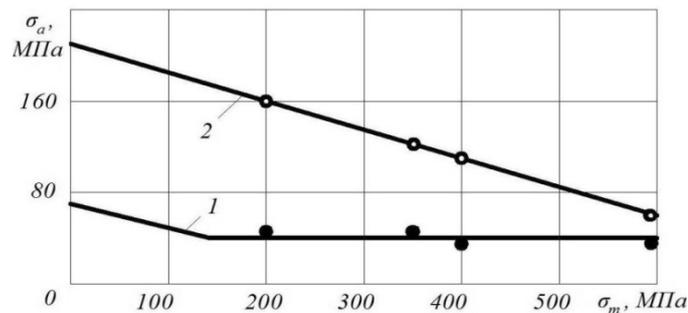


Рисунок 2 – Диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений болтов М6 из сплава ВТ16, накатанных до (1) и после (2) отжига: ● – накатывание + отжиг, ◐ – отжиг + накатывание

При построении диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений 2 (рисунок 2) болтов со сжимающими остаточными напряжениями, то есть для накатанных после отжига болтов, использовалась зависимость для вычисления приращения предельной амплитуды цикла $\Delta\sigma_{Ra}$, полученная в работе [2]:

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\Psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}| - \frac{\sigma_{-1p} (\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k}, \quad (1)$$

где $\bar{\Psi}_\sigma$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости болтов при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла; σ_m^T – среднее напряжение цикла, при котором в резьбе болтов без остаточных напряжений появляются первые пластические деформации.

В исследовании [4] на основании обработки большого числа экспериментальных данных для поверхностно упрочнённых образцов и деталей с различными концентраторами напряжений были получены следующие зависимости для коэффициента $\bar{\Psi}_\sigma$:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_\sigma &= 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \\ \bar{\Psi}_\sigma &= 0,514 - 0,065K_\sigma,\end{aligned}\tag{2}$$

где α_σ – теоретический, K_σ – эффективный коэффициенты концентрации напряжений.

Если в формулах (2) положить $\alpha_\sigma = K_\sigma = 6,2$ [3], то коэффициент $\bar{\Psi}_\sigma$ будет равен 0,11. Следует отметить, что в работе [5] для резьбовых образцов M16 из стали 40X с гайкой при отнулевом цикле в случае растяжения-сжатия было получено такое же значение коэффициента $\bar{\Psi}_\sigma$, поэтому $\bar{\Psi}_\sigma = 0,11$ можно использовать и для других размеров резьбовых деталей и материалов. Основанием для такого обобщения может также служить постоянство коэффициента $\bar{\Psi}_\sigma = 0,36$ в случае симметричных циклов изгиба и растяжения-сжатия образцов и деталей с умеренными концентраторами напряжений, изготовленных из различных материалов [2]. Меньшее значение $\bar{\Psi}_\sigma$ для резьбы с гайкой объясняется существенно большей концентрацией напряжений, что следует из формул (2).

С использованием полученного значения $\bar{\Psi}_\sigma = 0,11$ вычислялось приращение предела выносливости болтов при симметричном цикле по формуле (1) и строилась диаграмма 2 (рисунок 2) предельных амплитуд цикла накатанных после отжига болтов.

На построенные расчётным путём диаграммы нанесены результаты экспериментов, представленные в таблице 1. Видно, что опытные данные достаточно близки к расчётным, поэтому предложенная в работе [2] методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений может быть использована для определения предельной амплитуды резьбовых деталей.

Полученные данные объясняют результаты исследований [6] о влиянии усилия затяжки на прочность резьбовых соединений при переменных напряжениях. Для термообработанной, нарезанной и шлифованной резьбы, где толщина слоя с остаточными напряжениями и их величина незначительны, предельная амплитуда σ_{Ra} практически не зависит от среднего напряжения σ_m .

Таким образом, приращение предельной амплитуды резьбовой детали $\Delta\sigma_{Ra}$ за счёт остаточных напряжений для любого среднего напряжения σ_m при известных механических характеристиках $\sigma_{0,2}$, S_k , σ_{-1p} , теоретическом α_σ и эффективном K_σ коэффициентах концентрации напряжений можно вычислить по зависимости (1), приняв коэффициент $\bar{\Psi}_\sigma$ равным 0,11. Полученные таким путём расчётные значения приращений предельной амплитуды $\Delta\sigma_{Ra}^{pac}$ (таблица 1) достаточно близки к опытным значениям $\Delta\sigma_{Ra}^{on}$.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
3. Биргер, И.А. Резьбовые соединения [Текст] / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич – М.: Машгиз, 1973. – 256 с.
4. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15. – №4(44). – С. 81-85.
5. Павлов, В.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости резьбовых деталей из сталей 30ХГСА и 40Х [Текст] / В.Ф. Павлов, А.П. Филатов, Г.Ф. Мальков // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – №3. – С. 15-20.
6. Якушев, А.И. Влияние технологии изготовления и основных параметров резьбы на прочность резьбовых соединений [Текст] / А.И. Якушев – М.: Оборонгиз, 1956. – 191 с.