

УДК 621.787:539.319

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ НАКАТАННЫХ РОЛИКАМИ БОЛТОВ ИЗ СТАЛИ ЭИ696

© 2017 В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.П. Сазанов, А.С. Злобин, В.Э. Костичев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 22.03.2017

Исследовано влияние рабочей температуры на остаточные напряжения и предельную амплитуду болтов М6 из стали ЭИ696 с накатанной роликами резьбой. Установлено, что выдержка болтов при рабочей температуре приводит к уменьшению сжимающих остаточных напряжений во впадинах резьбы и снижению предельной амплитуды цикла напряжений болтов. Показано, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть использован для оценки влияния сжимающих остаточных напряжений во впадинах резьбы на предельную амплитуду цикла напряжений накатанных роликами болтов М6 из стали ЭИ696, как в исходном состоянии, так и после термоэкспозиции.

Ключевые слова: *резбовая деталь, остаточное напряжение, термоэкспозиция, амплитуда, критерий среднеинтегральных остаточных напряжений*

Прочность резьбовых деталей при переменных нагрузках в значительной степени зависит от качества поверхностного слоя впадин резьбы, формируемой в процессе изготовления. Качество поверхностного слоя характеризуется такими параметрами, как шероховатость, макро- и микроструктура, степень и толщина наклёпанного слоя, величина и характер распределения остаточных напряжений, которые зависят от способа и режимов изготовления резьбовых деталей. Самым распространённым методом формирования профиля резьбы высокоресурсных авиационных резьбовых деталей является накатывание роликом. Кроме высокой производительности и точности, накатывание резьбы обеспечивает повышенные прочностные и эксплуатационные характеристики резьбовых деталей. Температурное воздействие на накатанные резьбовые детали снижает их сопротивление усталости до уровня нарезанных, что объясняется релаксацией сжимающих остаточных напряжений во впадинах резьбы [1-3], наведённых при формировании профиля резьбы роликами.

В настоящем исследовании изучались закономерности изменения остаточных напряжений в накатанной роликом резьбе болтов М6 из стали ЭИ696 в условиях рабочих температур и устанавливалась предельная температура, до которой сохраняются сжимающие остаточные напряжения. Влияние рабочей температуры на остаточные напряжения и предельную амплитуду цикла напряжений оценивалось приближённым путём – болты подвергались термоэкспозиции при температуре T в

течение времени τ по вариантам, указанным в табл. 1 до испытаний на усталость.

Экспериментальная часть. Меридиональные σ_φ остаточные напряжения (осевые – в наименьшем сечении) определялись методом удаления половины поверхности впадин резьбы [4] и приведены на рис. 1 по толщине a поверхностного слоя впадин. Из представленных на рис. 1 эпюр остаточных напряжений видно, что с повышением температуры и времени термоэкспозиции происходит более интенсивная релаксация сжимающих остаточных напряжений. Процесс релаксации особенно усиливается с температуры $T = 650^\circ\text{C}$. При $T = 650^\circ\text{C}$ и времени термоэкспозиции 2000 часов остаточные напряжения практически полностью устраняются (рис. 1, эпюра 4). Проведёнными ранее исследованиями [1] установлено, что релаксация остаточных напряжений происходит, в основном, в первые часы температурного воздействия.

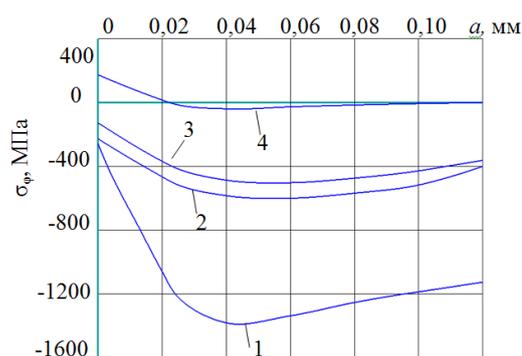


Рис. 1. Меридиональные остаточные напряжения σ_φ во впадинах резьбы болтов М6 из стали ЭИ696; номера эпюр соответствуют вариантам табл. 1

По результатам измерения меридиональных σ_φ остаточных напряжений во впадинах резьбы (рис. 1) вычислялся критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ [5, 6], используемый для прогнозирования предельной амплитуды цикла напряжений σ_{Ra} , по формуле

Павлов Валентин Фёдорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов. E-mail: sopromat@ssau.ru

Кирпичёв Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: dean_fa@ssau.ru

Сазанов Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: sazanow@mail.ru

Злобин Андрей Сергеевич, аспирант. E-mail: as.zlobin@mail.ru

Костичев Владислав Эдуардович, аспирант. E-mail: KostichevVE@gaz.ru

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{\phi}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (1)$$

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

Вычисленные по формуле (1) значения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ представлены в табл. 2, откуда можно видеть, что с увеличением релаксации сжимающих

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость

Вариант	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	σ_{Ra} , МПа	$\Delta\sigma_{Ra}^{от}$, МПа	$\Delta\sigma_{Ra}^{расч}$, МПа
1	-1090	156	73	74
2	-540	110	27	25
3	-460	93	10	9
4	0	83	0	0

Болты для испытаний на усталость изготавливались одновременно с болтами, в которых исследовались остаточные напряжения, то есть выборка болтов для испытаний на усталость и определения остаточных напряжений производилась из одной серии болтов с накатанной роликами резьбой. Испытания болтов на усталость при растяжении в случае асимметричного цикла проводились при нормальной температуре на вибрационной электродинамической установке ВЭДС-500, база испытаний – 10^7 циклов нагружения. Предельная амплитуда цикла σ_{Ra} определялась методом ступенчатого изменения нагрузки. Перед началом испытаний каждой партии на двух болтах оценивалось значение σ_{Ra} при их последовательном нагружении до разрушения. Если на заданной базе испытаний и принятой амплитуде болт не разрушался, то амплитуда увеличивалась на 10 МПа, вновь проводились испытания, и так до тех пор, пока не наступало разрушение. Затем с этого уровня амплитуды напряжений начинались испытания зачётной партии болтов. Величина приращения $\Delta\sigma_a$ принималась равной 4-6 МПа. Статистическая оценка среднего значения и среднеквадратического отклонения предельной амплитуды цикла напряжений σ_{Ra} проводилась по методике М.Н. Степнова [8]. Среднее напряжение цикла $\sigma_m = 350$ МПа принималось для всех партий болтов одинаковым в соответствии с нормами на затяжку резьбовых соединений в авиационном.

Выстоявшие базу испытаний болты доводились до разрушения при однократном нагружении для оценки размеров нераспространяющейся трещины усталости, необходимой при определении критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$. Такие трещины были обнаружены во всех болтах со сжимающими остаточными напряжениями, причём их критическая глубина $t_{кр}$, т.е.

остаточных напряжений во впадинах резьбы болтов критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ уменьшается. Это уменьшение критерия должно привести к снижению сопротивления усталости болтов [6, 7], что и наблюдалось в дальнейшем при проведении испытаний на многоцикловую усталость.

Таблица 1. Варианты термоэкспозиции болтов

Вариант	T, °C	τ , час
1	-	-
2	400	1000
3	400	2000
4	650	2000

глубина при напряжениях, равных пределу выносливости, составляла в среднем 0,1 мм, что хорошо согласуется с данными работ [6, 7], в которых установлено, что критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости зависит только от поперечного размера опасного сечения детали.

Результаты экспериментального определения предельной амплитуды цикла напряжений σ_{Ra} болтов представлены в табл. 2. Можно видеть, что изменения предельной амплитуды σ_{Ra} полностью соответствуют изменениям уровня и характера распределения остаточных напряжений, которые учитываются критерием среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленным по формуле (1).

Анализ полученных данных. Используя методику прогнозирования предела выносливости детали по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ [5, 6], были определены расчётные значения приращения предельной амплитуды $\Delta\sigma_{Ra}^{расч}$ по формуле

$$\Delta\sigma_{Ra}^{расч} = \bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (2)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ – коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду при среднем напряжении цикла σ_m .

Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ определялся по зависимости [1, 6]

$$\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} = \bar{\psi}_{\sigma} - \frac{\sigma_{-1p}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|}, \quad (3)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,11$ [9] – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости резьбовой детали при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия; σ_{-1p} – предел выносливости материала резьбовой детали при симметричном цикле

в случае растяжения-сжатия; σ_m – среднее напряжение цикла, при котором проводятся испытания резьбовых деталей на усталость; σ_m^T – среднее напряжение цикла, при котором начинается локальная текучесть в опасном сечении резьбовой детали; S_k – сопротивление разрыву материала резьбовой детали.

Значение среднего напряжения σ_m^T определялось по формуле [1, 6]

$$\sigma_m^T = \frac{S_k \left(\sigma_T - \sigma_{-1p} \cdot \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} \right)}{\alpha_\sigma (S_k - \sigma_{-1p})}, \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести материала резьбовой детали; α_σ и K_σ – соответственно теоретический и эффективный коэффициенты концентрации напряжений болта с гайкой, определённые по данным работы [10].

Вычисленные по формуле (2) значения приращения предельной амплитуды $\Delta\sigma_{Ra}^{расч}$ болтов М6 из стали ЭИ696 представлены в табл. 2, из которой следует, что расчётные и опытные значения приращения предельной амплитуды различаются незначительно, поэтому можно применять критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ для оценки влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду резьбовых деталей из стали ЭИ696.

Выводы: критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ может быть использован для оценки влияния сжимающих остаточных напряжений во впадинах резьбы на предельную амплитуду цикла напряжений σ_{Ra} накатанных роликами болтов М6 из стали ЭИ696, как в исходном состоянии, так и после термоэкспозиции.

При прогнозировании приращения предельной амплитуды болтов по зависимости (2) необходимо вычислить критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ по формуле (1) и коэффициент влияния $\bar{\nu}_\sigma^{(m)}$ по формуле (3) с использованием зависимости (4).

THE INVESTIGATION OF WORKING TEMPERATURE INFLUENCE ON THE FATIGUE RESISTANCE OF ROLLED BOLTS MADE FROM STEEL ЭИ696

© 2017 V.F. Pavlov, V.A. Kirpichyov, V.P. Sazanov, A.S. Zlobin, V.E. Kostichev

Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov

The influence of working temperature on residual stresses and amplitude limit of bolts M6 made of steel ЭИ696 with rolled thread has been examined. It's been established that the exposition of bolts under working temperature leads to the decrease of compressive residual stresses in thread cavities and lowering of stresses cycle amplitude limit of bolts. It's been shown that the average integral residual stresses criterion can be used for the evaluation of the compressive residual stresses in thread cavities influence on the stress-cycle amplitude limit of rolled bolts M6 made of steel ЭИ696 as well in initial state as after their thermoexposition.

Key words: *threaded detail, residual stress, thermoexposition, amplitude limit, average integral residual stresses criterion*

Valentin Pavlov, Doctor of Technical sciences, Professor, Head of the Strength of Materials Department. E-mail: sopromat@ssau.ru; Viktor Kirpichyov, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: dean fla@ssau.ru; Vyacheslav Sazanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: sazanow@mail.ru; Andrey Zlobin, Post-graduate Student. E-mail: as.zlobin@mail.ru; Vladislav Kostichev, Post-graduate Student. E-mail: KostichevVE@gaz.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин и др. – Самара: СНЦ РАН, 2015. 170 с.
2. Павлов, В.Ф. Влияние степени заполнения контура резьбы и термообработки на остаточные напряжения в резьбовых деталях / В.Ф. Павлов, М.П. Шатунов, Б.В. Минин // Проблемы прочности. 1988. №5. С. 110-112.
3. Радченко, В.П. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упругонённых конструкциях / В.П. Радченко, М.Н. Саушкин. – М.: Машиностроение, 2005. 226 с.
4. Иванов, С.И. Меридиональные остаточные напряжения в резьбовой части болта / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.К. Красота, Э.И. Фрейдлин // Вестник машиностроения. 1982. №11. С. 36-38.
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. Прогнозирование сопротивления усталости упругонённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. 125 с.
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. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
9. Павлов, В.Ф. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости резьбовых деталей из сталей 30ХГСА и 40Х / В.Ф. Павлов, А.П. Филатов, Г.Ф. Мальков // Известия вузов. Машиностроение. 1990. №3. С. 15-20.
Биргер, И.А. Резьбовые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машгиз, 1973. 256 с.