УДК 621.787:539.319

В.Ф.Павлов, Г.В.Коновалов, Б.В.Минин, В.А.Кирпичев

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

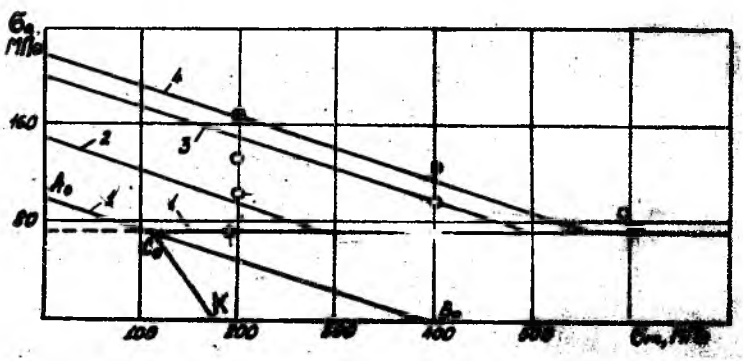
Представлены результаты измерения остаточных напряжений и проведения испытаний на усталость болтов из титанового сплава ВТ16, изготовленных по различным вариантам. Предложена методика построения диаграммы предельных амплитуд цикла напряжений резьбового соединения с учетом остаточных напряжений во впадинах резьбы. Данные расчета хорошо согласуются с результатами испытаний на усталость.

Резьбовые соединения из высокопрочных материалов находят все более широкое применение в авиа- и машиностроении. Расчетно-разрушающие усилия крепежа из титановых сплавов и легированных сталей существенно выше таких же усилий для резьбовых деталей из конструкционных сталей, однако при циклически изменяющихся нагрузках в расчетах на прочность рекомендуется многократно снижать характеристики сопротивления усталости, что объясняется большой чувствительностью этих материалов к концентрации напряжений. Испытания на усталость резьбовых соединений подтверждают приведенные положения, но в случаях, когда резьба болтов образована накатыванием и эксплуатируется при небольших усилиях затяжки, прочность при переменных нагрузках резьбовых деталей существенно выше расчетных значений. Объяснение наблюдаемому явлению следует искать в совместном действии среднего напряжения цикла и сжимающих остаточных напряжений во впадинах резьбы, вызванных накатыванием. Работы по учету влияния технологических остаточных напряжений на сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений [1, 2, 3] указывают на возможность оценки этого совместного действия.

Применяя предложенную в работе [4] гипотезу влияния среднего

ISBN 5-203-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991

напряжения цикла и среднеинтегральных остаточных напряжений на сопротивление усталости, построим диаграмму предельных амплитуд σ_{Ra} цикла напряжений в координатах σ_m, σ_a (σ_m – среднее напряжение, σ_a – амплитуда напряжения цикла) для болтов М6 из сплава ВТ16, накатанных до и после отжига (рис. I). Для получения болтов с различным уровнем остаточных напряжений во впадинах резьбы использовали различные маршруты изготовления, представленные в таблице. При построении диаграммы принимали: предел выносливости материала при растяжении-сжатии в исходном состоянии σ_{-1p} = 480 МПа, истинное сопротивление разрыву S_K = 1900 МПа, предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 920 МПа, теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ = 5,7. Ломаная I – диаграмма предельных амплитуд цикла для болтов без остаточных напряжений (накатанных до отжига при t = 500°С), точки A_0 и B_0 получены путем деления σ_{-1p} и S_K на величину эффективного и теоретического коэффициента концентрации. Локальная текучесть наступит в точке C_0 пересечения прямой A_0B_0 с прямой $\sigma_m + \sigma_a = \sigma_{0,2}$ (C_0K).



Р и с. I. Диаграммы σ_{Ra} предельных амплитуд цикла напряжений для болтов М6 из сплава ВТ16: I – без остаточных напряжений, 2–4 – со сжимающими остаточными напряжениями. Номера диаграмм соответствуют вариантам таблицы

Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

Вариант	Маршрут изготовления	σ_{Ra}, МПа			$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа
		σ_m = 200 МПа	σ_m = 400 МПа	σ_m = 600 МПа	
I	Накатывание + отжиг 500°С	78	–	70	0
2	Накатывание + отжиг 500°С + упрочнение микрошариками	I07	–	–	-430
3	Отжиг 780°С + накатывание	I38	I05	95	-9I0
4	Отжиг 900°С + накатывание	I72	I3I	92	-II00

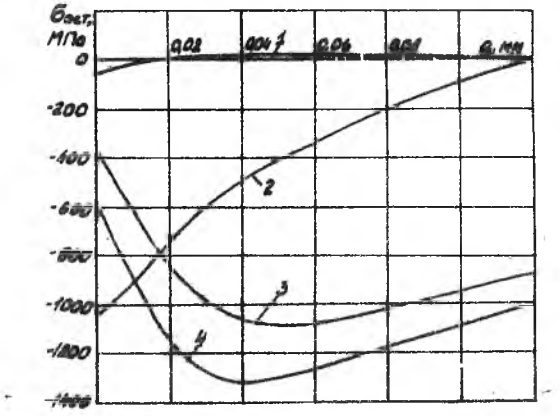
Меридиональные остаточные напряжения σ_φ (осевые σ_z – в наименьшем сечении) во впадинах резьбы болтов определяли по методике [5]. На рис. 2 приведены эпюры остаточных напряжений σ_z по толщине поверхностного слоя a, а в таблице – их среднеинтегральные значения $\bar{\sigma}_{ост}$, вычисленные по формуле [2]

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

где $\xi = a/t_{кр}$ – относительное расстояние от дна впадины резьбы до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$; $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости. Исследование болтов, прошедших испытания без разрушения, при статическом доломе показало, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости составляет 0,I мм.

Для построения диаграммы предельных амплитуд цикла для болтов с остаточными напряжениями требуется знать значение коэффициента влияния остаточных напряжений на предел выносливости при симметричном цикле $\bar{\psi}_\sigma$ [2, 3, 4]. Провести корректно испытания на усталость резьбового соединения при знакопеременном нагружении весьма сложно, поэтому коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ определяли следующим образом.

На основании работ [6, 7], в которых измерялись остаточные напряжения и проводились испытания на усталость резьбовых деталей М6 из сплава ВТI6 при σ_m = 350 МПа, представляется возможным пост-



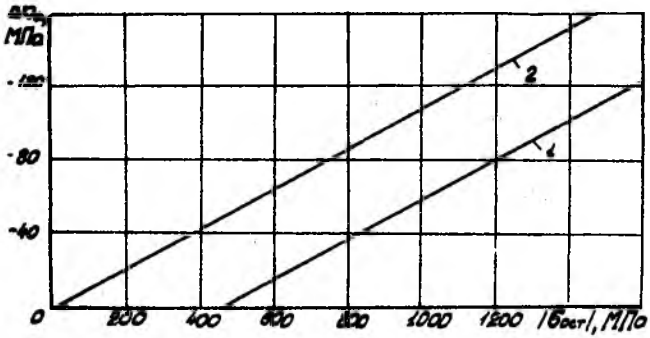
Р и с.2. Остаточные напряжения во впадинах резьбы болтов М6 из сплава ВТ16. Номера эпюр соответствуют вариантам таблицы

роить зависимость $\bar{\sigma}_{ост} - \Delta\sigma_{Ra}$, где $\Delta\sigma_{Ra}$ – приращение предельной амплитуды за счет остаточных напряжений (рис. 3, прямая I), которая описывается выражением

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\psi}_{\sigma} \, |\bar{\sigma}_{ост}| - C ,$$

где C – коэффициент, зависящий от среднего напряжения цикла. Тогда зависимость для симметричного цикла нагружений будет выражаться прямой 2 (рис. 3), откуда $\bar{\psi}_{\sigma} = 0{,}11$. Используя это значение $\bar{\psi}_{\sigma}$ и вычисляя по формуле [2] среднеинтегральные остаточные напряжения по эпюрам напряжений рис. 2, построим диаграммы предельных амплитуд цикла для болтов, изготовленных по вариантам таблицы. Диаграммы 2, 3, 4 (рис. I) для болтов с сжимающими остаточными напряжениями получали путем параллельного переноса прямой I по оси σ_a вверх на величину $|\bar{\sigma}_{ост}| \, \bar{\psi}_{\sigma}$, что обосновано в [4].

Испытания на усталость проводили на вибраторе с резонансной приставкой, обеспечивающей частоту нагружения 300 Гц. Предельная амплитуда σ_{Ra} оценивалась методом ступенчатого изменения нагрузки [8] при испытаниях 15–20 болтов в каждой партии. Результаты испытаний приведены в таблице, а также показаны метками на диаграмме $\sigma_a - \sigma_m$ (рис. I). Можно видеть, что опытные данные близки к построенным теоретическим путем диаграммам.



Р и с. 3. Зависимость приращения предельной амплитуды цикла $\Delta\sigma_{Ra}$ болтов М6 из сплава ВТ16 от среднеинтегральных остаточных напряжений $\sigma_{ост}$: I – при σ_m = 350 МПа, 2 – σ_m = 0

Таким образом, предложенную методику представляется возможным применять при построении диаграммы предельных амплитуд цикла для высокопрочных резьбовых деталей с учетом технологических остаточных напряжений. Для ее построения необходимо вычислить приращение предела выносливости при симметричном цикле по формуле

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\psi}_\sigma \, |\bar{\sigma}_{ост}|,$$

используя коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ = 0,II, и перенести диаграмму резьбовых деталей без остаточных напряжений параллельно вверх на величину $\Delta\sigma_{Ra}$.

Проведенные исследования хорошо объясняют результаты работ [9, I0] о влиянии усилия затяжки и технологии изготовления на прочность резьбовых соединений. Для термообработанной после накатывания, нарезанной или шлифованной резьбы предельная амплитуда σ_{Ra} не зависит от среднего напряжения цикла σ_m . Для накатанных и упрочненных резьбовых деталей влияние асимметрии цикла и режимов изготовления может быть описано предложенной диаграммой.

Библиографический список

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

2. Павлов В.Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости //Изв. вузов. Машиностроение, 1987. № 7. С. 3-6.

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

4. Павлов В.Ф. и др. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости при асимметричном цикле в случае растяжения-сжатия /В.Ф.Павлов, В.А.Кирпичев, Б.В.Минин, В.И.Лапин //Изв. вузов. Машиностроение, 1989. № 8. С. 14-18.

5. Павлов В.Ф. и др. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы болтов малого диаметра /В.Ф.Павлов, М.П.Шатунов, Б.В.Минин, Ю.И.Кольцун //Изв. вузов. Машиностроение, 1985. № 10. С. 3-7.

6. Павлов В.Ф., Петриков В.Г., Минин Б.В. Влияние термообработки и степени заполнения контура на остаточные напряжения и сопротивление усталости шпилек из сплава ВТ16 //Методы повышения эффективности использования режущих инструментов при обработке деталей летательных аппаратов и двигателей: Сб.науч. тр. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1986. С. 129-133.

7. Павлов В.Ф., Минин Б.В., Козокин Ю.П. Влияние диаметра заготовки под накатывание резьбы на остаточные напряжения и сопротивление усталости болтов из титанового сплава ВТ16 //Повышение эффективности использования режущих инструментов и качества поверхности при обработке авиационных материалов: Сб.науч. тр. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1987. С. 137-140.

8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний . М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

9. Якушев А.И. Влияние технологии изготовления и основных параметров резьбы на прочность резьбовых соединений. М.: Оборонгиз, 1956. 191 с.

10. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Конструктивные и технологические методы повышения выносливости резьбовых соединений из титановых сплавов //Вестник машиностроения. 1978. № 1. С. 25-27.

УДК 621.983.3.001

К.П.Крашенинников, Ю.В.Яницкий

К РАСЧЕТУ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ МАТРИЦ И ПУАНСОНОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ

Излагается методика расчета исполнительных размеров матриц и пуансонов для вырубки и пробивки с учетом рассеивания размеров штампованных деталей и систематической постоянной погрешности обработки. Приведены формулы для расчета исполнительных размеров. Предлагаемая методика, по сравнению с имеющимися в технической литературе данными, исключает брак штампованных деталей из-за ошибок при определении размеров матриц и пуансонов.

Главные рабочие детали штампа (матрицы и пуансоны) всегда соответственно пригоняются друг к другу. Взаимную их пригонку осуществляют, соблюдая некоторую величину зазора Z, определяемую, главным образом, толщиной и механическими свойствами обрабатываемого материала. В зависимости от характера выполняемой операции холодной штамповки и простановки размеров на изготовляемой детали одну из рабочих деталей штампа (матрицу или пуансон) при совместном изготовлении принимают за основную, а другую выполняют, ориентируясь на размеры первой. Так, в вырубных штампах основной рабочей деталью всегда является матрица, поскольку она определяет размеры изготовляемой детали, а ее износ влияет на изменение размеров детали. При пробивке отверстия по той же причине за основную деталь принимают пуансон.

ISBN 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991