

ряда сталей, жаропрочных никелевых и титановых сплавов. Эти экспериментальные данные и редкие случаи разрушения деталей по механизму МЦУ, являются уникальным материалом для оценки качества работы модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина и возможной необходимости его коррекции.

Полученные кривые расчётных долговечностей по уравнению Мэнсона-Коффина для гладких образцов и образцов с концентраторами находятся в поле разброса экспериментальных результатов в пределах трёх среднеквадратичных отклонений. Это подтверждает возможность получения достоверных результатов использования модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина для расчёта долговечности деталей двигателя, повреждаемых по механизму малоциклового усталости. Принципиально, при наличии достаточного объёма экспериментальных данных, возможна индивидуальная настройка модифицированного уравнения Мэнсона-Коффина на конкретный материал или группу материалов.

### **Библиографический список**

1. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации. – М.: ЦИАМ, 2004. – 260 с.
2. Терентьев, В.Ф. Усталость высокопрочных металлических материалов / В.Ф. Терентьев, А.Н. Петухов. – М.: ИМЕТ РАН-ЦИАМ, 2013. – 515 с.
3. Партон, В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

УДК 621.787:539.319

*Павлов В.Ф., Петрова Ю.Н., Шляпников П.А.,  
Михалкина С.А., Катанаева Ю.А.*

### **НАЗНАЧЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ВИДОВ И РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ**

В современном машиностроении с целью повышения работоспособности деталей широкое применение находят различные методы поверхностного упрочнения. В работе [1] было установлено, что ответственными за повышение предела выносливости за счёт поверхностного упрочнения в условиях концентрации на-

пряжений являются сжимающие остаточные напряжения, создаваемые в поверхностном слое детали. В связи с этим, для сокращения длительных и дорогостоящих испытаний на усталость, представляется возможность прогнозировать сопротивление усталости деталей с концентраторами при назначении видов и режимов их упрочнения по остаточным напряжениям. Разработанные методы определения остаточных напряжений в надрезах, галтелях, резьбе, впадинах шлиц и шестерён позволяют с достаточной точностью рассчитывать остаточные напряжения в наиболее опасном сечении детали, где происходит зарождение и развитие трещин усталости [2–4].

Эксперименты, описанные в работах [5–7], указывали на то, что сопротивление усталости зависит от характера распределения остаточных напряжений в опасном сечении деталей. В работе [8] был указан и путь реализации этого предложения, основанный на введении в расчёт приращения предела выносливости деталей за счёт поверхностного упрочнения критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , вычисляемого по следующей формуле:

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

где  $\sigma_z(\xi)$ ,  $(\sigma_\varphi(\xi))$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором;  $\xi = y / t_{кр} = \cos \vartheta$  – расстояние от дна концентратора (рис. 1) до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ .

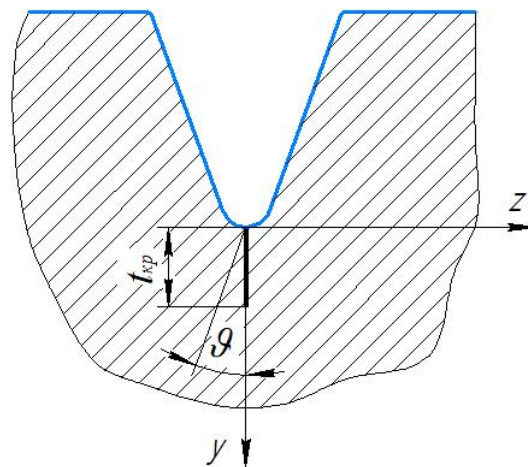


Рис. 1. Нераспространяющаяся трещина усталости в детали с концентратором напряжений

В работе [8] был введён коэффициент влияния остаточных напряжений  $\bar{\psi}_\sigma$ , используемый для определения приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  за счёт сжимающих остаточных напряжений по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_\sigma |\bar{\sigma}_{ост}|. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что наибольший эффект от упрочнения будет в том случае, если назначать такие виды и режимы обработки, чтобы значение  $\bar{\sigma}_{ост}$  было наибольшим по толщине поверхностного слоя детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$ .

Для экспериментального подтверждения высказанного выше положения были проведены опыты с четырьмя партиями болтов М6 из сплава ВТ16, накатанных одним комплектом роликов. Первая партия болтов была накатана с незаполненным контуром, вторая – с заполненным, третья – после накатывания с незаполненным контуром была отожжена в вакууме при температуре 550°C для снятия остаточных напряжений, четвертая – после отжига была упрочнена микрошариками.

Результаты определения меридиональных  $\sigma_\phi$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  в резьбе болтов по методике работы [4] представлены на рис. 2, а результаты испытаний на усталость на базе  $10^7$  циклов нагружения при среднем напряжении  $\sigma_m = 330$  МПа – в табл. 1, где  $\sigma_{an}$  – предельная амплитуда переменных напряжений. Анализируя данные рис. 2 и табл. 1, можно видеть, что связи между остаточными напряжениями на поверхности впадин резьбы или максимальными сжимающими остаточными напряжениями и приращением предельной амплитуды  $\Delta\sigma_{an}$  не наблюдается. Например, в четвертой партии болтов сжимающие остаточные напряжения на поверхности впадин наибольшие, однако  $\Delta\sigma_{an}$  наименьшее, по сравнению с первой и второй партиями, имеющими более полные эпюры сжимающих остаточных напряжений. При практически одинаковых сжимающих остаточных напряжениях на поверхности впадин резьбы приращение предельной амплитуды для первой партии болтов с наиболее полным распределением остаточных напряжений в 1,5 раза выше, чем для второй партии.

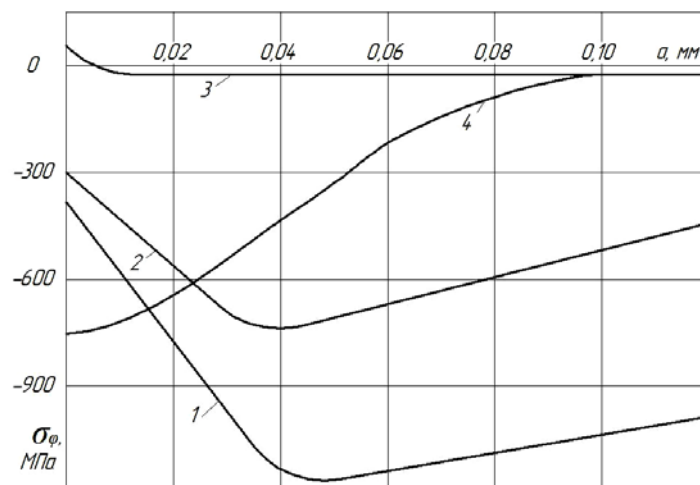


Рис. 2. Остаточные напряжения в резьбе болтов М6 из сплава ВТ16:  
 1 – с незаполненным контуром, 2 – с заполненным контуром, 3 – после отжига,  
 4 – после отжига и упрочнения микрошариками

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений болтов М6 из сплава ВТ16

| Партия болтов | Технология изготовления   | $\sigma_{an}$ , МПа | $\Delta\sigma_{an}$ , МПа | $\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа | $\bar{\psi}_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma_{an}}{ \bar{\sigma}_{ост} }$ |
|---------------|---|---------------------|---------------------------|----------------------------|--|
| 1             | накатывание   | 97                  | 59                        | -940                       | 0,063  |
| 2             | накатывание   | 78                  | 40                        | -670                       | 0,059  |
| 3             | накатывание+отжиг 550°С, 1,5 часа                               | 38                  | 0                         | 0                          | –  |
| 4             | накатывание+отжиг 550°С, 1,5 часа+<br>+упрочнение микрошариками | 62                  | 24                        | -390                       | 0,062  |

По формуле (1) были определены среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{ост}$  по толщине поверхностного слоя впадин резьбы, равной 0,1 мм. Именно такую глубину в среднем имели нераспространяющиеся трещины усталости, обнаруженные в выстоявших базу испытаний болтах. Величины  $\bar{\sigma}_{ост}$  приведены в табл. 1, где представлены также значения коэффициента  $\bar{\psi}_{\sigma}$ . Можно видеть, что коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  для всех партий болтов примерно одинаков, что указывает на правомерность использования интегральной оценки влияния остаточных напряжений, учитывающей полноту их распределения на приращение предела выносливости.

Таким образом, проведённое исследование показывает, что для назначения наиболее оптимальных по сопротивлению многоциклового усталости видов и ре-

жимов упрочняющей обработки следует стремиться к тому, чтобы сжимающие остаточные напряжения в деталях с концентраторами напряжений были не только выше по величине, но и имели как можно более полное распределение по толщине поверхностного слоя опасного сечения, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

### Библиографический список

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

2. Павлов, В. Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.

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

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

5. Туровский, М.Л. Упрочняющая обработка роликами азотированных стальных деталей / М.Л. Туровский, Р.А. Новик // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39–42.

6. Смагленко, Ф.П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твёрдого сплава ВК15 / Ф.П. Смагленко // Проблемы прочности. – 1980. – №8. – С. 35–38.

7. Рудницкий, Н.М. Некоторые закономерности усталостного разрушения деталей машин, упрочняемых остаточными напряжениями / Н.М. Рудницкий // Проблемы прочности. – 1980. – №1. – С. 29–34.

8. 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.