

Злобин А.С., Кирпичёв В.А., Кочерова Е.Е., Сёмкин Г.В.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Специфической особенностью повреждения при малоцикловой усталости, отличающей её от обычной усталости, является накопление односторонней макропластической деформации. Способность к накоплению пластической деформации является одним из факторов, определяющих сопротивление малоцикловой усталости материалов и конструкций [1].

При изготовлении и эксплуатации в деталях авиационно-ракетной техники возникают пластические деформации и, как следствие, остаточные напряжения, сосредоточенные в поверхностном слое. Исходя из этого, можно выделить технологические и эксплуатационные факторы, влияющие на остаточные напряжения и малоцикловую усталость резьбовых деталей. Рассмотрим это влияние, опираясь на результаты испытаний, приведённые в работе [2].

К технологическим факторам относятся:

- способ формирования резьбы;
- диаметр заготовки под накатывание резьбы;
- степень пластической деформации в резьбе и заготовке;
- последовательность термообработки;
- упрочнение поверхностным пластическим деформированием;
- ионная обработка.

При сравнении результатов испытаний на усталость шпилек М6 из сплава ВТ16 и М10 из стали 30ХГСА, выполненных такими способами формирования резьбы, как накатывание круглыми роликами, шлифование, фрезерование, нарезание резцом и плашкой было установлено, что наибольшую циклическую долговечность имеют шпильки с накатанной резьбой. Если такие детали подвергнуть отжигу, то их сопротивление усталости снизится до уровня шпилек со шлифованной резьбой. Следовательно, релаксация сжимающих остаточных напряжений приводит к снижению характеристик сопротивления усталости.

Полнота профиля резьбы существенно сказывается на уровне и характере распределения остаточных напряжений. Болты М6 из сплава ВТ16 с резьбой, накатанной с неполным профилем, имеют высокий уровень циклической долговечности. Увеличение

диаметра заготовки, обеспечивающего формирование резьбы полного профиля, вызывает снижение сопротивления усталости в связи с уменьшением остаточных напряжений.

По результатам испытаний болтов М6 из сплава ВТ16 однозначной зависимости между степенью пластической деформации и циклической долговечностью не выявлено. Изменение последней связано с изменением величины и характера распределения остаточных напряжений во впадинах резьбы.

Влияние последовательности термообработки на циклическую долговечность изучалось на болтах М6 из сталей ЭИ966, ЭИ961, ВПС17, 16ХСН. Болты подвергались термообработке после накатывания резьбы. Термообработка накатанных болтов привела к существенному снижению циклической долговечности – в 2–11 раз, что связано с релаксацией остаточных напряжений. Наибольшее снижение долговечности наблюдалось у болтов из стали 16ХСН, наименьшее – из стали ВПС17.

Испытания болтов М6 из сплава ВТ16, изготовленных с упрочнением микрошариками на роторной установке, показали, что средние значения остаточных напряжений практически не изменились ввиду исчерпания материалом пластичности при изготовлении резьбы накатыванием. Однако рассеяние величины циклической долговечности уменьшилось, вследствие чего повысилась её нижняя граница. Это является важной особенностью, так как в нормах прочности оговорена именно нижняя граница циклической долговечности, равная 4000 циклам. Кроме того, обработка микрошариками также повышает среднее значение и нижнюю границу циклической долговечности отожжённых болтов.

Результаты исследования влияния ионной обработки в различных средах на сопротивление усталости болтов М6 из сплава ВТ16 показали, что после накатывания резьбы ионная обработка снижает сопротивление усталости в связи с уменьшением сжимающих остаточных напряжений. Ионная обработка отожжённых болтов, не имеющих остаточных напряжений, наоборот, повышает циклическую долговечность за счёт создания в поверхностном слое впадин резьбы сжимающих остаточных напряжений.

Таким образом, ионная обработка накатанных болтов уменьшает циклическую долговечность при нормальной температуре, а отожжённых – несколько увеличивает. Наблюдаемое изменение сопротивления усталости связано с уменьшением остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы.

Рабочая температура относится к эксплуатационным факторам, влияющим на малоцикловую усталость резьбовых деталей. В резьбовых соединениях, работающих при повышенных температурах, наблюдается релаксация остаточных напряжений, которые

практически полностью снимаются при достаточно длительном температурном воздействии. При этом релаксация остаточных напряжений происходит, в основном, в первые часы наработки. Так, например, испытания болтов из стали 16ХСН при увеличенном с 500 до 2000 часов времени выдержки и температуре 300°C показали изменение остаточных напряжений лишь на 5-10%. Аналогичные результаты наблюдались и для болтов ВТ16 и ЭИ696.

Подводя итог изучению влияния технологических и эксплуатационных факторов на малоцикловую усталость резьбовых деталей, следует отметить, что определяющими факторами являются диаметр заготовки под накатывание резьбы, термообработка, усилие и время накатывания, то есть факторы, оказывающие наибольшее влияние на уровень и характер распределения остаточных напряжений. Во всех рассмотренных случаях увеличение уровня сжимающих остаточных напряжений приводит к увеличению циклической долговечности.

В деталях, работающих при повышенных температурах, происходит релаксация остаточных напряжений, что ставит вопрос о целесообразности использования поверхностного пластического деформирования (ППД) для таких деталей. Однако для изделий с небольшим временем работы, например, ракетных двигателей, приращение ресурса высоконагруженных деталей за счёт ППД может оказаться существенным.

На рисунках 1 и 2 представлены графики зависимости минимальной циклической долговечности N_{min} от критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$, характеризующего влияние остаточных напряжений на усталость, для различных способов изготовления и упрочнения резьбовых деталей М6 из сплава ВТ16 [2]. Из приведённых на рисунках 1 и 2 данных видно, что с увеличением по абсолютной величине критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ циклическая долговечность резьбовых деталей увеличивается.

Таким образом, для повышения сопротивления малоцикловой усталости резьбовых деталей необходимо применять такие методы обработки и формирования резьбы, которые приводят к увеличению критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ в опасном сечении деталей.

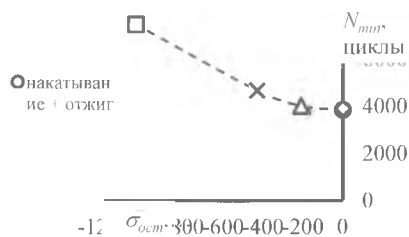


Рисунок 1 – Зависимость циклической долговечности шпилек, изготовленных различными способами, от критерия $\bar{\sigma}_{ост}$

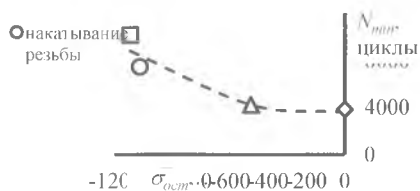


Рисунок 2 – Зависимость циклической долговечности болтов, упрочнённых микрошариками, от критерия $\bar{\sigma}_{ост}$

Библиографический список

1. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.
2. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей [Текст] / 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.