

Библиографический список

1. Трощенко, В. Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 253 с.

2. Сургутанов, Н.А. Исследование влияния глубины трещины на коэффициент интенсивности напряжений в надрезанных и гладких пластинах / Н.А. Сургутанов // Вестник Самарского Университета. – 2017. – Т. 16. – №1. – С. 176–185.

3. Вакулюк, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементном моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях / В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия СНЦ РАН. – 2014. – Т.16. – № 4. –С.168 -174.

УДК 621.787:539.319

*Злобин А.С., Сургутанов Н.А., Зотов Е.В.,
Матвеева К.Ф., Федоров Д.Г.*

ВЫЧИСЛЕНИЕ КИН В ЗОНЕ ФРОНТА КОЛЬЦЕВЫХ ТРЕЩИН С УЧЁТОМ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

На сегодняшний день линейная механика разрушения остаётся одной из основных методологий определения характеристик сопротивления усталости деталей авиационной техники. При этом в таких деталях практически всегда присутствуют остаточные напряжения, вызванные конструктивными, технологическими и эксплуатационными факторами, оказывающими существенное влияние на усталостную прочность. Особенно это влияние проявляется в эле-

ментах конструкций с концентраторами напряжений. Для осесимметричных деталей данный эффект удобно оценивать с помощью среднеинтегральных остаточных напряжений.

В работах [1–3] было показано, что существует зависимость между среднеинтегральными остаточными напряжениями $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ и циклической долговечностью N резьбовых деталей. Кроме того отмечено, что остаточные напряжения влияют на величину коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K у вершины трещины.

Таким образом, должна существовать зависимость $K = f(\bar{\sigma}_{\text{ост}})$, отражающая влияние среднеинтегральных остаточных напряжений на КИН. Если такая зависимость существует, то для упрощения расчёта циклической долговечности деталей возможно вычислять КИН без учёта остаточных напряжений (обозначим его K_0) и, зная зависимость среднеинтегральных остаточных напряжений от глубины трещины $\bar{\sigma}_{\text{ост}} = f(t)$, корректировать полученное значение КИН с учётом наличия остаточных напряжений. В этом случае процесс определения циклической долговечности схематично можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} K_0(t, \sigma_{\text{ост}} = 0) \\ \sigma_{\text{ост}}(t) \rightarrow \bar{\sigma}_{\text{ост}}(t) \end{array} \right\} \rightarrow K[t, \sigma_{\text{ост}}(t)] \rightarrow N \cdot$$

Связь между напряжениями и КИН в зоне вершины трещины в простейшем виде описывается формулой Дж. Р. Ирвина [4]:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

где a – характерный размер трещины.

Предположим, что величина КИН включает две составляющие:

$$K = K_0 + K_{\text{ОН}}, \quad (2)$$

где K_0 – составляющая от напряжений, вызванных рабочими нагрузками на деталь; K_{OH} – составляющая от действия остаточных напряжений.

Поскольку среднеинтегральные остаточные напряжения – это остаточные напряжения на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины, с учётом (1) запишем:

$$K_{OH} = \bar{\sigma}_{ост} \sqrt{\pi t}. \quad (3)$$

Для проверки предложенной гипотезы рассмотрим напряжённое состояние резьбовой части болта М6 из титанового сплава ВТ16, нагруженного осевым усилием 12 кН. В поверхностном слое действуют сжимающие остаточные напряжения, вызванные накатыванием резьбы и её последующей обработкой микрошариками. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя впадины резьбы показано на рис. 1. Данные приведены из монографии [5].

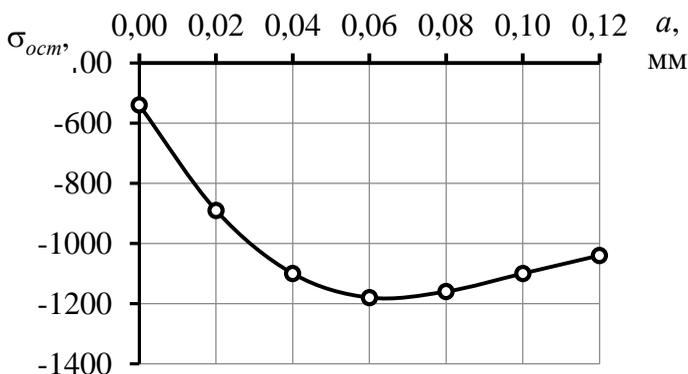


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений по глубине a поверхностного слоя болта М6 из сплава ВТ16 после накатывания резьбы и обработки микрошариками

Определим КИН для разных глубин трещины t двумя способами: «прямым» расчётом с использованием метода конечных элементов и с использованием формул (1–3). В первом случае остаточные напряжения моделируются с помощью метода термоупругости (подробно методика и примеры расчёта изложены в работе [3]). Во втором случае с использованием метода конечных элементов определяются только значения K_0 , остаточные напряжения при этом не моделируются, а учитываются за счёт добавления соответствующих величин $K_{ОН}$ в соответствии с формулой (2). Результаты расчётов и их сравнение приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчёта КИН

t , мм	«Прямой» расчёт МКЭ	Расчёт с учётом формул (1–3)				Δ , %
	K , МПа $\sqrt{\text{мм}}$	K_0 , МПа $\sqrt{\text{мм}}$	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, МПа	$K_{ОН}$, МПа $\sqrt{\text{мм}}$	K , МПа $\sqrt{\text{мм}}$	
0,03	158,5	427,0	-862,5	-264,8	162,2	-2,4
0,04	125,6	458,4	-934,8	-331,4	127,0	-1,1
0,05	90,2	481,6	-990,5	-392,6	89,0	1,3
0,06	56,3	500,4	-1030,1	-447,2	53,2	5,5
0,07	25,4	516,5	-1055,2	-494,8	21,7	14,6
0,08	-10,3*	531,1	-1068,1	-535,4	-4,3*	-
0,09	-28,8*	544,8	-1071,8	-569,9	-25,1*	-
0,10	-35,3*	557,9	-1069,6	-599,5	-41,6*	-
0,11	-37,1*	570,7	-1064,1	-625,6	-54,9*	-
0,12	-32,8*	583,3	-1056,2	-648,5	-65,2*	-

* При $K < 0$, исходя из физического смысла КИН, принимается $K = 0$.

Из табл. 1 видно, что использование формулы (2) для вычисления КИН даёт хорошее совпадение с результатами «прямого» расчёта. При этом вычисление КИН существенно упрощается, так как отпадает необходимость выполнения трудоёмкого моделирования остаточных напряжений. Значения КИН меньше нуля не имеют

физического смысла и при определении циклической долговечности приравняются к нулю. Для повышения точности предложенного способа оценки КИН в дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования по уточнению формулы (3) с учётом сложного напряжённо-деформированного состояния в зоне вершине трещины осесимметричных деталей с концентраторами.

Библиографический список

1. Злобин, А.С. Оценка влияния остаточных напряжений на малоцикловую усталость резьбовых деталей / А.С. Злобин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14. – № 4. – С. 118–125.

2. Злобин, А.С. Связь характеристик малоциклового и многоциклового усталости резьбовых деталей с остаточными напряжениями / А.С. Злобин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 128–136.

3. Злобин, А.С. Влияние остаточных напряжений на малоцикловую усталость резьбовых деталей: диссертация кандидата технических наук: 01.02.06 / Злобин Андрей Сергеевич. – Самара, 2022. – 138 с.

4. Irwin, G.R. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. – 1957. – V. 24. – No 3. – P. 361-364.

5. Иванов, С.И. Остаточные напряжения и сопротивление усталости высокопрочных резьбовых деталей / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Б.В. Минин и др. – Самара: Издательство СНЦ РАН. – 2015. – 170 с.