

2. 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.

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. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ, 1974. – Вып. 1. – С. 88–95.

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.

УДК 621.787:4

*Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.Н., Прохоров А.А.,
Яковлева П.С., Шеметов Н.А.*

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ ФРОНТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

В современном авиамашиностроении одним из основных путей достижения высоких показателей по надёжности и ресурсу работы деталей является рациональное конструирование. Оптимизация конструкций приводит к наличию различных концентраторов напряжений, обычно являющихся местом локализации разрушений при циклическом нагружении. Основными методами, позволяю-

щими значительно повысить сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений, являются применяемые при изготовлении деталей способы упрочняющей технологии, в частности, широко используемое в современном машиностроении поверхностное пластическое деформирование [1].

Работы последних лет в области механики остаточных напряжений позволили определить воздействие различных видов и режимов упрочняющей обработки на уровень остаточных напряжений. Однако влияние данных режимов на распространение и остановку усталостной трещины изучено недостаточно.

Для определения критической глубины трещины используется такая характеристика повреждённой нагруженной конструкции, как коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I (индекс I обозначает тип разрушения – отрыв).

Проанализировать зарождение, развитие и остановку трещины усталости можно при помощи расчёта коэффициента интенсивности напряжений в деталях с концентраторами напряжений.

Если известен коэффициент K_I , то поле напряжений в вершине трещины полностью определено. Данный коэффициент определяет также то, что происходит внутри зоны пластичности K_I есть мера всех напряжений и деформаций. Расширение (рост) трещины происходит в том случае, когда напряжения и деформации при вершине трещины достигают критических значений.

В среде программного продукта ANSYS был проведён расчёт коэффициента интенсивности напряжений K_I для цилиндрических осесимметричных деталей, ослабленных круговым надрезом полукруглого профиля $R = 0,5$ мм. Решалась статическая упругая задача, напряжённое состояние принималось осесимметричным. Исследовались цилиндрические детали длиной $L = 60$ мм, диаметром D в гладкой части и диаметром d в наименьшем сечении [2].

Геометрические параметры исследуемых деталей (рис. 1) приведены в табл. 1. В силу симметрии для уменьшения вычислительных затрат моделировалась не вся деталь, а лишь её четверть (рис. 2).

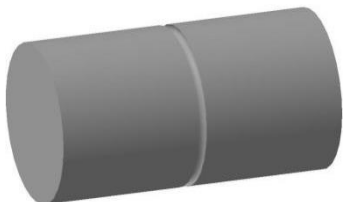


Рис. 1. Цилиндрическая деталь с круговым надрезом полукруглого профиля

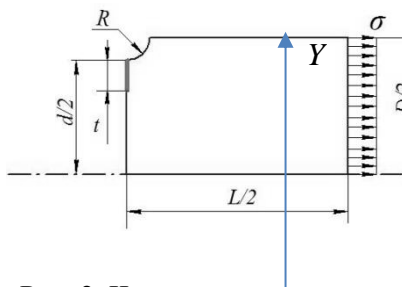


Рис. 2. Четверть цилиндрической детали

Таблица 1. Геометрические параметры цилиндрических деталей

Деталь, №	Радиус надреза R , мм	Длина L , мм	Диаметр D , мм	Диаметр d , мм
1	0,5	60	10	9,0
2			25	24
3			50	49

Конечно-элементная модель разбивалась сеткой конечных элементов типа *Plane 182*. При построении модели учитывалось, что цилиндрическая деталь и нагрузка будут симметричны относительно оси Y . На правом торце задавалась внешняя нагрузка в виде растягивающих напряжений $\sigma = 300$ МПа.

При помощи метода термоупругости [3] были введены остаточные напряжения в конечно-элементных моделях цилиндрических деталей и вычислен КИН при увеличении глубины трещины. Толщина упрочнённого слоя принималась равной 0,5 мм и отсчи-

тывалась от дна концентратора. Первоначальная деформация $\varepsilon_0 = 0,001$ принималась на поверхности образца и $\varepsilon_0 = 0$ на глубине 0,5 мм. Полукруглый надрез $R = 0,5$ мм наносился после операции упрочнения.

Графики зависимости $K_I(t)$ для упрочнённых цилиндрических деталей (с полем сжимающих остаточных напряжений) и без упрочнения приведены на рис. 3, 4.

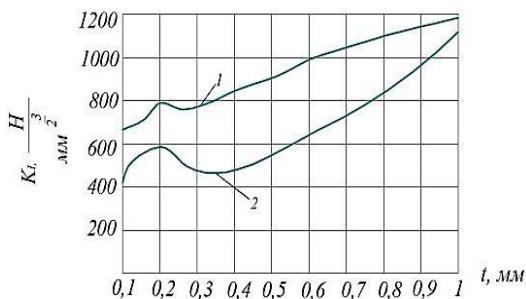


Рис. 3. Изменение $K_I(t)$ в упрочнённых цилиндрических деталях с $D = 10$ мм, $d = 9$ мм, $R = 0,5$ мм: 1 – без упрочнения, 2 – с упрочнением

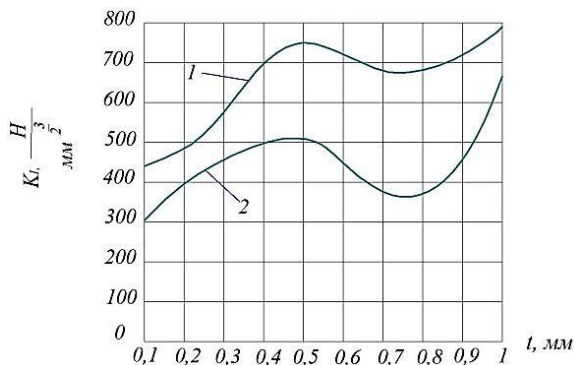


Рис. 4. Изменение $K_I(t)$ в упрочнённых цилиндрических деталях с $D = 25$ мм, $d = 24$ мм, $R = 0,5$ мм: 1 – без упрочнения, 2 – с упрочнением

Анализируя результаты, представленные на рис. 3–4, можно заключить, что при наличии сжимающих остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрических деталей график зависимости $K_I(t)$ не только принимает экстремальное значение при достижении глубины трещины $t=0,02 d$ (где d – наименьший диаметр детали), но и резко убывает вблизи этой глубины.

Вывод

Явление немонотонного увеличения КИН при увеличении глубины усталостной трещины на начальном этапе её роста можно объяснить наличием особой краевой зоны вблизи концентратора напряжений. Для упрочнённых деталей при дальнейшем росте трещины на характер зависимости $K_I(t)$ начинают оказывать существенное влияние сжимающие остаточные напряжения, за счёт чего и происходит резкое падение КИН.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II. Полые детали / В.Ф. Павлов. – Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37–40.
2. Сургутанов, Н.А. Моделирование и определение закономерностей развития трещины усталости в поверхностном слое упрочнённых деталей: дисс. канд. техн. наук: 01.02.06. защищена 13.12.2019; утв. 21.10.2020/Сургутанов Николай Андреевич. – С., 2019 – 128 с. – 9 19-5/1700.
3. Сазанов, В.П. Математическое моделирование первоначальных деформаций в поверхностно упрочнённых деталях при выборе образца-свидетеля / В.П. Сазанов, О.Ю. Семёнова, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 3(63). – С. 1-7.