

5. 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.

6. 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.

7. Радченко, В.П. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений при поверхностном упрочнении деталей / В.П. Радченко, В.Ф. Павлов // Труды МНТК «Прочность материалов и элементов конструкций». – Киев: ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины. – 2011. – С. 354-357.

УДК 621.787:539.319

**Сургутанов Н.А., Сургутанова Ю.Н., Денискина Е.А., Чуриков Д.С.,
Дерягин В.П.**

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ В ДЕТАЛЯХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Известно, что разрушение образцов и элементов конструкций от действия многократных циклических нагрузок происходит при более низких напряжениях по сравнению с однократно статическим нагружением. Следовательно, прочность, жёсткость и ресурс конструкций определяется, прежде всего, сопротивлением усталости.

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, позволяющими 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 (ППД) [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 (рис. 1). Решалась статическая упругая задача, напряжённое состояние принималось осесимметричным. Длина цилиндра принималась $L = 60$ мм, диаметр D и диаметром d в наименьшем сечении [2,3].

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

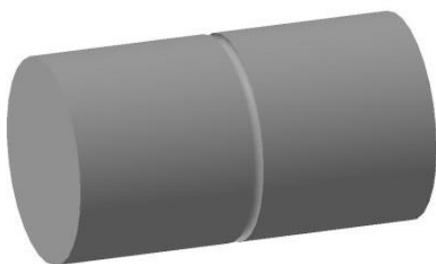


Рис. 1. Цилиндрическая деталь с круговым надрезом полукруглого профиля

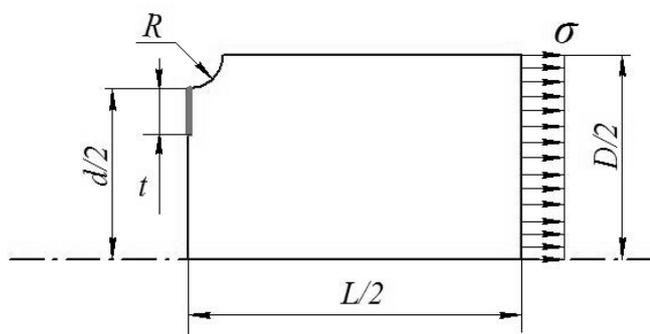


Рис. 2. Четверть цилиндрической детали

Таблица 1. Геометрические параметры цилиндрических деталей

Образец, №	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 вертикальной оси. На правом торце задавалась внешняя нагрузка в виде растягивающих напряжений $\sigma = 300$ МПа.

При помощи метода термоупругости [2] были введены остаточные напряжения в конечно-элементных моделях цилиндрических деталей и посчитан КИН при увеличении глубины трещины. Толщина упрочнённого слоя принималась равной 0,5 мм и отсчитывалась от дна концентратора. Первоначальная деформация $\varepsilon_0 = 0,001$ принималась на поверхности образца и $\varepsilon_0 = 0$ на толщине 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. 3–5.

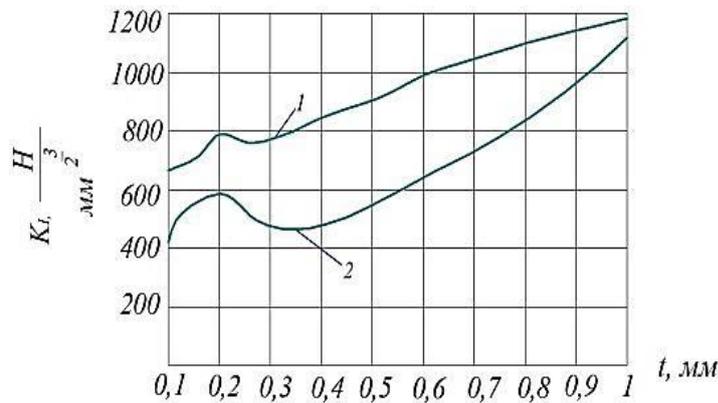


Рис. 3. Изменение $K_I(t)$ в упрочнённых цилиндрических деталях с $D = 10$ мм, $d = 9$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – без упрочнения, 2 – с упрочнением

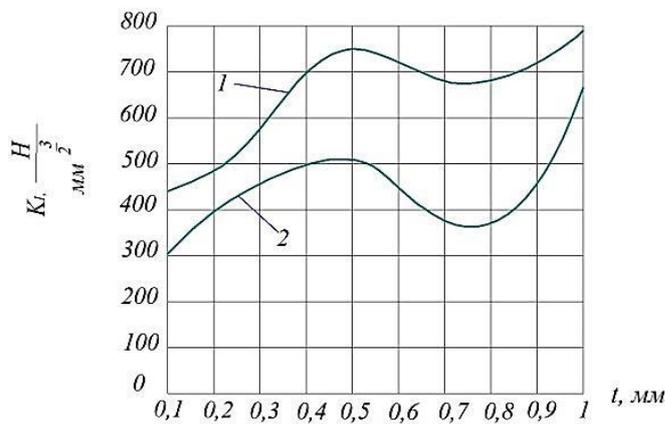


Рис. 4. Изменение $K_I(t)$ в упрочнённых цилиндрических деталях с $D = 25$ мм, $d = 24$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – без упрочнения, 2 – с упрочнением

Исследуя результаты, представленные на рис. 3 – 5, 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

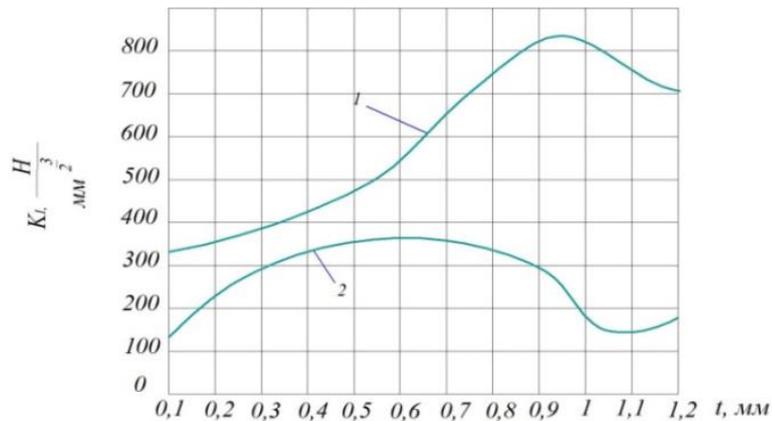


Рис. 5. Изменение $K_I(t)$ в упрочнённых цилиндрических деталях с $D = 50$ мм, $d = 49$ мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – без упрочнения, 2 – с упрочнением

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 I. Сплошные детали / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №12. – С. 37-40.
2. 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. Вакулук // Весник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 3(63). – С. 1-7.
3. 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. – Самара, 2019 – 128 с. – 9 19-5/1700.