

НАЗНАЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

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).

Повышение сопротивления усталости деталей после ППД объясняется наличием сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Эффективность ППД существенно возрастает для деталей с концентраторами напряжений, для которых невозможны другие варианты упрочняющих обработок.

Для контроля качества упрочнённых деталей методами поверхностного пластического деформирования на практике применяется способ, основанный на использовании образцов-свидетелей. В работе [1] описывается расчётный метод, основанный на известном в теории механики остаточных напряжений положении о том, что обрабатываемые опережающим поверхностным пластическим деформированием (ОППД) детали и образцы-свидетели, имеющие схожие по отношению к исходной детали геометрические размеры, получают одинаковые первоначальные деформации.

При конечно-элементом моделировании остаточного напряжённого состояния применяется метод термоупругости [1]. Использование метода термоупругости с применением конечно-элементного моделирования позволяет решать задачи о распределении остаточных напряжений в деталях сложной геометрической формы, которые подвергаются ОППД совместно с образцами-свидетелями.

В работе [2] рассматривается использование математического моделирования первоначальных деформаций в образцах-свидетелях в виде алгебраических функций, соответствующих различным режимам упрочнения. Применение такого моделирования обеспечивает практически все возможные случаи характера изменения остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое деталей.

Алгебраические выражения различных функций распределения первоначальных деформаций $f(\xi)$ приведены в табл. 1, а их графики – на рис. 1.

Таблица 1. Функции распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого поверхностного слоя деталей

Вариант	1	2	3	4
$f(\xi)$	$1 - \sqrt{1 - \xi^2}$	ξ^2	ξ	$1 - (1 - \xi)^2$

Выражение для первоначальных деформаций записывается в виде

$$\varepsilon(\xi) = \varepsilon_0 f(\xi), \quad (1)$$

где ε_0 – постоянная величина деформации; $f(\xi)$ – алгебраическая функция; $\xi = y/a$ – расстояние от поверхности детали до текущего слоя, выраженное в долях от толщины a упрочнённого слоя. Величина ξ изменяется в пределах от 0 до 1.

Функции распределения первоначальных деформаций (рис. 1 и табл. 1) соответствуют обработке деталей с различными режимами упрочнения [2].

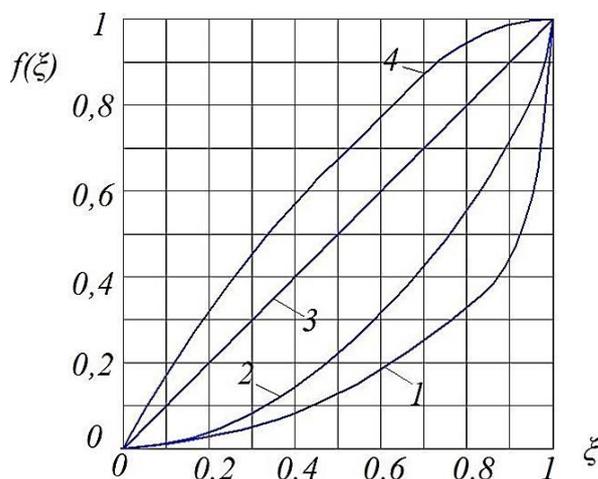


Рис. 1. Графики функции $f(\xi)$: номера кривых соответствуют функциям табл. 1

В данном исследовании для определения влияния режимов пневмодробеструйной обработки на развитие трещины усталости в цилиндрических деталях в качестве критерия оценки использовался коэффициент интенсивности напряжений (КИН) [3]. КИН вычислялся для цилиндрических деталей, ослабленных круговым надрезом полукруглого профиля с $R = 0,5$ мм и $R = 0,3$ мм, испытывающих деформацию растяжения (рис. 2).

Четверть цилиндрической детали представлена на рис. 3, где L – длина детали, D – диаметр, d – диаметр в наименьшем сечении, R – радиус полукруглого надреза, t – глубина трещины.

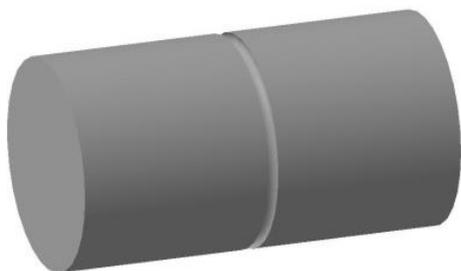


Рис. 2. Цилиндрическая деталь с круговым надрезом полукруглого профиля

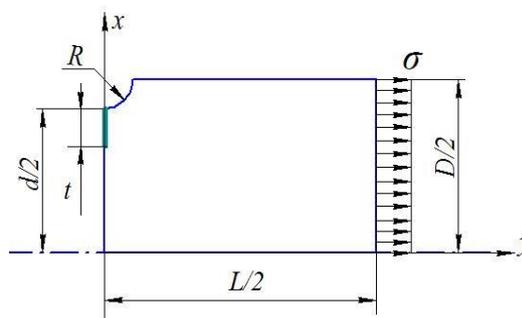


Рис. 3. Четверть цилиндрической детали

При помощи МКЭ-пакета ANSYS для детали с $D = 10$ мм, $d = 9$ мм и $R = 0,5$ мм с полем остаточных напряжений были определены закономерности изменения КИН, наблюдающиеся при увеличении глубины трещины усталости (рис. 4). Рассматривались функции распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого поверхностного слоя деталей $f(\xi)$, приведённые в табл 1.

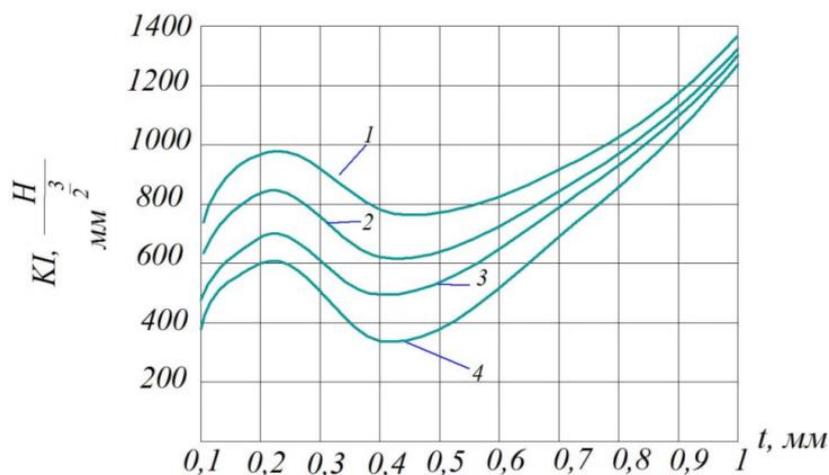


Рис. 4. Изменение КИН в детали с $D = 10$ мм, $d = 9$ мм с $R = 0,5$ мм для различных режимов упрочнения, соответствующих функциям 1 – 4 табл. 1

Из рис. 4 видно, что закономерность изменения КИН при увеличении глубины трещины t не зависит от вида распределения первоначальных деформаций по толщине упрочнённого слоя, изменяется лишь уровень КИН. Чем ниже уровень КИН, тем значительнее сжимающие остаточные напряжения влияют на остано-

ку развития трещины усталости и, следовательно, на сопротивление усталости цилиндрических деталей с концентраторами напряжений.

Вывод

Анализируя графики изменения КИН при увеличении глубины трещины усталости в деталях, подверженных различным режимам пневмодробеструйной обработки, можно выбрать наиболее оптимальный по сопротивлению усталости режим упрочнения деталей, работающих при циклическом нагружении.

Библиографический список

1. Вакулюк, В.С. Применение метода термоупругости при конечно-элементом моделировании остаточного напряжённого состояния в поверхностно упрочнённых деталях / В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, В.К. Шадрин, Н.Н. Микушев, А.С. Злобин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. – Т.16. – № 4. – С. 168-174.
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. Вакулюк. – Вестник 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.

УДК 621.787:539.319

**Сазанов В.П., Письмаров А.В., Семёнова О.Ю., Михалкина С.А.,
Остапенко В.В.**

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ

Наличие обоснованных методов измерения остаточных напряжений в резьбе позволяет изучать их влияние на сопротивление усталости. Наблюдаемые изменения циклической долговечности и предела выносливости резьбовых деталей за счёт изменения конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, как правило, связано с остаточными напряжениями во впадинах резьбы. Также известно, что влияние, прежде всего, технологии изготовления на сопротивление усталости деталей с концентраторами напряжений