

Сазанов В.П., Письмаров А.В., Вакулюк В.С., Пилипив О.М., Третьякова Е.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЕ
ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Для исследования параметров усталостной трещины при её раскрытии были использованы результаты изучения образования сжимающих остаточных напряжений при различных видах поверхностного упрочнения и их влияния на усталость цилиндрических образцов [1]. Для создания остаточных напряжений в образцах применялись следующие методы поверхностного упрочнения: гидродробеструйная обработка (ГДО), пневмодробеструйная обработка (ПДО), обкатка роликом (ОР) на двух режимах, алмазное выглаживание (АВ), обработка микрошариками (ОМ), ультразвуковое упрочнение (УЗУ), азотирование (А), цементация, борирование. Концентраторы в виде полукруглого надреза на исследуемые образцы наносились после упрочнения, то есть после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОПД). Точением с последующим шлифованием были изготовлены образцы диаметром 10 мм из сталей 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, 45, сплавов ЭИ437Б, В93 и диаметром 7,5 мм из стали ЭИ961. Механические характеристики материалов после нормализации (30ХГСА, сталь 45) и стандартной термообработки (12Х18Н10Т, ЭИ961, ЭИ437Б, В93) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические характеристики материалов

Материал	Механические характеристики				
	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
30ХГСА	788	536	18,9	65,9	1484
12Х18Н10Т	646	281	50,8	65,6	1444
ЭИ961	1090	992	11,3	67,4	2047
сталь 45	757	411	17,4	39,6	1097
ЭИ437Б	972	728	13,4	15,2	1100
В93	334	219	16,3	20,8	358

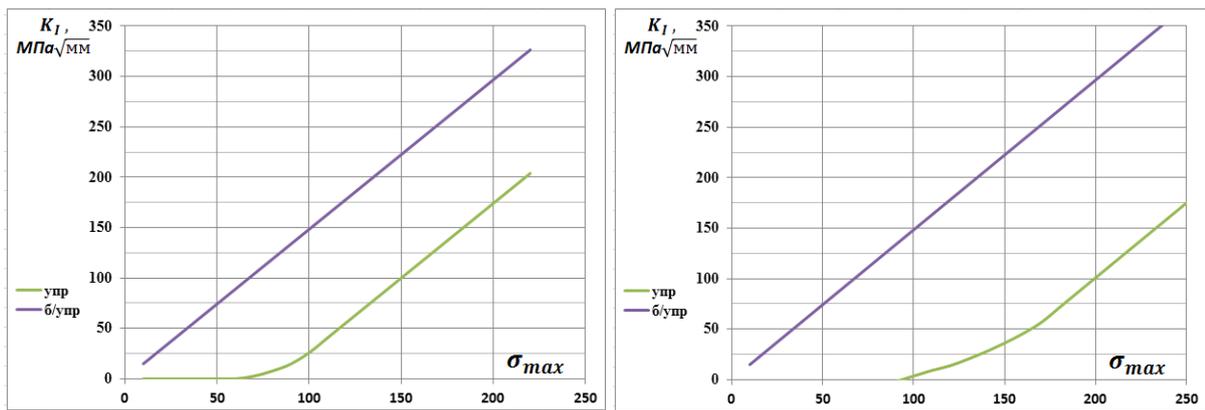
Одна половина образцов после изготовления подвергалась электрополированию, другая – поверхностному упрочнению на режимах, характерных для практики авиационных предприятий.

Для моделирования остаточного напряжённо-деформированного состояния

использованы эпюры осевых остаточных напряжений σ_z в гладких образцах после упрочняющих обработок. При выборе первоначальных деформаций учитывалось соотношение осевых σ_z и окружных σ_θ остаточных напряжений. При этом следует отметить, что после гидродробеструйной обработки выполняется условие $\sigma_\theta = \sigma_z$, а после обкатки роликом и алмазного выглаживания σ_θ меньше σ_z в 1,8 - 2,2 раза.

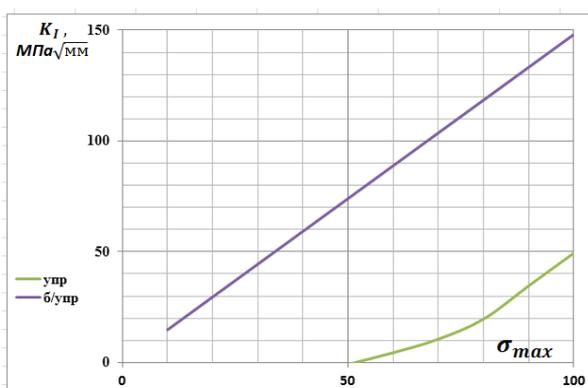
Расчётная часть исследования выполнена методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса ANSYS. Для моделирования цилиндрического образца с кольцевой трещиной в полукруглом надрезе был применён гармонический осесимметричный конечный элемент типа PLANE 83 объёмного напряжённо-деформированного состояния с восемью узлами, который позволяет на модели выполнять различные виды нагружения. Моделирование контакта берегов трещины выполнено с использованием конечных элементов нелинейной связи типа CONTA172, TARGE16. Остаточное напряжённо-деформированное состояние в виде первоначальных деформаций вводится методом термоупругости [2-5] как переменное температурное поле по толщине упрочнённого слоя.

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) K_I был определён для глубины кольцевой трещины в диапазоне от 0,05 мм до 1,00 мм, расположенной в наименьшем сечении надреза. Этот диапазон превышает размер критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ [1], [6-8] для рассматриваемых типоразмеров образцов. Рассматривалось нагружение цилиндрических образцов в положительной части симметричного цикла напряжений в случае изгиба с вращением. На рис.1 приведены графики зависимости $K_I = f(\sigma_{max})$ для пяти видов материалов, образцы которых были подвергнуты гидродробеструйной обработке. Расчётная глубина трещины для приведенных на рисунках результатов составляет 0,20 мм, что соответствует размеру критической глубины нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$ для наименьшего диаметра образца с надрезом 9,4 мм.

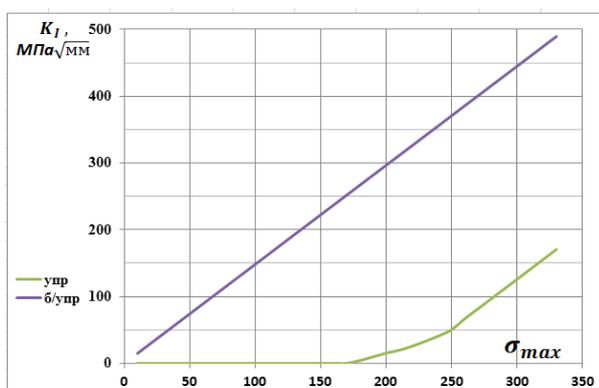


а)

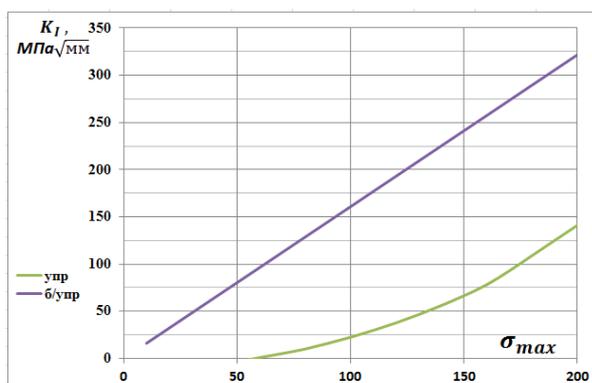
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений K_I от максимального напряжения σ_{max} (МПа) при симметричном цикле в случае изгиба с вращением: а – сталь 12Х18Н10Т; б – сталь 30ХГСА; в – алюминиевый сплав В93; г – сталь ЭИ961; д – сталь 45

Из графиков рис. 1 следует, что функция $K_I = f(\sigma_{max})$ для неупрочнённых образцов представляет собой линейную зависимость [9,10]. Для упрочнённых образцов данная зависимость является ломаной линией, которая состоит из трёх участков. Как показал анализ результатов расчёта, первый нулевой участок соответствует состоянию, когда берега трещины полностью прижаты друг к другу, то есть усталостная трещина не раскрывается, несмотря на растягивающие номинальные напряжения. Вторым участком является следующее состояние, когда трещина раскрывается изнутри при прижатой наружной части берегов. Третьим участком является линия, которая является параллельной прямой аналогичной зависимости для неупрочнённого образца.

Точки излома соответствуют переходам из одной силовой схемы нагружения образца с трещиной в другую. Из результатов расчётов также следует, что подобный характер имеют графики зависимостей коэффициента интенсивности напряжений при вершине трещины от максимального напряжения симметричного цикла и для других типоразмеров образцов и всех рассмотренных в исследовании видов упрочняющих обработок и концентраторов.

Полученные результаты расчётов и проведённые по ним исследования показали, что сжимающие остаточные напряжения в упрочнённом слое значительно изменяют силовую схему раскрытия усталостной трещины в первую очередь у образцов и деталей с концентраторами напряжений и соответственно на их сопротивление усталостному разрушению.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
2. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании [Текст] / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171-174.
3. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение I. Сплошные детали [Текст] / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 8. – С. 22-25.
4. Павлов, В.Ф. Влияние на предел выносливости величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое детали с концентратором. Сообщение II.

Полые детали [Текст]/ В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 37-40.

5. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст]/ В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15. – № 4 (44). – С. 81-85.

6. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

7. Кудрявцев, П.И. Развитие усталостных трещин в сталях в связи с поверхностным наклёпом [Текст] / П.И. Кудрявцев, Т.И. Морозова // Исследования по упрочнению деталей машин. М.: Машиностроение. – 1972. – С. 194-200.

8. Кудрявцев, П.И. Некоторые особенности строения трещин усталости в низкоуглеродистой стали [Текст] / П.И. Кудрявцев // Повышение прочности и долговечности деталей машин. Кн. ЦНИИТМАШ, М.: Машиностроение. – 1969. – №110. – С. 105-113.

9. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.

10. Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений [Текст] / Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т 1. – 448 с.