

## Библиографический список

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25–27.
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. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. – 125 с.

УДК 621.787:539.319

*Пилипиев О.М., Вакулюк В.С., Сазанов В.П.,  
Шадрин В.К., Туманов Д.В.*

### **ОСОБЕННОСТИ РАСКРЫТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В КОРСЕТНЫХ ОБРАЗЦАХ, УПРОЧНЁННЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

В данной работе приведены результаты исследования влияния остаточных напряжений на характер раскрытия усталостной трещины в корсетных образцах, поверхность которых была подвергнута цементации. Цементация – это один из видов химико-термической обработки, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде. В результате процесса образуется диффузионный слой, под которым понимается слой детали у поверхности насыщения, отличающийся от исходного материала по химическому составу, структуре и свойствам. Окончательные свойства обрабатываемые детали приобретают в результате закалки и низкого отпуска, которые выполняются после цементации. Назначение цементации и последующей термической обработки – придать поверхностному слою высокую твёрдость и износостойкость, повысить контактную выносливость и сопротивление усталости при изгибе и кручении.

Для цементации используют низкоуглеродистые, но чаще легированные стали. Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина деталей, не насыщенная углеродом, сохраняла высокую вязкость и после закалки. Так как цементация в поверхностном слое идёт с увеличением объёма, то в нём формируются сжимающие остаточные напряжения, которые повышают предел выносливости детали, поскольку усталостные трещины развиваются в результате действия растягивающих напряжений. Цементация, как и любой другой технологический процесс, требует тщательного контроля, так как неправильно назначенные параметры или нарушение их может привести к обратному эффекту. Объём и порядок контроля цементированных деталей, как правило, регламентируется соответствующими нормативными документами.

При решении поставленной в работе задачи были использованы экспериментальные результаты исследований по изучению влияния цементации на сопротивление усталости, которые были выполнены на гладких образцах-свидетелях (цилиндрические втулки) и корсетных образцах круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм (рис.1).

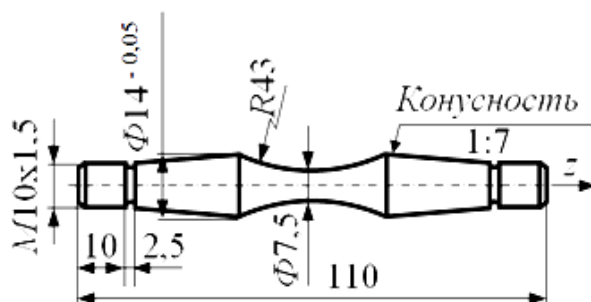


Рис. 1. Корсетный образец для испытаний на усталость

Указанные образцы были изготовлены из конструкционной легированной стали 16ХЗНВФМБ (ВКС-5). Сталь 16ХЗНВФМБ в авиастроении применяется для изготовления сортового проката и полос, цементуемых и азотируемых высоконагруженных деталей редукторов и трансмиссионных механизмов, к которым предъявляются требования высокой прочности, пластичности и вязкости сердцевины и высокой поверхностной твёрдости. Образцы после шлифования подвергались цементации на различных режимах. После цементации у корсетных образцов шлифованием обрабатывалась только коническая часть образцов, поэтому в рабочей (корсетной) части остаточное напряжённое состояние оставалось

неизменным. Режимы термической и химико-термической обработки корсетных и гладких образцов приведены в табл. 1. Распределения осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине  $a$  упрочнённого поверхностного слоя гладких образцов (цилиндрические втулки), полученные экспериментальным методом с использованием расчётных зависимостей работ [1, 2], представлены на рис. 2 .

Таблица 1. Режимы термической и химико-термической обработки корсетных и гладких образцов

№п/п	Обозначение на рис. 2	Режимы термической и химико-термической обработки
1	1	исходное состояние: закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час
2	2	ионная цементация 950°C – 1 час; отпуск 650 °C – 3 часа
3	3	цементация 940°C – 6 часов; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C ; обработка холодом: – 70°C

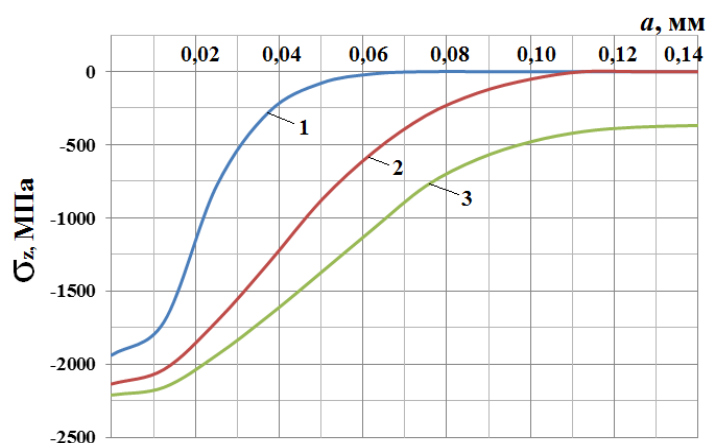


Рис. 2. Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в корсетных образцах из стали 16X3НВФМБ (ВКС-5)

Расчёты в исследовании выполнены методом конечно-элементного моделирования в среде расчётного комплекса ANSYS. Для моделирования корсетного образца с кольцевой трещиной в наименьшем сечении был применён гармонический осесимметричный конечный элемент типа PLANE 83 объёмного напряжённо-деформированного состояния с восемью узлами. Моделирование контакта берегов трещины выполнено с использованием конечного элемента нелинейной связи типа CONTA172, TARGE16. Остаточное напряжённо-деформированное состояние в виде первоначальных деформаций было введено методом термоупруго-

сти [3–5] в виде соответствующему ему переменного температурного поля по толщине упрочнённого слоя впадины.

Исследование влияния цементации на характер раскрытия усталостной трещины выполнено по результатам расчётов зависимости коэффициента интенсивности напряжений (КИН)  $K_I$  от максимального напряжения цикла при фиксированных значениях глубины трещины, расположенной в наименьшем сечении образца. Наибольший интерес представляет зависимость  $K_I = f(\sigma_{\max})$  для трещины глубиной, равной критической глубине  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости [1, 6–10], которая для сплошных цилиндрических деталей с концентраторами напряжений определяется по формуле  $t_{кр} = 0,0216D_1$ , полученной на основании многочисленных экспериментов, где  $D_1$  – диаметр наименьшего опасного сечения. Для диаметра  $D_1 = 7,5$  мм размер критической глубины нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$  равен 0,162 мм. Результаты расчёта КИН для трещины, размер которой равен  $t_{кр}$ , приведены на рис. 3. Как следует из рисунка, график  $K_I = f(\sigma_{\max})$  для неупрочнённого образца представляет собой линейную зависимость, исходящую из начала системы координат. Для упрочнённых деталей график функции является ломаной линией, которая состоит, как правило, из трёх участков.

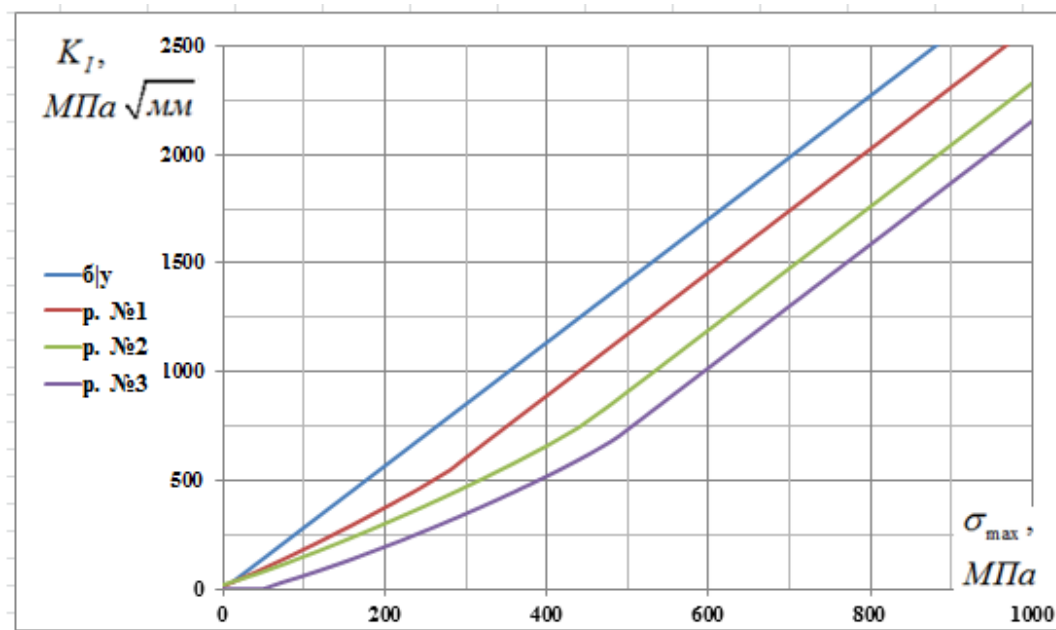


Рис. 3. Зависимости коэффициента интенсивности напряжений от максимального напряжения цикла для корсетных образцов без упрочнения и с упрочнением поверхности

Исследования результатов расчёта показали, что первый (нулевой) участок соответствует состоянию, когда берега полностью прижаты друг к другу, то есть усталостная трещина не раскрывается, несмотря на растягивающие номинальные напряжения. Второй участок представляет собой следующую схему, когда трещина раскрывается изнутри при прижатой наружной части берегов. Третий участок представляет прямую линию, которая является параллельной прямой для аналогичной зависимости неупрочнённого образца. Точки излома соответствуют переходам из одной силовой схемы нагружения образца с трещиной в последующую схему. Как видно из рис. 3, три участка имеют график, соответствующий только третьему режиму обработки корсетных образцов (табл. 2).

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

	Режимы обработки (табл. 1)	$\sigma_{-1}$ , МПа
1	режим 1	760
2	режим 2	900
3	режим 3	1040

В таблице приведены результаты испытаний на усталость корсетных образцов из стали 16ХЗНВФМБ (ВКС-5) по определению предела выносливости  $\sigma_{-1}$  при изгибе с вращением в случае симметричного цикла.

На примере рассматриваемых корсетных образцов можно проследить за влиянием полноты эпюры сжимающих остаточных напряжений на характер раскрытия трещины и предел выносливости. После ионной цементации и обычной цементации наибольшие остаточные напряжения на поверхности различаются незначительно:  $-2100$  и  $-2200$  МПа, соответственно (рис. 2, эпюры 2 и 3). Однако после ионной цементации распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя является менее полным, чем после обычной цементации – смена знака остаточных напряжений в первом случае происходит на глубине  $a = 0,1$  мм, а во втором – на глубине  $a = 0,23$  мм. В результате приращение предела выносливости образцов по сравнению с исходным состоянием (рис. 2, эпюра 1) после ионной цементации в два раза меньше, чем после обычной цементации:  $\Delta\sigma_{-1} = 140$  МПа и  $\Delta\sigma_{-1} = 280$  МПа, соответственно. С другой стороны, анализируя зависимости  $K_I = f(\sigma_{\max})$  на рис. 3, следует отметить, что чем полнее

эпюра остаточных напряжений, тем ниже уровень КИН при одинаковом максимальном напряжении цикла.

Таким образом, для оценки правильности выбранных режимов цементации поверхности детали, с точки зрения повышения сопротивления усталости, наиболее целесообразно назначать такие, при которых зависимость  $K_I = f(\sigma_{max})$  принимает наименьшее значение. Дополнительно следует отметить, что приращение предела выносливости достаточно хорошо коррелируется с уровнем коэффициента интенсивности напряжений при раскрытии усталостной трещины.

**Вывод.** На основании проведённых исследований установлено, что полученные результаты расчёта параметров при раскрытии усталостной трещины в корсетных образцах, упрочнённых на различных режимах термической и химико-термической обработки (цементации), имеют достаточно высокую сходимость с результатами проведённых испытаний на усталость.

### Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

2. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.

3. Сазанов, В.П. Моделирование перераспределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.П. Сазанов, А.В. Чирков, В.А. Самойлов, Ю.С. Ларионова // Вестник СГАУ. – 2011. – №3(27). – Ч. 3. – С. 171–174.

4. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2(68). – С. 35–40.

5. 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. – 2016. – Т. 20. – №3(73). – С. 31–37.

6. 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. – №8. – С. 22–26.

7. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

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

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

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

УДК 621.787:539.319

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

## **О РАСКРЫТИИ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЯХ С ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

Установление связи между остаточными напряжениями и сопротивлением деталей усталости является одним из важных вопросов механики остаточных напряжений [1]. В данной работе приведены результаты исследования по установлению связи между остаточными напряжениями и пределом выносливости упрочнённой резьбы с позиций линейной механики разрушения

Профиль резьбы характеризуется высокой степенью концентрации напряжений и поэтому образование усталостной трещины происходит в его впадине.