

Мокшин Д.С., Шадрин В.К., Киселёв П.Е., Пилипив О.М.

**РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕМЕНТАЦИИ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Цементацией (или науглераживанием) называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде. Для цементации обычно используют низкоуглеродистые, чаще легированные стали. Так как при цементации происходит увеличение объёма поверхностного слоя, то в нём формируются сжимающие остаточные напряжения, которые повышают предел выносливости детали, поскольку усталостные трещины развиваются в результате действия растягивающих напряжений. Объём и порядок контроля цементованных деталей, как правило, регламентируется соответствующими нормативными документами. Вместе с тем важность некоторых параметров, полученных после химико-термической обработки, определяется условиями нагружения детали при её эксплуатации. Если при расчёте на контактную выносливость определяющим параметром является твёрдость по толщине упрочнённого после цементации слоя, то при расчёте на усталость при изгибе и кручении определяющими являются уже другие параметры. Проведённые исследования [1] по изучению влияния упрочнения на сопротивление усталости показывают, что исходными данными для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей при изгибе и кручении являются зависимости (эпюры) распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя.

Разработанные современные расчётно-экспериментальные методы позволяют провести оценку эффективности процесса упрочнения поверхности тем или иным способом, а также оценить и правильность выбора параметров технологического процесса. В проведённом исследовании испытания на усталость выполнялись на корсетных образцах, а определение остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя выполнено на гладких образцах-свидетелях (цилиндрические втулки). Необходимый объём расчётов для анализа и сравнения с результатами испытаний проведён методом конечно-элементного моделирования. Влияние остаточных напряжений на повышение предела выносливости за счёт упрочнения поверхности детали оценивалось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений, определяемых по глубине

нераспространяющейся трещины усталости в опасном (наименьшем) сечении [1].

Для решения поставленной задачи использовались экспериментальные результаты исследований по изучению влияния цементации на остаточные напряжения, которые были выполнены на гладких образцах-свидетелях (цилиндрические втулки) и корсетных образцах круглого поперечного сечения с наименьшим диаметром 7,5 мм. Указанные образцы были изготовлены из конструкционной легированной стали 16Х3НВФМБ (ВКС-5). Образцы после шлифования подвергались цементации на различных режимах.

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

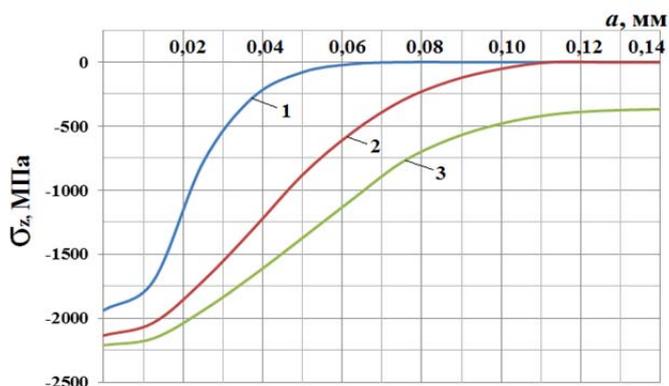


Рис. 1. Осевые σ_z остаточные напряжения в корсетных образцах из стали 16Х3НВФМБ (ВКС-5)

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 °С; отпуск 600 °С – 1 час
2	2	Ионная цементация: 950 °С – 1 час; отпуск 650 °С – 3 часа
3	3	Цементация: 940 °С – 6 часов; отпуск 650°С – 3 часа; закалка 900°С ; обработка холодом: -70 °С

Прогнозирование приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при растяжении-сжатии и изгибе в случае симметричного цикла $(\Delta\sigma_{-1})_{расч}$ наиболее точно производится по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{осм}$ [1]

$$(\Delta\sigma_{-1})_{расч} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{осм}|, \quad (1)$$

где $\bar{\psi}_\sigma$ – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$.

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ определяется по эмпирической зависимости, установленной в работе [3]

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma, \quad (2)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

По результатам расчёта методом конечно-элементного моделирования с использованием комплекса ANSYS при изгибе для корсетных образцов получено значение $\alpha_\sigma = 1,038$. Определённое с использованием этой величины по формуле (2) значение коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma = 0,528$ соответствует средним значениям $\bar{\psi}_\sigma$ по результатам испытаний для различных видов химико-термической обработки [1], которые изменяются в пределах от 0,513 до 0,553. Этот результат указывает на то, что расчёт приращения предела выносливости за счёт упрочнения поверхности, выполняемый по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений по формуле (1), справедлив и для корсетных образцов, то есть для деталей с малой концентрацией напряжений.

В табл. 2 приведены результаты испытаний на усталость корсетных образцов из стали 16ХЗНВФМБ (ВКС-5), а также результаты расчёта среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ и опытных значений коэффициента влияния $\bar{\psi}_\sigma$ для двух режимов цементации.

Таблица 2 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений

№ п/п	Обозначение на Рис. 2	Режимы обработки	σ_{-1} , МПа	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_\sigma$
1	1	Исходное состояние: закалка 900°C; отпуск 600°C – 1 час	760	-136	–
2	2	Ионная цементация : 950°C – 1 час; отпуск 650°C – 3 часа	900	-389	0,553
3	3	Цементация: 940 °C – 6 часов; отпуск 650°C – 3 часа; закалка 900°C ; обработка холодом: -70°C	1040	-672	0,522

Для определения распределения остаточных напряжений по толщине опасного сечения корсетных образцов методом конечно-элементного моделирования были проведены расчёты с использованием комплекса PATRAN/NASTRAN [4]. Оценка результатов этих расчётов показывает, что распределения осевых σ_z остаточных напряжений по толщине a поверхностного слоя в наименьшем (опасном) сечении корсетного образца в рассматриваемых вариантах термической и химико-термической

обработки практически совпадают с аналогичными распределениями для гладких образцов, причём отличие от исходной эпюры для гладкого образца не превышает 2,5–3%. Следовательно с достаточной для практики точностью критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ можно вычислять по экспериментальной эпюре остаточных напряжений гладкого образца.

Таким образом, для оценки правильности выбора режимов цементации деталей (с точки зрения повышения сопротивления усталости) наиболее целесообразно использовать образцы двух типов: гладкие для определения зависимости остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя и корсетные для испытаний на усталость. Оптимальными режимами цементации деталей будут те режимы, при которых критерий среднеинтегральных остаточных напряжений будет наибольшим.

Библиографический список

1. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. – 125 с.

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

3. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых 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.

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