

2. Биргер, И.А. Определение остаточных напряжений в образцах сложной формы / И.А. Биргер // Заводская лаборатория. – 1970. – №1. – С. 81–83.

3. Биргер, И.А. Проблемы остаточных напряжений / И.А. Биргер // Остаточные напряжения и методы их регулирования: труды Всесоюзного симпозиума. – Москва: ИПМ АН СССР, 1982. – С. 5-17.

4. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – Москва: Наука, 1979. – 341 с.

5. 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.

*УДК 621.787:539.319*

*Сазанов В. П., Шадрин В. К., Декань А. А.,  
Туманов Д. В., Попов А. Д.*

## **О РАЦИОНАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЕ УПРОЧНЕНИЯ ПЛОСКОГО СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА**

Во все времена повышение ресурса и надёжности работы деталей машин являются важнейшими задачами при их проектировании, производстве и эксплуатации. В частности, значительное повышение сопротивления многоцикловой усталости позволяет получить различные виды поверхностного упрочнения, особенно у деталей с концентраторами напряжений. Одним из таких видов является химико-термическая обработка, которая позволяет получить большую твёрдость в поверхностном слое с сохранением вязкой сердцевины, что обеспечивает высокую износостойкость и одновременно

высокую динамическую прочность. Химико-термическая обработка отличается от других видов термической обработки тем, что при этой обработке, кроме структурных изменений, происходит изменение состава поверхностного слоя путём диффузии в металл различных элементов. Наиболее широко распространёнными её видами являются цементация, азотирование, цианирование, борирование.

Азотирование деталей из конструкционных сталей, предназначенное для повышения сопротивления усталости, в настоящее время достаточно широко применяется в ряде отраслей отечественного машиностроения. Так как образование азотосодержащих фаз в поверхностном слое идёт с увеличением объёма, то поверхность азотированной детали испытывает напряжения сжатия. Напряжения сжатия на поверхности вызывают повышение предела выносливости, поскольку усталостные трещины возникают в результате действия растягивающих напряжений.

Использование технологического процесса азотирования является весьма дорогим видом химико-термической обработки, так как требует наличия специального оборудования, расходных материалов, а для получения необходимых параметров является весьма продолжительным по времени. Контроль качества азотирования поверхности деталей достаточно строго регламентирован нормативными документами, и с точки зрения износостойкости рабочих (трущихся) поверхностей наиболее важными контролируемые параметрами являются твёрдость и толщина упрочнённого слоя. Проверки выполняются как на самой детали, так и на образцах-свидетелях, которые вместе с ней проходят полный цикл технологического процесса химико-термической обработки. Однако изучение вопроса повышения предела выносливости за счёт создания при азотировании сжимающих остаточных напряжений [1-4] свидетельствует о том, что этих параметров недостаточно. Для

разработанных современных расчётно-экспериментальных методов прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей в качестве исходных данных необходимо иметь распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. Определение данного распределения, как правило, выполняется на специальных образцах-свидетелях и реже – на вырезанных из самой детали. Экспериментально правильность выбора режимов технологического процесса химико-термической обработки, в том числе и азотирования, подтверждается испытаниями на усталость на специальных образцах и, что очень важно, до натуральных испытаний изделия или механизма в целом.

В работе проведено исследование влияния глубины азотированного слоя на предел выносливости и остаточные напряжения плоских образцов толщиной 3 мм из стали 30ХГСА. Механические характеристики указанной стали в состоянии поставки составляют:  $\sigma_{0,2} = 380$  МПа,  $\sigma_g = 669$  МПа,  $\delta = 15,6\%$ ,  $\psi = 20,2\%$ . Эскиз образца приведен на рис. 1.

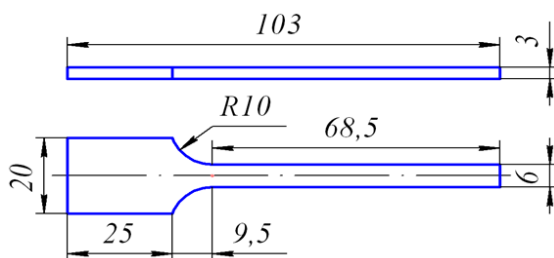


Рис. 1. Эскиз плоского образца из стали 30ХГСА

Азотирование образцов на глубину 0,05-0,25 мм для определения остаточных напряжений в поверхностном слое и испытаний на усталость проводилось в заводских условиях по вариантам, представленным в табл. 1.

Таблица 1. Варианты режимов азотирования образцов

Вариант	Глубина азотированного слоя, мм	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\Delta\sigma_{-1}$ , МПа	$\bar{\sigma}_{осм}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
1	исходное состояние	247	-	-	-
2	0,05	330	83	-146	0,568
3	0,10	471	224	-405	0,553
4	0,12	468	221	-418	0,529
5	0,20	404	157	-278	0,565
6	0,25	388	141	-261	0,540

Испытания образцов на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводились на вибростенде LT-2016/DSA10-200KVA, база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. По каждому варианту (табл. 1) испытаниям на усталость подвергалась партия из 15 образцов. Значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  приведены в табл. 1. Из приведённых в таблице данных видно, что наибольший предел выносливости образцов наблюдается при глубине азотирования 0,10-0,12 мм.

Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  определялись по методикам, изложенным в работах [1, 2]. Эпюры остаточных напряжений по толщине  $a$  поверхностного слоя образцов представлены на рис. 2, из которых следует, что наиболее полное распределение остаточных напряжений в поверхностном слое наблюдается при азотировании на глубину 0,1-0,12 мм.

Влияние остаточных напряжений на приращение предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$  образцов за счёт азотирования оценивалось по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{осм}$  [3] по формуле

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

где  $\bar{\psi}_\sigma$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости при изгибе по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

Среднеинтегральные остаточные напряжения вычислялись по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости, которая для плоских образцов толщиной 3 мм составляет 0,065 мм [4]. Значения приращения предела выносливости  $\Delta\sigma_{-1}$ , критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  и коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  представлены в табл. 1. Среднее значение коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  составляет величину 0,551, что незначительно отличается от величины  $\bar{\psi}_\sigma = 0,531$ , определённой по зависимости работы [4] для гладких упрочнённых деталей.

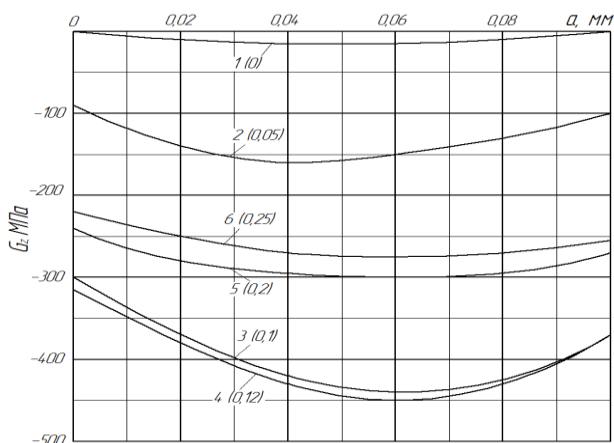


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения  $\sigma_z$  в плоских образцах из стали 30ХГСА при различной глубине азотированного слоя (номера эпюр соответствуют вариантам табл. 1)

## Выводы

1. С целью получения наибольшего эффекта по многоцикловой усталости для плоских образцов толщиной 3 мм из стали 30ХГСА

азотирование следует проводить на глубину 0,10-0,12 мм. Азотирование на бóльшую глубину приводит к снижению предела выносливости.

2. Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$  достаточно хорошо отражает влияние азотирования на предел выносливости при изгибе плоских образцов из стали 30ХГСА.

3. Для маложёстких деталей толщина азотированного слоя должна назначаться в зависимости от их геометрических параметров, так как необоснованное увеличение толщины слоя может привести к значительному снижению сопротивления усталости.

### *Библиографический список*

1. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – Москва: Машгиз, 1963. – 232 с.

2. Иванов, С.И. Определение остаточных напряжений в пластинках методом полосок / С.И. Иванов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 48. – С. 139–152.

3. 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.

4. 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.