

УДК 621.785.533:620.178.3

**К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5, УПРОЧНЕННОЙ ПОСРЕДСТВОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ****В.М. КЕНЬКО, И.Н. СТЕПАНКИН***(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)*

*Проведены усталостные испытания образцов из быстрорежущей стали Р6М5. Показано влияние остаточных напряжений сжатия диффузионно-упрочненного слоя на предел выносливости материала и характер его разрушения.*

**Введение.** Усталостная долговечность деталей зависит от напряженного состояния, шероховатости и свойств поверхностного слоя. Один из способов изменения свойств поверхностных слоев - диффузионное упрочнение, обеспечивающее изменение химического состава и возникновение в упрочненном слое остаточных напряжений сжатия. Общей причиной возникновения остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей при химико-термической обработке (ХТО) является неоднородность линейных и объемных изменений в материале. Образующиеся при ХТО твердые растворы изменяют химический состав поверхностных слоев металла. В такой ситуации правомерно рассуждать о возникновении остаточных напряжений первого, второго и третьего рода. Однако при определении работоспособности изделий в условиях контактного взаимодействия и циклических нагрузок основное внимание принято уделять учету остаточных напряжений первого рода [1,2]. Измерение внутренних напряжений в поверхностных слоях деталей является ключевой задачей для оценки работоспособности деталей с поверхностно упрочненными слоями [3]. Наибольшее распространение для этих целей нашли рентгеновский и механический методы. Последние широко применяются для оценки величины и распределения остаточных напряжений первого рода в диффузионно-упрочненных слоях инструментальных сталей ледебуритного класса. Интерпретация результатов рентгеноструктурного анализа упрочненных слоев толщиной 0,5 мм и более двухфазных материалов с когерентными основной кристаллической решетке фазами внедрения, например, вторичными карбидами, весьма затруднена [4].

**Объекты исследований и методики испытаний.** В работе осуществлена оценка величины и характера распределения остаточных напряжений в карбонитридном слое, сформированном в образцах из стали Р6М5, а также проведены усталостные испытания двух партий образцов, одна из которых подвергалась традиционной термической обработке, другая дополнительно упрочнялась низкотемпературной нитроцементацией. Толщину упрочненного слоя ( $h$ ) определяли по распределению микротвердости. На всех образцах она составила порядка 0,5 мм. Оценку остаточных напряжений проводили на образцах толщиной 2 - 20 мм, относительная толщина упрочненного слоя составляла 0,25 - 0,025. В качестве метода исследований выбрана методика послойного электрохимического растворения части образца с одной из сторон и регистрацией стрелы прогиба, возникающей в результате изменения распределения напряжений по сечению пластины. Величину прогиба определяли по трехточечной схеме устройством, оснащенным индикатором часового типа ИЧ-10мм (ГОСТ 577-68) с ценой деления 0,01 мм. Изменение толщины образцов измеряли микрометром МК 0-25-0,01 ГОСТ 6507-68 с ценой деления 0,01 мм.

Оценку усталостной долговечности проводили по схеме «растяжение - сжатие» на гантелеобразных образцах, изготовленных по ГОСТ 25.504-82. Образцы из стали Р6М5 имели структуру мартенсита, соответствующего 2 - 3-му баллу и размеры зерна 11 -му баллу. Твёрдость образцов составила 60-61 HRC.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты исследований показали, что в случае относительно большой толщины упрочненного слоя ( $h/H > 0,1$ ) возникают искажения в эпюре распределения остаточных напряжений, что обусловлено, по-видимому, значительным влиянием собственных упругих свойств слоя на возникающую величину прогиба образца.

Практически полное устранение подобной погрешности достигается при толщине слоя, не превышающей 10 % от общей толщины пластины. При глубине упрочненного 0,4 - 0,5 мм это условие выполняется для образцов толщиной свыше 5 мм. Поле остаточных напряжений характеризуется наличием на поверхности упрочненного слоя остаточных напряжений сжатия величиной до 310 МПа (рис. 1). В этих условиях снижается негативное влияние таких концентраторов напряжений, как следы от финишной обработки ручьев штампа.

Результаты испытаний неупрочненных образцов приведены на рис. 2, а. Вероятностная оценка величины предела выносливости для условий выживания 95 % образцов (вероятность разрушения 5 %) составила порядка 570 МПа. Это значение удовлетворительно коррелирует с экспериментальными данными, согласно которым из 15 образцов подвергнутых циклическому нагружению при напряжениях цикла  $\sigma_{\max} = 597,7$  МПа,  $\sigma_{\min} = 499,5$  МПа, 12 достигли долговечности  $10^7$  циклов без разрушения.

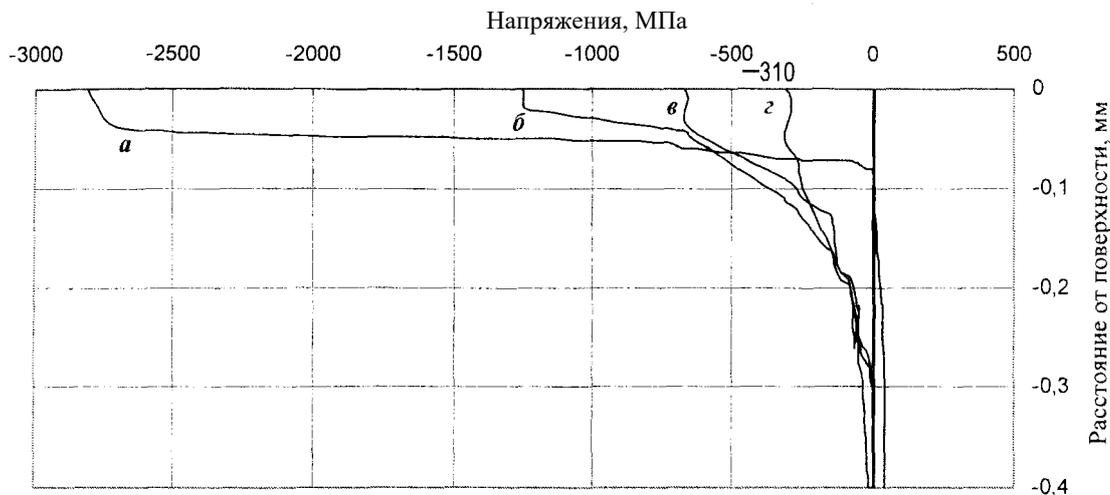


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений в образцах, упрочненных посредством низкотемпературной нитроцементации: а - толщиной 2 мм; б - 2,5 мм; в - 4 мм; г - свыше 5 мм;

Для оценки влияния нитроцементации на усталостную долговечность быстрорежущей стали Р6М5 были изготовлены образцы с диаметром рабочей части 11 мм, что обеспечило относительную толщину модифицированного слоя более 10 %. Результаты усталостных испытаний показали, что упрочнение поверхности посредством низкотемпературной нитроцементации обеспечивает повышение предела выносливости стали Р6М5 (рис. 2, б). Предел выносливости при вероятности разрушения 95 % образцов составил порядка 650 МПа, по сравнению с 570 МПа для образцов без упрочнения.

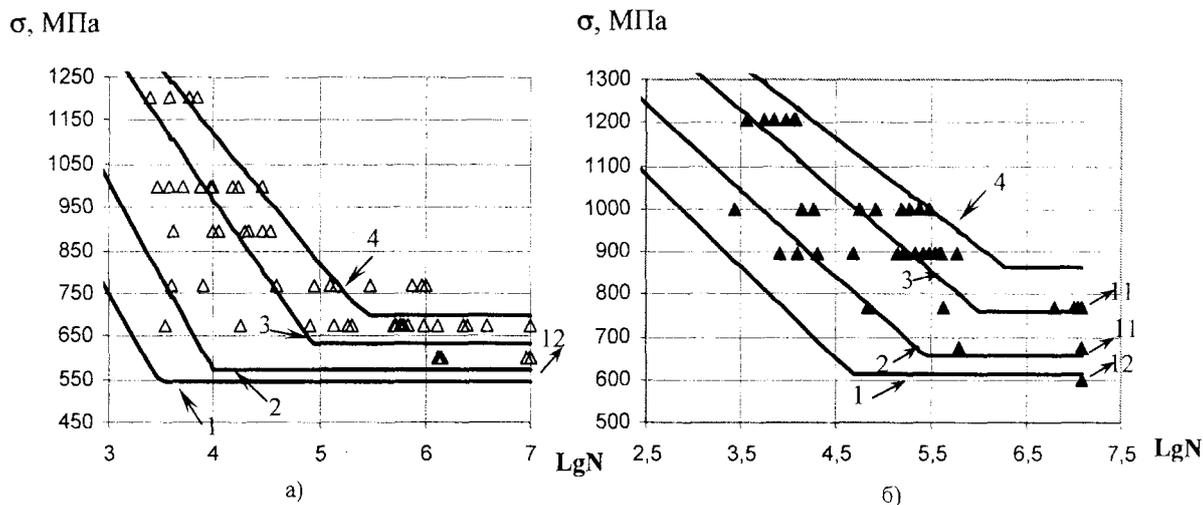


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний образцов из быстрорежущей стали Р6М5: а - без упрочнения; б - упрочнение посредством низкотемпературной нитроцементации;  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  - экспериментальные данные, отражающие максимальное напряжение цикла ( $\sigma_{\max}$ ); статистически обработанные кривые Велера для вероятностей разрушения: 1 -  $P = 0\%$ ; 2 -  $P = 5\%$ ; 3 -  $P = 50\%$ ; 4 -  $P = 95\%$

Характер разрушения образцов зависит от амплитуды действующего напряжения. В случае когда амплитуда напряжений превышает 1000 МПа, разрушение происходит в результате распространения краевой трещины по механизму хрупкого скола (рис. 3, а). Снижение амплитуды растягивающего напряжения приводит к усталостному распространению краевой трещины, при движении которой наблюдаются участки вязкого разрушения с распространением трещины на некоторых участках под углом, близким к  $45^\circ$  к оси образца (рис. 3, б).

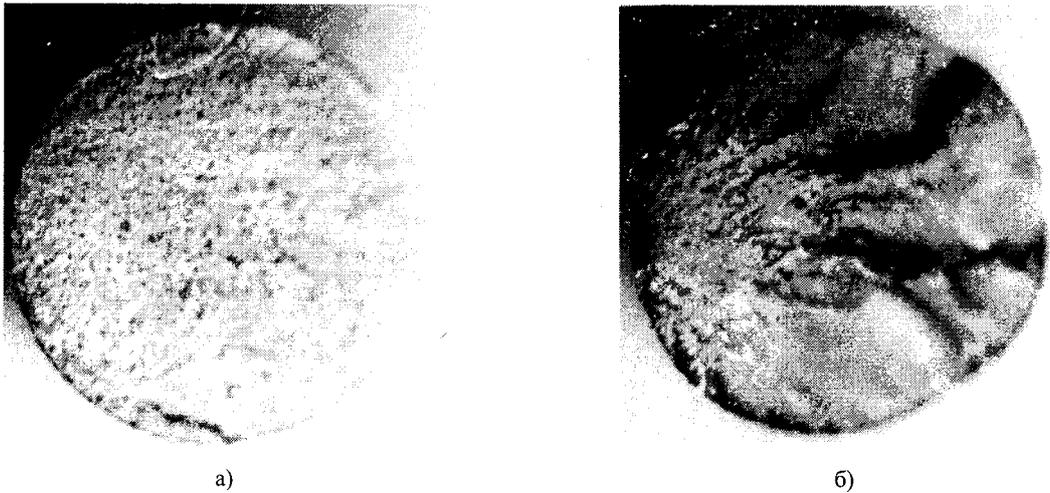


Рис. 3. Излом образцов без упрочнения поверхности:  
а - хрупкий; б - усталостный

Упрочненные образцы при больших амплитудах растягивающих напряжений разрушаются в результате распространения краевой трещины (рис. 4, а) по механизму хрупкого скола, как и образцы без упрочнения. Часть излома образует так называемое «светлое пятно», которое свидетельствует о наличии развитой внутрикристаллической зоны пластического сдвига [3]. Усталостное разрушение образцов, испытывающих напряжения, амплитуда которых близка к пределу выносливости, происходит в результате развития пластического сдвига под действием максимального касательного кристаллографического напряжения, складывающегося из величины приложенных извне напряжений и поля внутренних напряжений в металле.

Взаимодействие остаточных напряжений сжатия, возникающих в результате модификации поверхности, и напряжений растяжения, существующих при нагружении образца, приводит к возникновению максимальных растягивающих напряжений под упрочненным слоем, где и появляются внутренние источники зарождения трещин (рис. 4, б). В некоторых местах разрушение образца сопровождалось отделением модифицированного слоя от сердцевины, возможно из-за различия упругих свойств поверхности и сердцевины, что обуславливает несовместимость микродеформаций в переходной зоне и, как следствие, отделение поверхностного слоя.

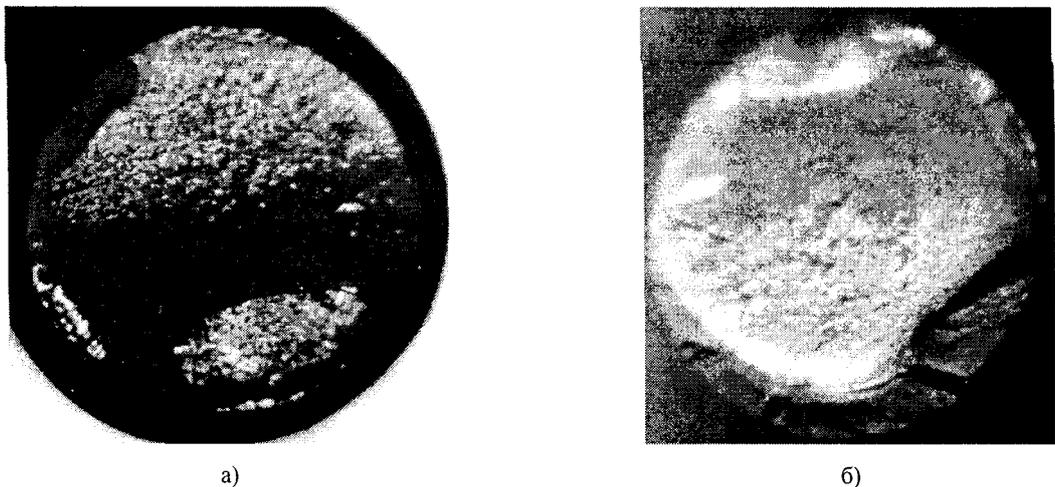


Рис. 4. Излом образцов с упрочненной поверхностью:  
а - хрупкий; б - усталостный

Суперпозиция эпюры остаточных напряжений с растягивающими напряжениями, соответствующими пределу выносливости упрочнённых образцов (рис. 5), позволяет оценить результирующее распределение растягивающих напряжений по сечению образца с упрочнённой поверхностью.

Напряжения в поверхностном слое образца с карбонитридным упрочнением составляют порядка 330 МПа, что значительно снижает вероятность разрушения образца краевой трещиной.

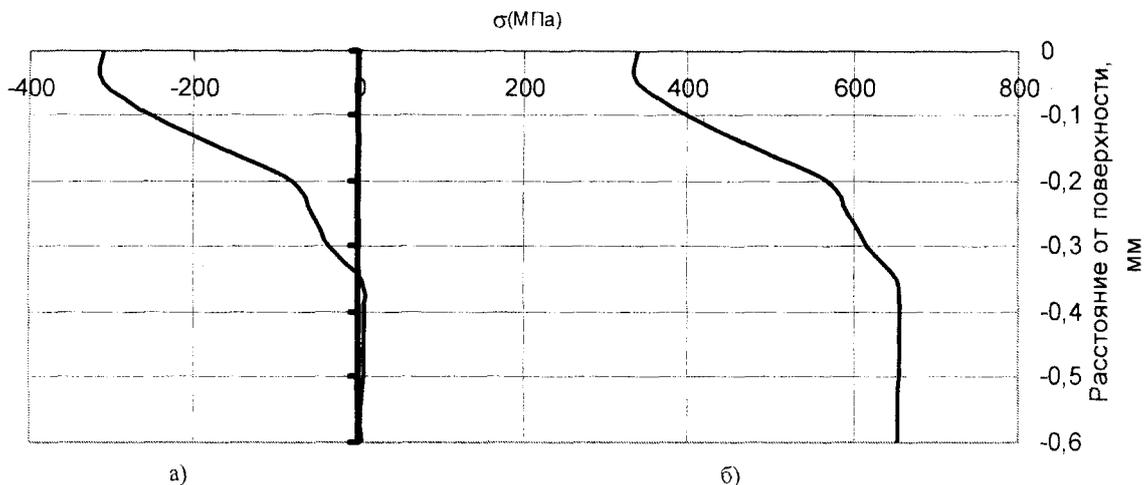


Рис. 5. Распределение растягивающих напряжений по сечению образца с карбонитридным упрочнённым слоем: а - без приложения нагрузки; б - при действии растягивающего напряжения 650 МПа

**Заключение.** Оценка величины остаточных напряжений в диффузионно-упрочненных слоях методом послойного электрохимического растворения части образца позволяет устранить искажения в интерпретации данных при исследовании образцов, относительная толщина упрочненного слоя в которых не более 10 %.

При упрочнении быстрорежущей стали Р6М5 посредством низкотемпературной нитроцементации остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое составляют порядка 300 МПа, что способствует повышению предела выносливости материала на 14 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие / Под ред. С.В. Серенсена. - 3-е изд. - М.: Машиностроение, 1975.-488 с.
2. Саверин М.М. Дробеструйный наклеп. - М.: Машгиз, 1955. -312 с.
3. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. - М.: Metallургия, 1985. - 256 с.
4. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов: Справочник. - М.: Машиностроение, 1979. - 134 с.