

1546385

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ПАХОМОВА СВЕТАНА АЛЬБЕРТОВНА

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ
ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ЦЕЛЮ
ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Специальность 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка
металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пахомов

Москва — 1994 г.

суд

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете имени И.Э. Баумана

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук
Н.М. Рыжов

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
Васильева Е.В.
доцент, кандидат технических наук
Климов В.Н.

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт
двигателестроения (НИИД)

Защита диссертации состоится " 18 " января 1996 года на
заседании диссертационного совета К 053.15.13 Московского
Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана по
адресу: 107006, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Ваш отзыв и автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью, просим выслать по адресу: _____

С диссертацией мож
им. Н.Э. Баумана.

Телефон для спра

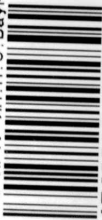
Автореферат разо

Ученый секр
диссертационн
кандидат техниче

Подписано к печати
Заказ № 561

1546385

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1546385

Пахомова С.А. Разработка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важных задач машиностроения является повышение эксплуатационных свойств зубчатых колес. Перво-степенное значение она имеет для авиационной техники, так как непосредственно связана с безаварийностью двигателей, повышением ресурса их работы.

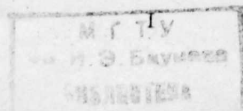
Эффективным методом улучшения качества поверхностных слоев зубьев, определяющих работоспособность цементованных и шлифованных зубчатых колес, является поверхностное пластическое деформирование. Для упрочнения зубьев колес преимущественно используют дробеударную обработку (ДО).

В настоящее время установлена высокая эффективность применения деформационного упрочнения для повышения циклической прочности деталей. Однако влияние дробеударной обработки на износостойкость и, особенно, контактную выносливость, изучено недостаточно. Отсутствуют научнообоснованные рекомендации по выбору режимов упрочнения цементуемых сталей различного химического состава.

1546385
Недостаточно исследована эффективность современных способов обработки дробью: гидродробеструйного упрочнения и упрочнения микрошариками. Поверхностное пластическое деформирование этими способами проводится без учета технологической наследственности, так как не выяснено влияние технологии предшествующей химико-термической обработки (ХТО) (в том числе новых процессов насыщения - ионной цементации и нитроцементации) на эффективность деформационного упрочнения. Кроме того противоречивый характер носят результаты исследований, посвященных влиянию последеформационного нагрева на эксплуатационные свойства зубчатых колес.

Известно, что наиболее высокой устойчивостью к тепловым и силовым воздействиям обладает мартенсит с ячеистой структурой, получаемой при одновременном осуществлении пластического деформирования и нагрева. Возможность формирования такой структуры в цементованном слое при тепловой дробеударной обработке (ТДО) - может служить фактором повышения рабочей температуры деталей.

Цель работы: повышение износостойкости, контактной и изгибной выносливости высоконагруженных зубчатых колес из цементуемых теплостойких сталей на основе разработки технологии дробеударной обработки, осуществляемой при нормальной либо повышенной температуре в сочетании с последеформационным отпуском.



Задачи исследования:

1. Определение закономерностей изменения субструктуры мартенсита цементованного слоя, твердости, остаточных макронапряжений и шероховатости поверхности в зависимости от режимов дробеударного упрочнения.

2. Установление факторов, влияющих на изменение сопротивления контактной усталости цементованных сталей различного химического состава при дробеударной обработке.

3. Оценка эффективности применения последеформационного отпуска для повышения свойств теплостойких сталей.

4. Установление влияния технологической наследственности, создаваемой ХТО в диффузионном слое теплостойких сталей (насыщенность углеродом; пластичность мартенситной матрицы; наличие остаточного аустенита), на эффективность деформационного упрочнения.

5. Оценка эффективности деформационного упрочнения теплостойких сталей, подвергнутых ионной цементации и нитроцементации.

6. Определение эффективности тепловой дробеударной обработки и последующего отпуска для увеличения сопротивления контактной усталости при повышенных температурах эксплуатации.

7. Разработка технологии поверхностной деформационной обработки, обеспечивающей повышение эксплуатационных свойств деталей из теплостойких сталей.

Научная новизна. Установлено, что изменение контактной выносливости при дробеударной обработке не коррелирует с изменением характеристик качества поверхностного слоя, а преимущественно определяется субструктурой мартенситной матрицы цементованного слоя, формирующейся в результате протекания двух конкурирующих процессов. Один из них связан с выравниванием структурной неоднородности мартенсита в результате его частичного распада и перестроения дислокационной структуры; другой – с локализацией микродеформаций и микронапряжений у структурных концентраторов. На степень развития этих процессов влияют состав стали, исходная структура цементованного слоя и режимы ДО. Причем локализация микропластической деформации ослабляется при наличии остаточного аустенита и усиливается с ростом объемной концентрации избыточной карбидной фазы. В результате, несмотря на одинаково высокий уровень показателей упрочнения (твердости поверхности, остаточных напряжений сжатия), обработка дробью (по рациональному режиму) повышает долговечность хромо-никелевых сталей, но не повышает долговечность теплостойких

сталей, у которых карбидная фаза более развита, а остаточный аустенит практически отсутствует.

Установлено, что для повышения контактной выносливости теплоустойчивых сталей, дробеударную обработку необходимо сочетать с низким отпуском. Последеформационный нагрев снижает опасные локальные напряжения около включений карбидов и уменьшает подвижность дефектов кристаллического строения мартенсита вследствие его деформационного старения. Развитие этих процессов обуславливает также повышение изгибной выносливости и износостойкости.

Вскрыто влияние предшествующей химико-термической обработки на эффективность деформационного упрочнения. Показано, что повышение релаксационной способности мартенситной матрицы путем исключения операции обработки холодом и увеличения температуры послезакалочного отпуска, а также снижение объемной доли избыточной карбидной фазы за счет уменьшения концентрации углерода в диффузионном слое — увеличивают контактную выносливость теплоустойчивых сталей. Эффект применения ДО усиливается при проведении диффузионного насыщения ионными способами за счет более однородного распределения избыточных карбидов и стабильности насыщения.

Определено влияние тепловой дробеударной обработки на субструктуру мартенсита цементованного слоя. Показано, что ДТО обеспечивает, а последеформационный отпуск усиливает формирование ячеистой дислокационной структуры, обуславливающей высокую долговечность теплоустойчивых сталей при повышенной температуре испытаний.

Практическая ценность работы. С учетом технологической наследственности, формируемой химико-термической обработкой, разработанная технология дробеударного упрочнения, выполняемого при нормальной и повышенной температуре, которое в сочетании с последеформационным отпуском, обеспечивает повышение контактной выносливости теплоустойчивых сталей в 2-4 раза, изгибной выносливости — в 1,5-2 раза и износостойкости — в 2-2,5 раза.

Результаты работы использованы при разработке и внедрении на предприятиях авиационной промышленности руководящих технических материалов РТМ № 1.4.1422 "Гидродробеударная упрочняющая обработка рабочих поверхностей зубчатых колес из цементуемых сталей" и Производственной инструкции ЛМ № 1.4.1635 "Упрочнение зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием".

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях "Несущая способность и качество зубчатых передач" в 1985 г. в Алма-ате и "Современные проблемы технологии машиностроения" в 1986 г. в Москве, а также на научных семинарах кафедры "Материаловедение и термическая обработка" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ, в том числе авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 104 наименований и приложения; содержит 151 страницы машинописного текста, 72 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулирована цель работы и ее научная новизна.

В первой главе дан обзор отечественной и зарубежной литературы по существующим способам деформационного упрочнения сталей в целях повышения контактной и изгибной выносливости, а также износостойкости.

Показано, что эффективным методом повышения качества поверхностного слоя зубьев, ответственных за эксплуатационные свойства цементованных и шлифованных зубчатых колес является дробеударная обработка. Приведено описание и дана сравнительная оценка ее различных способов. Сделан вывод о том, что технологическими преимуществами обладают гидродробеструйное упрочнение (ГДУ) и упрочнение микрошариками (УМШ). Первый — из-за применения смазывающе-охлаждающей жидкости и качественных деформирующих тел — шариков от подшипников, а второй — из-за малости размера дробы, которая обеспечивает упрочнение поверхностей впадин зубчатых колес небольшого модуля.

Установлено, что существующие данные по влиянию пластической деформации при нормальной и повышенной температуре на структуру и свойства цементованного слоя недостаточны и противоречивы. Влияние дробеударной обработки представлено без учета насыщенности углеродом цементованного слоя сталей, в том числе теплостойких, отличающихся повышенной склонностью к карбидообразованию.

На основании обзора литературных данных определены направления исследований настоящей работы.

Во второй главе описана методика экспериментальных исследований. Объектами исследования служили роликовые и плоские образцы из

цементуемых сталей разной теплостойкости: 12Х2Н4А (150 °С), 12Х2НВФА (250 °С), 20Х3МВФ-Ш (300 °С) и 16Х3НВФМБ-Ш (350 °С). В виду сложного структурного состояния цементованного слоя этих сталей, для более детального исследования субструктуры мартенситной матрицы, использовали однофазные железоникелевые сплавы 03Н22 ($\leq 0,03$ % С; 20,5-23,0 % Ni) и 25Н20 (0,2-0,3 % С; 19,5-21,5 % Ni).

Подготовку образцов проводили в заводских условиях по технологии, принятой для изготовления высоконагруженных зубчатых колес: цементация (газовая или ионная) при 930-10 °С; отпуск при 650 °С; закалка в масле от 910-920 °С; обработка холодом при -70 °С; низкий отпуск при 250-350 °С. После удаления припуска 0,15 мм шлифованием, осуществляли дробеударную обработку способами ГДУ и УМШ. ТДО состояла в обдувке дробью поверхности, нагретой до температуры 160-240 °С, контролируемой термоэлектрическим пирометром. Режим ДО и ТДО характеризовали временем упрочнения элемента поверхности $\tau_{\text{эл}}$, на которую дробь падает под эффективными углами 90-45°, и энергией деформирования E , сообщаемой дробью единице поверхности за время $\tau_{\text{эл}}$, изменяемое в пределах 1-10 минут.

Для комплексного исследования диффузионного слоя (до и после упрочнения) использовали: микроструктурный и послойный химический анализ; физико-химический фазовый анализ карбидной зоны; измерение микротвердости, шероховатости поверхности и остаточных макронапряжений, а также релаксационной стойкости и электросопротивления.

Испытания на контактную выносливость проводили в соответствии с ГОСТ 25.501-88 на роликовых образцах по схеме качения с проскальзыванием (6 %, что соответствовало условиям работы зубьев колес в зоне минимальной контактной прочности) при температуре 100, 120 и 175 °С и максимальном контактном напряжении $\sigma_{\text{zmax}} = 1800$ и 2100 МПа. Испытания на выносливость при изгибе осуществляли на машине МУИ-6000 (ГОСТ 2860-88), а на износостойкость - на машине СМЦ-2.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния дробеударной обработки на показатели упрочнения, структуру цементованного слоя и контактную выносливость исследуемых сталей.

Наклеп дробью оказывает практически одинаковое влияние на показатели упрочнения поверхностного слоя всех цементованных сталей. Показатели упрочнения растут с увеличением энергии деформирования и достигают максимальных значений при $E = 80-90$ кДж/м² ($\tau_{\text{эл}} = 1$ мин при ГДУ, $\tau_{\text{эл}} = 2$ мин при УМШ). При этом режиме деформирования степень упрочнения составляет 10-15 % при абсолютном приросте микротвердости H 0,2-80-120, толщина упрочненного слоя - 0,2-0,25 мм,

максимальные остаточные напряжения сжатия (при ГДУ на глубине ~ 40 мкм) — 1200–1400 МПа. Шероховатость поверхности не ухудшается при ГДУ и увеличивается (R_a с 0,6 до 0,9 мкм) при УМШ.

Стандовые испытания показали отсутствие корреляционной связи между показателями упрочнения и контактной выносливостью. Долговечность повышается только при дробеударной обработке хромоникелевых сталей по режиму $E=40-45$ кДж/м² ($\tau_{3д}=3$ мин при ГДУ, $\tau_{3д}=1$ мин при УМШ). Долговечность теплостойких сталей не повышается либо снижается в зависимости от режима упрочнения и марки стали.

Контактная выносливость при деформационном упрочнении в решающей степени зависит от изменений субструктуры мартенситной матрицы цементованного слоя, которая непосредственно влияет на зарождение трещин контактной усталости. Характер и степень этих изменений зависит от режимов дробеударной обработки, состава стали и исходной структуры цементованного слоя, в частности от присутствия в последнем избыточной карбидной фазы и остаточного аустенита. Поведение мартенсита при отсутствии этих фаз оценено на основании сравнительного анализа результатов исследований модельных железоникелевых сплавов 03Н22 и 25Н20. Параметром, контролирующим изменение дислокационной структуры, является плотность дефектов кристаллического строения, определяемая продолжительностью или энергией деформационного воздействия.

Прямое наблюдение структуры фольг, вырезанных из упрочненного слоя роликовых образцов этих сплавов, показало, что пластическая деформация, вызывающая образование новых дислокаций, стимулирует их взаимодействие с имеющимися структурными дефектами на границах реек. Четкость границ последних при этом теряется. В результате такого взаимодействия, протекающего в условиях локального нагрева и подчиняющегося законам синергетики, образуются протяженные в пределах одного зерна плотные дислокационные сетки и заключенные между ними объемы с относительно низкой плотностью дислокаций. Такие фрагментированные структуры относятся к диссипативным и начинают минимизацию энергии всей дислокационной системы.

Снижение среднего уровня микроискажений структуры при дробеударной обработке подтверждается уменьшением ширины интерференционной линии (220) мартенсита (рис. 1). Сформированной при $E=40-45$ кДж/м² частично фрагментированной структуре соответствует минимальное значение ширины линии. При режимах наклепа с $E>45$ кДж/м² усиливаются процессы локализации микропластической деформации и микронапряжений у структурных концентраторов, растет общая внут-

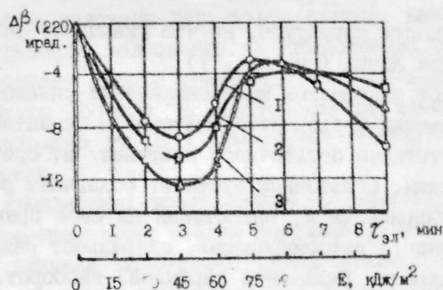


Рис. 1. Изменение физического уширения $\Delta\beta$ интерференционной линии (220) мартенсита в зависимости от времени ГДУ $\tau_{эл}$ и энергии деформирования E сталей: 1 - I2X2H4A; 2 - 20X3MBФ-Ш; 3 - I6X3HBФМБ-Ш

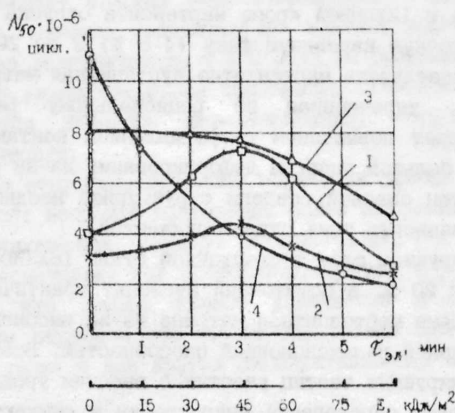


Рис. 2. Изменение долговечности N_{50} сталей I2X2H4A (1), I2X2H4A (2), 20X3MBФ-Ш (3) и I6X3HBФМБ-Ш (4) в зависимости от времени ГДУ $\tau_{эл}$ и энергии деформирования E (режимы испытаний: $\sigma_{Z\max} = 1820$ МПа (1), 2100 МПа (2,3,4); $t = 120$ °C (1,2,3), $t = 175$ °C (4))

рения напряженность структуры, на что указывает увеличение ширины интерференционной линии (см. рис. 1).

В отличие от однофазных железоникелевых сплавов, процесс пластической деформации мартенситной матрицы в цементованном слое осложняется присутствием остаточного аустенита и, особенно, избыточной карбидной фазы. Остаточный аустенит облегчает релаксацию высоких локальных напряжений и, затрачивая на свое превращение в мартенсит часть энергии деформирования, сдерживает развитие микронеоднородной деформации. Включения карбидов, наоборот, усиливают неоднородность пластической деформации, создавая у своих границ высокие микроискажения и свойственные им локальные напряжения кристаллической решетки. Высокий уровень таких напряжений служит причиной образования следов деформаций в отдельных карбидных частицах и их разрушения.

Различие в исходной структуре цементованного слоя исследуемых сталей обуславливает неодинаковое влияние дробеударной обработки на их контактную выносливость. Цементованный слой хромоникелевых сталей 12Х2Н4А и 12Х2НВФА кроме мартенсита отпуска содержит слабо развитую избыточную карбидную фазу (4-5 %) и до 20 % остаточного аустенита. В результате мартенситно-аустенитная матрица хромоникелевых сталей, упрочненная по рациональному режиму ($F=40-45$ кДж/м²), обладает повышенным сопротивлением контактной усталости (рис. 2). При большей энергии деформирования из-за развития вблизи карбидных частиц опасной степени структурной неоднородности, контактная долговечность этих сталей снижается.

В деформируемом слое теплостойкой стали 16ХЗНВ4МБ-Ш карбидная фаза достигает 20 %, а остаточный аустенит практически отсутствует. В то же время мартенситная матрица из-за высокой легированности обладает низкой релаксационной способностью. Возникающие при до около недеформируемых частиц участки с высоким уровнем микронапряжений, инициируют образование микротрещин и снижают сопротивление контактной усталости даже при "мягких" режимах упрочнения.

В стали 20ХЗМВФ-Ш, в отличие от стали 16ХЗНВ4МБ-Ш, в структуре цементованного слоя присутствует до 10 % остаточного аустенита. Последний при дробеударной обработке несколько нейтрализует отрицательное влияние карбидной фазы и сдерживает развитие опасной степени субструктурной неоднородности. По этой причине сопротивление контактной усталости стали 20ХЗМВФ-Ш начинает снижаться после до с $E>45$ кДж/м².

В четвертой главе изложены результаты влияния низкого после деформационного отпуска на долговечность теплоустойчивых сталей.

Нагрев упрочненного дробью цементованного слоя теплоустойчивых сталей при температуре 150–200 °С практически не изменяет микротвердость и незначительно (~ 15 %) уменьшает величину остаточных макронапряжений сжатия.

На основании комплексных исследований субструктуры железоникелевых сплавов и цементованных сталей определено, что последеформационный нагрев, вызывая релаксацию самых сильных искажений в решетке мартенсита, а также дополнительное упрочнение мартенсита вследствие его деформационного старения, формирует более однородную и стабильную структуру мартенсита с повышенным сопротивлением микропластической деформации. В результате эффективность дробеударной обработки для теплоустойчивых сталей проявляется лишь при ее проведении в сочетании с последующим низким отпуском (рис. 3). При этом, деформационное упрочнение следует проводить по рациональному режиму ($E=40\text{--}45 \text{ кДж/м}^2$), обеспечивающему высокое качество поверхности и не вызывающему опасных микроповреждений в цементованном слое (см. рис. 1). Однако, положительное влияние деформационного старения (повышение долговечности ~ в 3 раза по сравнению с исходной) проявляется в узком интервале температур (160–180 °С), выше которых развиваются процессы перестаривания, сопровождающиеся снижением долговечности.

В сочетании с отпуском, операция обработки дробью становится более технологичной: возможно применение более интенсивных режимов деформационного упрочнения. Высокую долговечность (в 2–2,5 раза выше исходной) обеспечивает ГДУ продолжительностью $\tau_{\text{дл}}=3\text{--}5$ мин.

Установлено, что деформационное упрочнение в сочетании с последующим низким отпуском эффективно не только для контактной выносливости, но также и для других эксплуатационных свойств зубчатых колес.

Изгибная выносливость цементованных сталей, упрочненных по рациональным режимам ДО и отпуска, повышается в 1,5–2 раза за счет формирования более стабильной дислокационной структуры мартенситной матрицы, которая увеличивает сопротивление зарождению усталостной трещины в цементованном слое.

Износостойкость исследованных сталей увеличивается в 2–2,5 раза в результате уменьшения износа приповерхностной зоны, сформированной после наклепа и отпуска по рациональным режимам.

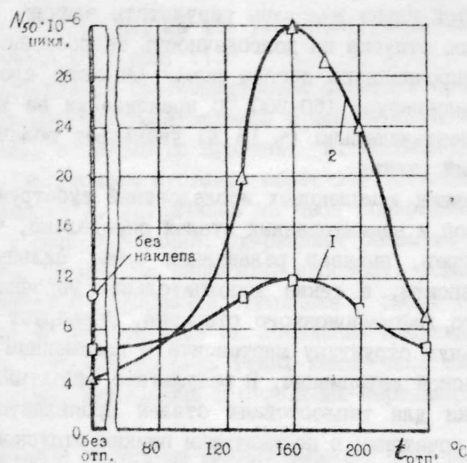


Рис. 3. Зависимость долговечности N_{50} стали 16X2NBФМБ-Ш от температуры отпуска $t_{отп}$ (время выдержки 2 ч) после ГДУ по различным режимам: 1 - $\tau_{эл} = 1$ мин; 2 - $\tau_{эл} = 3$ мин
режим испытаний: $\sigma_2 \max = 2100$ МПа, $t = 175$ °C)

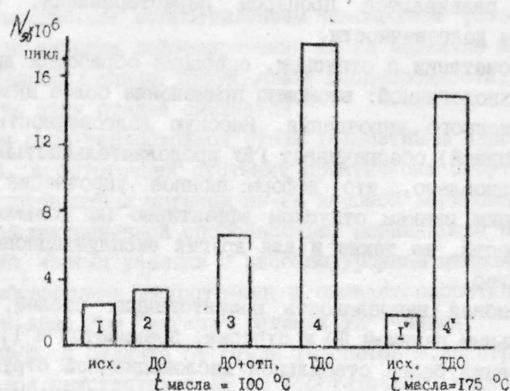


Рис. 4. Контактная выносливость стали 12X2NBФА в зависимости от температуры испытания (1-4 - $t = 100$ °C, 1', 4' - $t = 175$ °C; $\sigma_2 \max = 2100$ МПа) после различных режимов обработки микрошариками: 1, 1' - без упрочнения; 2 - ДО ($\tau_{эл} = 1$ мин); 3 - то же + отпуск (160 °C, 2 ч); 4, 4' - ТДО ($\tau_{эл} = 1$ мин, $t = 160$ °C)

В пятой главе приведены результаты исследования влияния технологической наследственности, создаваемой химико-термической обработкой, на эффективность деформационного упрочнения.

Отмечено, что к числу основных факторов, зависящих от технологии ХТО, относятся: насыщенность цементованного слоя углеродом; морфология мартенсита и концентрация углерода в нем; объемная доля избыточной карбидной фазы и ее распределение по толщине приповерхностной зоны цементованного слоя; наличие в последнем остаточного аустенита.

Все эти факторы оказывают влияние на степень проявления неоднородности пластической деформации и на сопротивление поверхностного слоя контактными нагрузкам. Главным фактором является насыщенность цементованного слоя углеродом, определяющая объемную долю избыточной карбидной фазы, а также твердость поверхностного слоя, по которой обычно в производственных условиях оценивают его качество.

Применяемый на современных предприятиях одностадийный режим газовой цементации, обуславливает высокую концентрацию углерода в диффузионном слое теплостойких сталей и связанную с ней повышенную долю избыточной карбидной фазы. При этом эффективность дробеударного упрочнения снижается. Показано, что для теплостойких сталей обработка дробью становится эффективной, если газовая цементация ($t=940 \pm 10^\circ\text{C}$, $\tau=10\text{ ч}$) проведена по двухстадийному режиму. Последний включает стадию активного насыщения и стадию диффузионного выравнивания с резко сниженной объемной концентрацией насыщающего вещества. Определено, что оптимальным является режим газовой цементации с соотношением длительностей первой и второй стадии процесса 60 и 40 %. При этом доля избыточной карбидной фазы в диффузионном слое составляет $\sim 15\%$, а твердость поверхности $\sim 62\text{ HRC}_\text{с}$.

Исследования показали, что эффект применения деформационного упрочнения усиливается, если диффузионное насыщение проводить ионными способами, отличающимися стабильностью результатов насыщения и более равномерным распределением карбидов в цементованном слое.

Существенное увеличение доли остаточного аустенита (до 25 %) в поверхностном слое стали 16ХЗНВМБ-Ш, путем исключения операции обработки холодом, в 1,5-2 раза повышает контактную выносливость деформационно упрочненных образцов. Полное влияние этого фактора связано с тем, что диспергированные прослойки аустенита облегчают протекание релаксационных процессов.

Повышение релаксационной способности мартенситной матрицы способствует также увеличению температуры послезакального отпуска и в тем большей степени, чем выше его температура. Наиболее эффективным для стали 16ХЗНВФМБ-М является отпуск при 320 °C: более высокий нагрев разупрочняет мартенситную матрицу.

Определены режимы до цементуемых сталей, учитывающие технологическую наследственность химико-термической обработки, оцениваемой, как это принято в заводских условиях, твердостью поверхности:

1) при твердости цементованной поверхности меньшей 62 HRC₀ (объемная доля карбидной фазы менее 15 %), энергия упрочнения должна составлять 60-90 кДж/м² ($\tau_{\text{эл}}$ = 4-6 мин при 1 ДУ);

2) при твердости цементованной поверхности большей 63 HRC₀ (объемная доля карбидной фазы более 20 %), необходимо ограничивать энергию деформирования в пределах E=40-45 кДж/м² ($\tau_{\text{эл}}$ = 3 мин при 1 ДУ).

Контактными испытаниями установлено, что применение рациональной технологии деформационного упрочнения, учитывающей технологическую наследственность, в сочетании с последеформационным отпуском, дает возможность повысить долговечность рабочих поверхностей зубьев колес в 2,5-3 раза.

В шестой главе показано положительное влияние тепловой дробеударной обработки на сопротивление контактной усталости теплостойких сталей при повышенной температуре испытаний.

При одновременном воздействии пластической деформации и нагрева, в цементованном слое основные изменения претерпевает "ревичное" строение пакетного мартенсита. В нем образуются участки "ковровой" составляющей структуры, служащие основой для формирования ячеек. Возникнув при E=40-45 кДж/м², ячеистая структура не исчезает при дальнейшем наклепе с E=80-90 кДж/м², а испытывает количественные изменения: уменьшается размер ячеек с 3-4 мкм до 1-2 мкм; увеличивается толщина стенок и плотность скопления в них дислокаций. Частицы избыточной карбидной фазы, усиливая неоднородность микропластической деформации в мартенситной матрице, затрудняют формирование благоприятной дислокационной структуры.

Показано, что показатели упрочнения при тепловой дробеударной обработке, осуществляемой при температуре до 200 °C практически не отличаются от полученных при обработке дробью ненагретых деталей.

Установлено, что изменение дислокационной структуры и упрочнение приповерхностной зоны цементованного слоя сопровождается

повышением сопротивления контактной усталости теплостойких сталей (рис. 4). Оптимальным является режим ТДО ($t=160^\circ\text{C}$, $E=40-45$ кДж/м²), при котором формируется незамкнутая ячеистая дислокационная структура с пониженным общим уровнем микроискажений кристаллической решетки мартенсита. При $E>45$ кДж/м² контактная выносливость снижается в связи с увеличением плотности структурных несовершенств и неравномерности их распределения.

Влияние карбидных включений на локализацию микропластической деформации при ТДО проявляется в меньшей степени, чем при ДО. При обработке дробью нагретых деталей, разрушения карбидных частиц не происходит.

Дополнительное повышение контактной выносливости теплостойких сталей вызывает низкий отпуск после ТДО. Невысокий последеформационный нагрев стимулирует релаксацию локальных микронапряжений и стабилизирование ячеистой структуры мартенсита за счет дальнейшего развития начавшегося при тепловой дробеударной обработке деформационного старения. Установлено, что оптимальным для теплостойких сталей является отпуск при $200-220^\circ\text{C}$ в течение 2 ч, обеспечивающий повышение контактной выносливости в 3-4 раза по сравнению с исходным состоянием.

Стандовые испытания показали, что упрочнение, возникшее при рациональных режимах тепловой дробеударной обработки и отпуска, термически устойчиво. Вследствие высокой стабильности сформированной при такой обработке дислокационной структуры, повышение температуры испытания от 100 до 175°C , незначительно снижает долговечность теплостойких сталей (см. рис. 4). Таким образом, тепловая дробеударная обработка дает возможность повысить температуру эксплуатации деталей из теплостойких сталей на $75-100^\circ\text{C}$.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Дробеударная обработка – важный технологический фактор управления структурой цементованного слоя, изменение которой непосредственно влияет на процессы контактной усталости. Развитие этих процессов сдерживается, если мартенситная матрица цементованного слоя имеет ячеистое дислокационное строение, пониженный средний уровень микроискажений и высокую стабильность. Формирование такой структуры возможно при строгом энергетическом воздействии, учитывающем исходную структуру цементованного слоя, состав стали и технологию предшествующей химико-термической обработки.

При энергии деформирования, превышающей рациональную, разви-

ваются процессы локализации микропластической деформации у структурных концентраторов, сопровождающиеся формированием участков структуры с высоким уровнем микродеформаций (микронапряжений), снижающих сопротивление контактной усталости. Процессы развития структурной повреждаемости интенсифицируются с увеличением в цементованном слое количества избыточной карбидной фазы и ослабляются при наличии остаточного аустенита.

2. Дробеударная обработка по рациональному режиму ($E=40-45$ кДж/м²) повышает (в 1,3-1,5 раза) контактную выносливость хромоникелевых сталей 12Х2Н4А и 12Х2НВФА вследствие того, что упрочнение цементованного слоя, в котором содержатся остаточный аустенит (до 25 %) и слаборазвитая избыточная карбидная фаза (4-5 %), не сопровождается развитием опасной степени структурной повреждаемости. Сопротивление контактной усталости теплостойких сталей 20Х3МВФ-Ш (при D_0 с $E>45$ кДж/м²), и 16Х3НВФМБ-Ш (при всех режимах D_0), снижается из-за низкой релаксационной способности высоколегированного мартенсита цементованного слоя, содержащего малое количество остаточного аустенита соответственно ~10 и ~5 %) и высокую долю карбидной фазы (до 20 %).

3. Установлено, что контактная выносливость не коррелирует с показателями упрочнения поверхностного слоя, которые, практически одинаковы у всех цементованных сталей: растут с увеличением энергии деформирования и достигают высоких значений при $E=80-90$ кДж/м². При этом степень упрочнения составляет 10-15 %, толщина упрочненного слоя - 0,20-0,25 мм, максимальные остаточные напряжения сжатия - 1200-1400 МПа. Шероховатость поверхности не ухудшается при ГДУ и увеличивается (R_a с 0,6 до 0,9 мкм) при УМШ.

4. Установлено, что для повышения контактной выносливости теплостойких сталей (в 2,5-3 раза по сравнению с исходным состоянием), дробеударную обработку ($E=40-45$ кДж/м²) необходимо сочетать с низким отпуском. Последеформационный нагрев (160-180 °С, 2 ч), вызывая релаксацию высоких локальных микронапряжений и дополнительное закрепление дислокаций атомами углерода, формирует более однородную и стабильную субструктуру мартенситной матрицы при сохранении ее высокого упрочнения.

Низкий отпуск делает операцию обработки дробью более технологичной, так как снижает необходимость строгого дозирования наклепа и расширяет диапазон режимов упрочнения ($E=40-75$ кДж/м²).

5. Установлено, что дробеударная обработка в сочетании с последеформационным отпуском по рациональным режимам повышает изгиб-

ную выносливость (в 1,5-2 раза) и износостойкость (в 2-2,5 раза) цементованных теплоустойчивых сталей.

6. Выявлено влияние технологической наследственности, создаваемой химико-термической обработкой, на эффективность деформационного упрочнения.

Высокая концентрация углерода в диффузионном слое цементованных по одностадийному режиму теплоустойчивых сталей снижает эффективность дробеударного упрочнения. Установлена целесообразность проведения процесса науглероживания по двухстадийному режиму, исключающему перенасыщение поверхности углеродом и обеспечивающему пониженное количество избыточной карбидной фазы. Определено оптимальное соотношение длительностей стадий, при котором контактная выносливость деформационно упрочненных образцов в $\sim 1,5$ раза выше, чем при одностадийном режиме насыщения.

Эффективность обработки дробью выше при применении чонной цементации и нитроцементации вследствие формирования более качественного слоя с равномерным распределением в нем карбидов и стабильности результатов насыщения.

Повышенная релаксационная способность мартенситно-аустенитной матрицы, полученная в результате исключения операции обработки холодом либо увеличения температуры послезакалочного отпуска, обеспечивает повышение контактной выносливости теплоустойчивых сталей (в 1,5-2 раза) после их деформационного упрочнения.

7. Установлена эффективность применения тепловой дробеударной обработки, которая за счет совместного воздействия пластической деформации и нагрева формирует ячеистую дислокационную структуру мартенсита, устойчивую к силовому и тепловому воздействию. Закрепление ячеистой структуры и снижение локальных микронапряжений при последеформационном отпуске, дополнительно увеличивает контактную выносливость, а также расширяет диапазон температур использования теплоустойчивых сталей. Определены рациональные режимы ТДО ($t=160^\circ\text{C}$, $E=45\text{ кДж/м}^2$) и отпуска ($200-220^\circ\text{C}$, 2 ч), повышающие в 3-4 раза долговечность и на $75-100^\circ\text{C}$ температуру эксплуатации деталей.

8. Разработана технология поверхностного деформационного упрочнения рабочих поверхностей зубьев колес, повышающая их эксплуатационные свойства. Она включает: для хромоникелевых сталей - дробеударную обработку с $E=40-60\text{ кДж/м}^2$ и отпуск при $130-140^\circ\text{C}$, 2 ч; для теплоустойчивых - дробеударную обработку с $E=40-60\text{ кДж/м}^2$ при нормальной или повышенной температуре ($160-180^\circ\text{C}$) и отпуск соответственно при $160-180^\circ\text{C}$ или $200-220^\circ\text{C}$, 2 ч.

1. Пахомова С.А. Контактная выносливость цементованных сталей, упрочненных поверхностным пластическим деформированием и старением // Современные проблемы технологии машиностроения: Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. - М., 1986. - С. 85-86.
2. Пахомова С.А., Герасимова Н.Г., Рыжов Н.М. Контактная выносливость цементованных сталей, упрочненных поверхностным пластическим деформированием // Несущая способность и качество зубчатых передач и редукторов машин: Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. - Алма-Ата, 1985. - С. 100-101.
3. Рыжов Н.М., Гуляев А.А., Пахомова С.А. Структура и контактная выносливость цементованной стали 12Х2Н4А после поверхностного пластического деформирования // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1986. - № 3. - С. 30-33.
4. Рыжов Н.М., Пахомова С.А., Архипов А.М. Повышение контактной выносливости цементованных зубчатых колес // Прогрессивные методы термической и химикотермической обработки сплавов / Под ред. Б.Н. Арзамасова. - М. - 1987. - С. 36-45.
5. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Изменение структуры и свойств мартенсита железоникелевых сплавов при дробеударном упрочнении // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1990. - № 6. - С. 23-25.
6. Рыжов Н.М., Пахомова С.А. Влияние тепловой дробеударной обработки на субструктуру мартенсита цементованных сталей и их контактную выносливость // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1993. - № 3. - С. 75-82.
7. Рыжов Н.М., Пахомова С.А. Эффективность теплового дробеударного упрочнения цементованных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1994. - № 5. - С. 21-24.
8. Упрочняющая обработка рабочих поверхностей зубчатых колес из цементуемых сталей. Руководящий технический материал. РТМ. - № 1.4.1422-85. - М.: НИИД, - 1985. - 23 с.
9. Упрочнение зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием. Производственная инструкция. ПИ. - № 1.4.1635-86. - М.: НИИД, - 1986. - 20 с.
10. А.С. № 1356470 А1 СССР, МКИ^{*} С21Д8/00. Способ термомеханического упрочнения деталей из цементуемых сталей / Н.М. Рыжов, С.А. Пахомова. - 1987.