

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.793.6:669.58

ТКАЧЕНКО
Глеб Александрович

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ
И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Константинов Валерий Михайлович**,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Материаловедение в
машиностроении» Белорусского национального
технического университета.

Официальные оппоненты: **Купченко Геннадий Владимирович**,
доктор технических наук, доцент, заведующий
лабораторией литых композиционных
материалов ГНУ «Физико-технический
институт НАН Беларуси»;

Степанкин Игорь Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Материаловедение в
машиностроении» УО «Гомельский
государственный технический университет
имени П.О. Сухого»

Оппонирующая организация ГНУ «Объединенный институт машиностроения
НАН Беларуси»

Защита состоится «05» июля 2011 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по
защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном
техническом университете по адресу: 220013, Минск, проспект
Независимости, 65, корп. 12, ауд. 310, тел. (факс) ученого секретаря
(017) 292-54-06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского
национального технического университета.

Автореферат разослан «02» июня 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

И.А. Трусова

© Ткаченко Г.А., 2011

© БНТУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенными технологиями повышения конструкционной прочности стальных изделий являются термическая обработка (ТО) и химико-термическая обработка (ХТО). Основной технологией считается цементация специальных низкоуглеродистых легированных сталей с последующей закалкой и низким отпуском. В результате такой обработки формируется твердый, износостойкий слой, а сердцевина изделия сохраняется мягкой, вязкой и достаточно прочной, чтобы сопротивляться нагрузкам без разрушения. Однако если подобную технологию перенести на детали из среднеуглеродистых низколегированных сталей, где прокаливаемость выше, то вязкость, а, следовательно, надежность изделия будет низкой, так как мартенсит – хрупкая структура, а применение отпуска на троостит или сорбит не обеспечит высокую износостойкость (долговечность) поверхности и сердцевины готового изделия. Существенными технологическими недостатками цементации являются энерго- и ресурсоемкость, длительное время обработки стального изделия. Структура среднеуглеродистой низколегированной стали после длительной ХТО крупнозернистая и требует дополнительных операций для измельчения зерна.

Поэтому в последнее время появилось много научных публикаций, посвященных разработкам технологии печной термоциклической обработки (ТЦО) металлов и сплавов (В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский, С.Ф. Забелин, С.А. Астапчик, А.И. Гордиенко, А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин и др.). В них приведены результаты изучения закономерностей влияния режимов ТЦО на процессы диффузионного насыщения, структурного состояния и конструкционной прочности стальных изделий. Однако остались неизученными структурообразование диффузионных слоев, поверхности и сердцевины, механические и трибологические свойства конструкционной стали, сформированные в процессе индукционной циклической обработки.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Работа выполнена в рамках следующих заданий государственных программ: ГНТП «Технологии и оборудование машиностроения», подпрограмма «Технологии машиностроения», задание № 1.49 «Разработать и освоить комплекс технологий повышения долговечности корпусов плугов отечественного производства» (2004–2008 г., ГР № 20044019); ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии», задание 3.22 «Разработка и исследование способов упрочнения быстроизнашивающихся деталей почвообрабатывающих машин регулированием структурной

наследственности в процессе индукционной наплавки композиционных металлических порошков» (2006–2009 гг., ГР № 2006569); ГППНИ «Металлургия», задание 4.12 «Энергосберегающая оптимизация термической обработки поковок в процессе металлургического передела в условиях кузнечного производства МАЗа» (2008–2010 гг., ГР № 20081081), а также в рамках студенческого гранта «Исследование энергосбережения при термической и химико-термической обработке деталей плуга» (2008–2009 гг., ГР № 20080671).

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является создание технологии повышения конструкционной прочности изделий за счет установленных закономерностей структурообразования поверхности и сердцевины сталей при изотермическом и термоциклическом режимах ТО и ХТО стальных изделий, а также комплексного упрочнения поверхности и сердцевины с макрогетерогенным распределением структур по функциональным зонам детали.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

- достичь интенсификации диффузионного насыщения стальной поверхности под действием скоростного индукционного нагрева, высокой температуры и циклических фазовых превращений;

- установить закономерности влияния фазового наклепа на структурообразование поверхности и сердцевины деталей из конструкционных сталей во время циклических фазовых превращений при индукционном нагреве;

- установить закономерности влияния циклических фазовых превращений с индукционным нагревом на структурообразование диффузионного слоя и сердцевины деталей из конструкционных сталей, предварительно подвергнутых нитроцементации;

- определить трибологические и механические свойства диффузионных слоев и сердцевины стальных деталей, упрочненных по разрабатываемой технологии.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Впервые экспериментально установленный и теоретически обоснованный эффект микропластической деформации и протекания рекристаллизации зерен на поверхности и в сердцевине стальных образцов при индукционной циклической обработке, заключающийся в образовании разноразмерности и формировании устойчивой полигональной структуры в образцах. Эффект проявляется в интервале скоростей нагрева 30...40 °C/с и охлаждения 3...5 °C/с за 4 и более циклов тепловосстановления.

2. Эффект интенсификации (замедления) диффузии атомов внедрения под действием циклической микропластической деформации зерен, который проявляется при определенном сочетании числа циклов

теплосмен и продолжительности изотермических выдержек в аустенитной области.

3. Режимы ХТО с циклическим индукционным нагревом, которые обеспечивают повышение конструкционной прочности болтов в 1,6 раз относительно серийных деталей. Режимы циклической ТО стали, которые обеспечивают повышение конструкционной прочности долот в 1,7 раз относительно серийных деталей.

4. Технология упрочнения стальных изделий, заключающаяся в разделении детали на зоны, которые отвечают за определенные свойства изделия, комплексном упрочнении поверхности и сердцевины с контролируемым макрорегетерогенным распределением структур по зонам детали.

Личный вклад соискателя. Вместе с научным руководителем В.М. Константиновым определены цель и задачи исследования, обсуждены результаты экспериментальных данных и их теоретическое обоснование. Все практические результаты работы получены соискателем самостоятельно.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях: СНТК «Новые материалы и технологии их обработки», Минск, БНТУ (2007, 2009); МНТК «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин», Новополоцк, ПГУ (2007, 2009); МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов», Минск, ФТИ НАН Беларуси (2007, 2009); МНТК «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, БНТУ (2007, 2008, 2009, 2010); МНТС в Корейском институте материаловедения (2008); МНТК «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка», Минск, ИПМ НАН Беларуси (2009); МНТК «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева», Санкт-Петербург, ЛЭТИ (2009); МНТК «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств», Барнаул, АлтГТУ (2009); МНТК «Инженерия поверхностного слоя деталей машин», Минск, БНТУ (2010).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 29 работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных журналах и сборниках, 16 статьях в сборниках и материалах конференций, в 3 тезисах докладов на научно-технических конференциях. Получено 2 патента Республики Беларусь и 2 решения на выдачу патента на изобретение. Объем опубликованных материалов составляет 3,3 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем работы составляет 138 страниц, она содержит 90 страниц основного текста, 47 иллюстраций, 16 таблиц, библиографический список из 132 наименований, 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и необходимость решения конкретных задач в области разработки новых технологий комплексного упрочнения стальных изделий.

В первой главе рассмотрены традиционные способы повышения конструкционной прочности стальных изделий. Установлено, что ТО и ХТО с объемным печным нагревом имеют ряд недостатков технологического плана, такие как энерго- и ресурсоемкость, длительное время обработки стального изделия, отсутствие возможности локального упрочнения изделий, трудность осуществления воздействия на сталь с целью интенсификации твердофазной диффузии. Структура среднеуглеродистой низколегированной стали после длительной ХТО обычно крупнозернистая и требует дополнительных операций для измельчения зерна (двойная закалка или нормализация и закалка). Структура, получаемая после сквозной закалки и отпуска, не во всех случаях может обеспечивать высокую конструкционную прочность стального изделия.

Методы поверхностного упрочнения деталей, такие как закалка с индукционного нагрева, лазерного нагрева позволяют получить высокую твердость поверхности, а сердцевину сохранить вязкой и прочной. Такое сочетание свойств обеспечит износостойкость и одновременно высокую динамическую прочность. Однако толщины от 0,2 до 5 мм упрочненного слоя не совсем достаточно для изделий, работающих в абразивной среде или в паре металл–металл, где в работе участвует все сечение детали. Определено, что для ряда деталей (долота, зубья борон, лемеха, ножи кормоуборочных комбайнов, болты и др.) требуется упрочнять не только поверхностный слой, но и сердцевину. Это связано с тем, что в условиях абразивной среды после выработки поверхностного слоя происходит обнажение мягкой сердцевины, которая не обеспечивает высокой долговечности изделия.

Для реализации комплексного упрочнения стали в производственных условиях можно использовать ТЦО с индукционным нагревом. Использование циклических фазовых превращений во время ХТО позволяет не только повысить скорость формирования диффузионного слоя за счет мелкозернистой структуры аустенита, но и улучшает механические свойства стали (вязкость, прочность, износостойкость), что в свою очередь повышает конструкционную прочность стального изделия, а сам процесс упрочнения сделать энерго- и ресурсосберегающим. При ТЦО с индукционным нагревом

можно использовать и более высокую температуру при ХТО, которая в значительной мере повышает коэффициент диффузии.

Во второй главе приведены методики исследований. Для исследований были выбраны образцы 10×10×55 мм из конструкционных сталей 20, 40Х, 65Г. Металлографические исследования образцов проводили на оптических микроскопах «Planag», МИМ-7. Диаметр зерна и балл определяли по ГОСТ 5639-65. МикродюрOMETрические исследования проводили на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76. Твердость поверхности определяли на приборах Роквелла ТК-2М по ГОСТ 9013-78. Рентгеноструктурный и фазовый анализ выполняли на дифрактометре D8 ADVANCE в CuK_α излучении по методике съемки поликристаллов. Дифрагированное отражение от поверхности образца монохроматизировалось пиролитическим графитовым монохроматором. Рентгеноструктурный анализ дифрактограмм проводили в программном обеспечении «TOPAS» по методу Ритвельда. Фазовый и полуколичественный анализ дифрактограмм выполнен в программном обеспечении «DIFWIN» в объеме картотеки PDF-2. Фрактографию поверхности стальных образцов выполняли на сканирующем электронном микроскопе «TESKAN VEGA».

Для испытаний на временное сопротивление разрыву использовали ГОСТ 1759.4-87 на определение класса прочности болтов. Трибологические испытания образцов проводили в условиях незакрепленных абразивных частиц на специально модернизированной и запатентованной установке. Статистическую обработку результатов измерений проводили стандартными методами.

Третья глава посвящена интенсификации диффузионного насыщения при электро-химико-термической обработке (ЭХТО) из паст в стационарном и циклическом режимах.

Установлено, что во время ЭХТО с индукционным нагревом (стационарный режим) структурообразование диффузионного слоя может проходить как в твердофазном режиме, так и при локальном оплавлении поверхности. В твердофазном режиме при температуре 1050...1100 °С диффузионные слои формируются толщиной от 30 до 280 мкм в течение 15...120 секунд с твердостью по толщине слоя 900±50 HV 0.1. Основными фазами на поверхности стали 40Х после насыщения являются аустенит (25 %), цементит и структура мартенсита. Во время локального оплавления поверхности, вызванного высокими температурами (1100...1200 °С) и повышением содержания углерода, насыщение происходит в жидкой среде, что значительно интенсифицирует процесс, позволяя получить (сталь 40Х) за 90 секунд слой белого доэвтектического чугуна толщиной до 900 мкм и твердостью, после закалки от температур насыщения, 800...1000 HV 0.1. Подобный эффект наблюдается на стали 20 после увеличения температуры насыщения, где помимо нитроцементованного слоя формируется

ледебуритный слой толщиной 30...40 мкм. Согласно литературным данным, повышение твердости ледебурита обусловлено образованием эвтектики тонкого сотового строения, что является закономерностью при ускоренном охлаждении эвтектического сплава.

Основными причинами интенсификации диффузии атомов внедрения в стали при ЭХТО с индукционным нагревом является высокая температура процесса, которая повышает коэффициент диффузии, согласно литературным данным, с $1,46 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ ($900 \text{ }^\circ\text{C}$) до $4,85 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ ($1050 \text{ }^\circ\text{C}$). Второй причиной является высокая скорость нагрева ($30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$), которая смещает начало фазовых превращений в область более высоких температур и их продолжительность снижается. В результате удается реализовать зародышевый механизм диффузии, при котором атомы внедрения перемещаются по границам зерен и блоков мозаики – легким путем диффузии.

В работе изучена циклическая ЭХТО стали 20. Схема диффузионного насыщения заключалась в многократных теплосменах и изотермических выдержках с различной продолжительностью в цикле, но с суммарным временем насыщения 2 минуты.

Установлено, что циклическая ЭХТО приводит к увеличению толщины диффузионного слоя с 280 мкм при изотермическом процессе до 340 мкм при циклическом нагреве. Максимальная диффузионная подвижность наблюдается при четырехкратном циклическом нагреве с изотермическими выдержками по 30 секунд в аустенитной области. Интенсификация диффузии происходит из-за возникающих фазовых, термических, структурных напряжений, которые образуются в процессе фазовых превращений, неравномерного нагрева. В результате возникающие напряжения релаксируют путем микропластической деформации, которая сопровождается процессом рекристаллизации. Многократные фазовые переходы приводят к измельчению зерна, что способствует увеличению числа центров образования аустенитных зерен при каждом цикле нагрева. Последнее дает возможность увеличить протяженность границ зерен и блоков мозаики – легких путей диффузии.

Во время циклической ЭХТО выявлена особенность формирования диффузионного слоя. Установлено, что с увеличением количества теплосмен (до 8) и уменьшением времени изотермической выдержки в аустенитной области, при каждом цикле (выдержка 15 секунд), кинетика насыщения приближается к стационарному режиму (30 мкм за 15 секунд). Замедление процесса связано с недостаточным временем пребывания в аустенитной области в момент диффузии. Уменьшение подвижности атомов внедрения, по-видимому, обусловлено формированием термически устойчивой полигональной структуры, способствующей образованию вакансий, которые замедляют процесс диффузии.

Для того чтобы подтвердить факт образования полигональной структуры, были выбраны образцы сталей 20, 40X с крупнозернистой структурой (5 баллов), полученной предварительным отжигом при 1000 °С в защитной атмосфере (древесный уголь) в течение 2 часов. Схема ТЦО была выбрана с полными фазовыми превращениями, а интенсивность теплосмен составила 1, 2, 4, 6 циклов со скоростью нагрева и охлаждения в циклах 30...40 °С/с и 3...5 °С/с соответственно.

Было установлено, что индукционная ТЦО (4 и более циклов) измельчает структуру до 9 (сталь 20) и 13 (сталь 40X) баллов. Однако из-за объемных полиморфных превращений происходит накопление напряжений второго рода, которые вызывают микропластическую деформацию зерен, сопровождающуюся рекристаллизацией на поверхности и в сердцевине стального образца. На поверхности (сталь 20) образца (4 и более циклов) рекристаллизация наклепанных зерен доходит до вторичной стадии, что сопровождается увеличением диаметра отдельных зерен (с 10 мкм до 125 мкм) и снижением твердости (с 178±10 HV 0.02 до 157±10 HV 0.02), рисунок 1. Такая картина характерна для слабдеформированного металла, когда рост зерен происходит за счет слияния в одно крупное путем «растворения» границ. Процесс слияния зерен не требует значительных диффузионных процессов, и, главное, слияние может происходить одновременно по всем поверхностям межзеренного раздела.

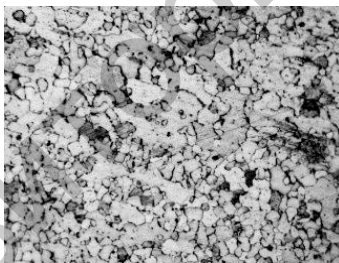


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности образца после 6 циклов (сталь 20)

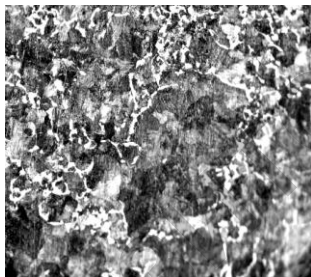
В сердцевине образцов сталей 20, 40X рекристаллизация не проходит в полном объеме, а достигает стадии полигонизации, сопровождаемой ростом блоков мозаики с 150 нм (отжиг) до 300 нм (6 циклов). Это подтверждается рентгеноструктурным анализом образцов (таблица 1). Последующий изотермический отжиг показал, что полигональные структуры довольно устойчивы и сохраняются длительное время, препятствуя протеканию обычной рекристаллизации. Было выявлено, что изменение механических свойств (снижение твердости) и микроструктуры стали начинается только после 4 часов рекристаллизационного отжига. Структура сталей 20 и 40X из

мелкозернистой превращается в структуру, характеризующую вторичную стадию рекристаллизации. В сердцевине стальных образцов происходит избирательный рост зерен, диаметр которых доходит до 1500 мкм с твердостью 120 ± 10 HV 0.02, а сохранившиеся в структуре мелкие зерна (диаметр 15 мкм) имеют твердость 150 ± 10 HV 0.02.

Таблица 1 – Рентгеноструктурный анализ стали 20 после ТЦО

Вид обработки	Размер блоков мозаики, нм					
	(110)	(200)	(211)	(220)	(310)	(222)
Отжиг	144	144	200	170	113	125
4 цикла	261	212	240	200	171	220
6 циклов	260	225	340	350	253	282

Такая структура и твердость характеризует полностью завершённый процесс рекристаллизации зерен с предварительной степенью деформации 3...8 % (критический интервал), рисунок 2. На контрольной группе отожженных образцов сталей 20, 40X, подвергнутых повторному отжигу, не обнаружено изменений в механических свойствах и микроструктуре. Твердость зерен феррита (сталь 20) сохранялась в течение 4 часов в интервале 120 ± 10 HV 0.02, а размер зерен не превысил 5 баллов.



а – сталь 40X; $\times 100$



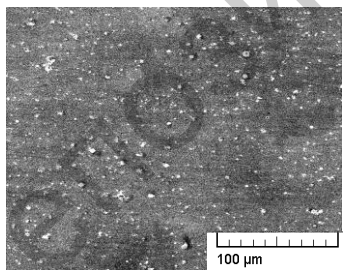
б – сталь 20; $\times 100$

Рисунок 2 – Микроструктура сердцевины образцов после 4 термоциклов и отжига

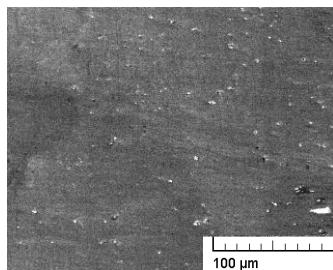
По результатам исследований и на основании анализа литературных данных был предложен механизм развития микропластической деформации зерен и их рекристаллизации во время ТЦО. Отсутствие выдержки при верхней температуре цикла ведет к тому, что рекристаллизация не успевает пройти полностью. К моменту достижения нижней температурной границы цикла в объеме металла происходит накопление дефектов кристаллического строения и возрастает доля наклепанных нерекристаллизованных зерен. Дополнительно к этому объему добавляются зерна, в которых при превращении аустенита в ферритоперлитную структуру создаются

напряжения, релаксация которых происходит в результате микропластической деформации скольжением, возникающей из-за малой подвижности границ. Последующая ТЦО способствует накоплению фазовых напряжений и, как следствие, повышению степени микродеформации зерен. В результате на поверхности рекристаллизация доходит до вторичной стадии, а в сердцевине наблюдается полигонизация, сопровождаемая ростом блоков мозаики.

На следующем этапе было рассмотрено структурообразование диффузионных слоев, полученных на сталях 40X, 65Г предварительной нитроцементацией при 850 °С в течение 7 часов. Установлено, что циклические фазовые превращения в интервале температур (сталь 65Г) 850 °С, (сталь 40X) 870 °С...600 °С позволяют получить в диффузионном слое мелкоигльчатый мартенсит с длиной наибольших игл 4...8 мкм, а в сердцевине стального образца – 8...12 мкм. Диспергирование мартенситной структуры обусловлено многократными фазовыми переходами, способствующими новообразованию, измельчению цементита (с 15 мкм до 2 мкм) в диффузионном слое, что содействует увеличению центров зарождения зерен аустенита при нагреве. Многократные фазовые превращения при ТЦО в высокоуглеродистом аустените вызывают процессы перераспределения углерода и выделения цементита во время охлаждения. При повторном нагреве выделившиеся частицы цементита практически не растворяются при максимальной температуре, так как скорость нагрева высока и времени для их растворения недостаточно. В результате площадь цементитной фазы (рисунок 3) в диффузионном слое заметно больше (4 цикла), нежели в нитроцементованном слое после стационарного режима насыщения. Увеличение дисперсности структур сопровождается повышением твердости слоя с 60 HRC до 66 HRC (сталь 40X).



а – циклическая ТЦО, закалка, низкий отпуск



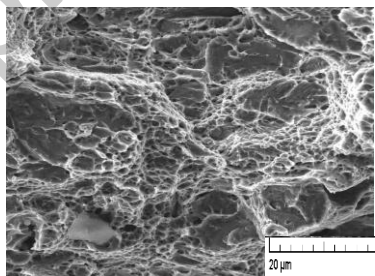
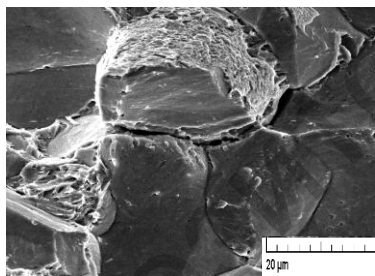
б – закалка, низкий отпуск

Рисунок 3 – Электронная сканирующая микроскопия диффузионного слоя стали 40X

Четвертая глава посвящена изучению механических свойств диффузионных слоев, полученных методами циклической ЭХТО и ТО.

Проведены статические испытания на класс прочности. Исследовано влияние циклических фазовых превращений на вязкость образцов сталей 40X, 65Г, прошедших предварительную нитроцементацию при 850 °С в течение 7 часов, закалку и отпуск.

Установлено, что вязкость упрочненных нитроцементацией стальных образцов с последующей ТО не возрастает с ростом числа циклов. Максимальный прирост вязкости был достигнут за два цикла фазовых превращений. Мартенсит отпуска диффузионного слоя и сердцевины образца показал сопротивление разрушению в 19 ± 3 Дж/см² (сталь 65Г) и 35 ± 3 Дж/см² (сталь 40X). Троостит отпуска поверхностного слоя и сердцевины образца показал значительный прирост вязкости 30 ± 3 Дж/см² (сталь 65Г) и 60 ± 3 Дж/см² (сталь 40X). При четырех циклах теплосмен на обеих марках сталей не замечено дальнейшего повышения вязкости. Это обусловлено увеличением количества цементита в диффузионном слое при циклической обработке. Также важной особенностью структуры мартенсита, полученного циклической ТО стали 40X (2 цикла, закалка и отпуск), стало значительное повышение ударной вязкости (35 ± 3 Дж/см²) по сравнению с трооститной структурой отпуска стали 65Г (25 ± 3 Дж/см²). На фрактографии изломов отчетливо видна дисперсность структуры и вид излома, у стали 65Г – крупнокристаллический смешанный, а у стали 40X – мелкозернистый фарфоровидный (рисунок 4).



а – сталь 65Г, смешанный излом б – сталь 40X, фарфоровидный излом

Рисунок 4 – Фрактография изломов стальных образцов

При разработке локальной циклической ЭХТО возникает проблема интенсивного теплоотвода из нагреваемой зоны к участкам с низкой температурой. Известно, что теплоотвод сказывается на структуре стали, изменяя ее дисперсность или влияя на структурные превращения, что ведет за собой и изменение прочностных свойств. По этой причине в качестве образцов для испытаний на разрыв использовали болты.

Было установлено, что болт (сталь 20), изготовленный холодной высадкой без дополнительной ТО, соответствует 6 классу прочности. Использование дополнительной поверхностной закалки или циклической ЭХТО головки болта не приводит к разупрочнению. Возникающий

теплоотвод с головки болта на резьбовую часть не изменяет дисперсности и структуры, тем самым сохраняя прочностные свойства. Болт (сталь 40X), изготовленный горячей штамповкой с дополнительным улучшением, соответствует 8 классу прочности. Циклическая ЭХТО головки болта приводит к снижению предела прочности, и болт переходит на класс ниже в седьмой. Это обусловлено уменьшением дисперсности исходной структуры (сорбит), из-за чего она становится менее прочной.

В работе проведены лабораторные исследования трибологических свойств диффузионных слоев в среде незакрепленных абразивных частиц. Установлено, что поверхностный слой стального образца (сталь 20) после циклической ЭХТО представляет собой износостойкий мартенсит, цементит, остаточный аустенит с твердостью 60...63 HRC. Сформированная структура сопротивляется изнашиванию в 1,7 раз эффективнее, чем мягкая (20 HRC) структура неупрочненной стали и в 1,2 раза эффективнее закаленной структуры стали 40X (мартенсит и остаточный аустенит) с твердостью 50...55 HRC, которая в свою очередь сопротивляется изнашиванию в 1,5 раза лучше, чем ферритоперлитная структура.

Износостойкость нитроцементованных слоев зависит от схемы последующей ТО. Наименьшая износостойкость получается у диффузионных слоев (0,009 мг/м), которые подверглись только закалке и низкому отпуску (60...63 HRC – 40X; 59...62 HRC – 65Г). Повышение сопротивления изнашиванию достигалось после циклического нагрева с полными фазовыми превращениями не менее 2 циклов. В этом случае увеличивалось количество цементита, повышалась твердость (64...66 HRC – 40X; 60...63 HRC – 65Г), а за ней и износостойкость слоя (0,0065 мг/м). Несмотря на равную твердость (60...63 HRC) диффузионных слоев (без ТЦО) и поверхности стали 60ПП, закаленной с индукционного нагрева и подвергнутой низкому отпуску, износостойкость нитроцементованного слоя выше в 1,3 раза. Это обусловлено микроструктурой слоя, состоящего из мелкодисперсного мартенсита, цементита и нитридов железа (γ -Fe₄N, ϵ -Fe₃N), в отличие от закаленной поверхности стали, состоящей только из мартенсита и остаточного аустенита.

Пятая глава включает результаты внедрения разработанных технологий в технологический процесс упрочнения деталей корпусов плугов на РУП «Минский завод шестерен», государственных полевых испытаний на Белорусской машиноиспытательной станции (БелМИС).

При внедрении технологий циклической ЭХТО и ТО сталей был определен круг деталей, требующих соответствующего упрочнения. Завод в основном использует для изготовления деталей недорогие конструкционные стали типа 65Г, 40X и 20. Сталь 65Г используется для изготовления почворезущих элементов с ТО на троостит. Болты из стали 20 изготавливают высадкой без ТО с твердостью 20 HRC и ферритоперлитной структурой по

сечению. Болты из стали 40X изготавливают высадкой с последующей ТО на сорбит с твердостью 30 HRC. Изготовленные таким способом крепежные элементы имеют класс прочности 6.8 и 8.8, но обладают малым ресурсом в 5...10 га, который зависит от типа почвы.

Стандартная ТО деталей корпуса плуга не обеспечивает должного уровня надежности и долговечности, поэтому ресурс ниже западных аналогов в 1,5...2 раза и, как правило, не соответствует требованиям СТБ 1388-2003, для долот оборотных ресурс должен составлять не менее 20 га. Небольшая наработка узла «долото–болт» объясняется тем, что происходит быстрый износ долота не только по длине, но и толщине. Также тяжелые почвы Беларуси приводят к повышенному износу головки болта, который обусловлен постепенным «вымыванием» почвой мягкого металла крепежного элемента в посадочном отверстии рабочего органа, что приводит к преждевременному нарушению целостности конструкции. В результате этого износа закрепляемая деталь, не достигшая своего предельного ресурса, отрывается от корпуса плуга и теряется в поле.

Для повышения долговечности и надежности болтов были применены технологии локальной циклической ЭХТО и локальной закалки с индукционным нагревом (66 кГц). С учетом условий эксплуатации и возникающих нагрузок была разработана специальная схема макрогетерогенного распределения микроструктур по сечению. Согласно этой схеме для повышения долговечности (ресурса) требуется получить твердые и износостойкие структуры (мартенсит) на поверхности и в сердцевине головки болта, так как она подвергается абразивному изнашиванию. Тяжело нагруженной частью болта является его резьбовая часть в месте соединения с головкой, она испытывает изгибающий момент, образующийся во время навинчивания гайки, и растягивающие напряжения при взаимодействии детали с внешней средой, поэтому требуется получить вязкие и пластичные структуры, которые обеспечивали бы необходимую надежность (отсутствие разрушения).

Таким образом, на предприятии были внедрены технологические процессы упрочнения болтов из стали 20 под номерами ТД 4.29.01У, ТД 4.29.02У. Данные технологические операции предусматривали циклическую ЭХТО из паст, закалку в последнем цикле нагрева и низкий отпуск. Этот процесс обеспечивал толщину слоя в 340 мкм с твердостью 60...63 HRC, закаленную зону максимум 5 мм с твердостью по толщине 55...35 HRC и класс прочности изделия 6.8. Болты из стали 40X, предварительно улучшенные, упрочнялись в соответствии с ТД 8.30/50-306У, ТД 8.30/50-308У. Для данных изделий предусматривалась локальная закалка головки болта и низкий отпуск, что обеспечивало закаленную зону максимум 8 мм с твердостью по толщине 55...50 HRC и класс прочности 12.8 (рисунок 5). Для реализации упрочняющих технологий была спроектирована

и изготовлена оснастка, состоящая из индуктора и держателя для болтов. Экономический эффект от внедрения и освоения технологии упрочнения крепежных элементов составил 42 млн бел. руб. в ценах 2010 г.

На РУП «МЗШ» прошла апробацию технология циклической ТО конструкционных сталей, предварительно подвергнутых нитроцементации, которая была применена в качестве упрочняющего способа долот из сталей 65Г и 40Х. С учетом условий эксплуатации данной детали была разработана схема макрорегерогенного распределения микроструктур. Установлено, что на рабочей части долота, режущей почву, требуется формировать твердые износостойкие структуры (мартенсит отпуска, цементит) на поверхности, а в сердцевине мартенсит отпуска. Благодаря упрочненной поверхности и сердцевине деталь будет изнашиваться равномернее и долговечность повысится. Средняя часть детали, в которой располагаются крепежные отверстия, в процессе эксплуатации воспринимает ударные и изгибающие нагрузки, передающиеся от рабочей части детали. Поэтому требуется получить вязкие структуры на поверхности и в сердцевине (троостит и сорбит отпуска) крепежной части детали.

Благодаря технологии циклической ТО, комплексному упрочнению поверхности (нитроцементация) и сердцевины (сквозная закалка) с макрорегерогенным распределением микроструктур, долото получило высокую конструкционную прочность. Рабочая часть детали имела твердость до 66 HRC на поверхности, а в сердцевине – до 55 HRC и ударную вязкость 35 ± 3 Дж/см². Средняя часть долота имела твердость до 45 HRC и ударную вязкость до 60 ± 3 Дж/см².



Рисунок 5 – Схема технологического процесса

Эксплуатация деталей с полученными свойствами показала, что экономия денежных средств от использования комплекта упрочненных деталей на одном пятикорпусном плуге составляет 87 000 бел. руб. за сезон пахоты относительно серийно выпускаемых деталей РУП «МЗШ» (данные БелМИС).

Разработанные упрочняющие технологии прошли успешные государственные полевые испытания на БелМИС (акты № 018 Д 8/1-2009 от

23.02.2009 г., № 220 Б 1/1-2009 от 24.12.2009 г). По результатам установлено, что крепежные элементы, упрочненные циклической ЭХТО и локальной закалкой, изнашиваются в 1,5 и 1,7 раз менее интенсивно, чем серийно выпускаемые из тех же марок сталей. Технология упрочнения долот за счет циклической ТО с комплексным упрочнением поверхности и сердцевины, со специально разработанной схемой макрогетерогенного распределения микроструктур обеспечивает повышение износостойкости в 1,3 и 1,7 раз относительно серийных деталей фирмы «Kverneland» и РУП «МЗШ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлены особенности структурообразования цементованных диффузионных слоев и сердцевины образцов из доэвтектоидных конструкционных сталей при локальном воздействии индукционного циклического нагрева. В результате многократных полнофазных превращений, микропластической деформации и рекристаллизации зерен происходит интенсификация твердофазной диффузии, что сопровождается увеличением толщины слоя с 280 мкм (стационарный режим) до 340 мкм (циклический режим) за равный промежуток времени. Сформированная мелкозернистая (диаметр 8...12 мкм) структура поверхностного слоя и сердцевины стального образца повышает энергию разрушения в 1,5 раза [1, 2, 3, 5, 9, 14, 23, 25, 27].

2. Исследовано влияние числа термоциклов на процесс твердофазной диффузии на углеродистой стали 20. Установлена интенсификация твердофазной диффузии для случая циклической ЭХТО с индукционным нагревом. Она обусловлена механизмом образования аустенита, высокой температурой процесса, циклической микропластической деформацией зерен, а также взаимодействием диффундирующих атомов с дефектами кристаллической структуры железа (дислокации, вакансии, границы блоков и зерен) и протекающими процессами рекристаллизации. Определено, что в интервале температур 600...1100 °С за 2 минуты, при четырехкратной теплосмене, можно получить слой толщиной 340 мкм, что на 17 % больше, чем в стационарном режиме. При увеличении количества теплосмен (до 8) и уменьшении времени изотермической выдержки в аустенитной области, при каждом цикле (15 секунд), кинетика насыщения приближается к стационарному режиму (30 мкм за 15 секунд). Это связано с недостаточным временем пребывания в аустенитной области в момент диффузии и образованием устойчивой полигональной структуры [3, 5, 6, 9, 13, 15].

3. Исследовано влияние индукционного циклического нагрева в режиме полнофазных превращений (600...870 °С (сталь 40Х); 600...940 °С

(сталь 20)) на структурообразование поверхности и сердцевины стальных образцов. Установлено, что при определенных скоростях нагрева и охлаждения ($30...40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и $3...5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ соответственно) в циклах на поверхности и в сердцевине образца с разной интенсивностью и до определенной стадии протекает рекристаллизация наклепанных зерен. Это связано с тем, что фазовый наклеп не устраняется полностью при нагреве и степень деформации зерен возрастает с каждым циклом охлаждения. В результате после 4 и более циклов поверхностный слой зерен испытывает вторичную рекристаллизацию, которая формирует зерна диаметром 60 мкм ($152\pm 10\text{ HV } 0.02$) на фоне мелких зерен диаметром 16 мкм ($167\pm 10\text{ HV } 0.02$). При этом в сердцевине (сталь 20) сохраняется мелкодисперсная структура (диаметр $8...12\text{ мкм}$) и протекают процессы полигонизации и «рекристаллизация на месте», о чем свидетельствует укрупнение блоков мозаики с 150 нм (отжиг) до 300 нм (6 циклов). Мелкодисперсная структура сердцевины образцов стали 20, 40X только после 4 часов (в течение $1...4\text{ ч}$) отжига при $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ превращается в отдельные группы крупных зерен с диаметром до 1500 мкм ($120\pm 10\text{ HV } 0.02$). Снижение твердости и образование крупных зерен указывает на вторичную рекристаллизацию с предварительной деформацией в критической области $3...8\%$. [3, 5, 19, 22].

4. Разработана технология повышения конструкционной прочности крепежных элементов за счет комплексного упрочнения поверхности и сердцевины с макрогетерогенным распределением структур по сечению изделия. Определено, что для повышения надежности (прочность, отсутствие хрупкого разрушения) крепежного элемента резьбовая часть должна иметь структуры троостита, сорбита или феррита и перлита. За долговечность (износостойкость, ресурс) изделия должны отвечать твердые структуры (мартенсит и цементит) на поверхности и в сердцевине головки болта. Благодаря подобранным режимам индукционного нагрева реализуется схема макрогетерогенного распределения микроструктур по сечению детали, сохраняется требуемая ферритоперлитная (сталь 20) или трооститная (сталь 40X) структура на ножке болта, которая определяет класс прочности 6 (сталь 20), 12 (сталь 40X) соответственно. Комплексное упрочнение головки болта (сталь 20), заключающееся в ЭХТО с циклическим индукционным нагревом, закалке в последнем цикле и низком отпуске, позволило сформировать поверхностный слой толщиной 340 мкм с твердостью $60...63\text{ HRC}$ и закаленную сердцевину (5 мм) с твердостью по толщине $55...35\text{ HRC}$. Полученный комплекс механических свойств обеспечил повышение конструкционной прочности в $1,5...1,7$ раз относительно серийно выпускаемых деталей [2, 4, 7, 8, 10, 14, 16, 18, 29].

5. Разработана технология повышения конструкционной прочности оборотных долот за счет комплексного упрочнения поверхности и сердцевины с макрогетерогенным распределением структур по сечению

изделия. Определено, что макрогетерогенное распределение структур должно заключаться в формировании вязких структур (троостита, сорбита, троостомартенсита) на крепежной части долота для повышения надежности (прочность, ударная вязкость) изделия. Твердые и износостойкие структуры (мартенсит, карбид) должны присутствовать на лезвийной части детали, повышая долговечность (износостойкость, ресурс). Комплексное упрочнение, заключающееся в поверхностной нитроцементации с последующим индукционным ТЦО, сквозной закалке в последнем цикле и низком отпуске, позволило сформировать требуемые микроструктуры на поверхности и в сердцевине каждого элемента детали. На лезвийной части изделия получен диффузионный слой толщиной до 0,8 мм с твердостью 64...66 HRC и упрочненная сердцевина толщиной до 10 мм с твердостью 55...60 HRC, на крепежной части получен диффузионный слой и упрочненная сердцевина с твердостью 40...45 HRC. Режим индукционной циклической обработки при двукратной полной фазовой перекристаллизации обеспечил получение мелкоигольчатого мартенсита (длина наибольших игл 4...8 мкм) с ударной вязкостью 19 ± 3 Дж/см² (сталь 65Г) и 35 ± 3 Дж/см² (сталь 40Х), и мелкодисперсного троостита с ударной вязкостью 30 ± 3 Дж/см² (сталь 65Г) и 60 ± 3 Дж/см² (сталь 40Х). Полученный комплекс механических свойств обеспечил повышение износостойкости в 1,3 и 1,7 раза, по сравнению с серийно выпускаемыми деталями фирмы «Kverneland» и РУП «МЗШ» [5, 6, 11, 12, 17, 20, 21, 24, 26, 28].

Рекомендации по практическому применению

На РУП «МЗШ» освоены технологии циклической ЭХТО из паст, закалки с индукционным нагревом головок болтов, выполнена опытно-промышленная апробация технологии циклической ТО с комплексным упрочнением поверхности и сердцевины с макрогетерогенным распределением структур по сечению долота. Осуществлено внедрение упрочняющих технологий в технологический процесс изготовления плугов с экономическим эффектом в народном хозяйстве 42 млн бел. руб. в ценах 2010 г. Проведены успешные полевые испытания упрочненных деталей на БелМИС (№ 018 8/1-2009 г. и № 220 Б 1/1-2009 г.), по результатам которых установлено, что износостойкость в 1,3 и 1,7 раз выше, чем у серийно выпускаемых деталей фирмы «Kverneland» и РУП «МЗШ».

Результаты работы могут быть использованы для упрочнения деталей, которые эксплуатируются в условиях абразивного изнашивания или в паре металл–металл, где изнашиванию подвергается все сечение изделия.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых сборниках и журналах

1. Константинов, В.М. Электро-химико-термическая обработка крепежных элементов почвообрабатывающих машин / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, С.И. Сушко // Республ. межведом. сб. науч. тр. Металлургия / БНТУ. – 2008. – Вып. 31. – С. 358–371.

2. Ткаченко, Г.А. Разработка технологии электро-химико-термической обработки крепежных элементов плугов / Г.А. Ткаченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Материаловедение. – 2009. – № 8. – С. 32–37.

3. Ткаченко, Г.А. Изучение механизма структурообразования углеродистых сталей при циклическом индукционном нагреве / Г.А. Ткаченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Материаловедение. – 2010. – № 9. – С. 134–138.

4. Константинов, В.М. Высокопрочный крепеж, предназначенный для работы в условиях абразивного изнашивания / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Горная механика и машиностроение. – 2010. – № 3. – С. 113–120.

5. Ткаченко, Г.А. Структурообразование доэвтектидных конструкционных сталей при нитроцементации с локальным индукционным циклическим нагревом / Г.А. Ткаченко // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 – С. 250–256.

6. Константинов, В.М. Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным циклическим индукционным нагревом / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 2. – С. 44–50.

Статьи в материалах конференций

7. Ткаченко, Г.А. Структурообразование наплавленного слоя из борированной пластины под действием концентрированного источника энергии / Г.А. Ткаченко, А.В. Стефанович // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29-30 апреля 2007 г. / ПГУ ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Новополоцк, 2007. – С. 101–103.

8. Константинов, В.М. Повышение долговечности крепежных болтов корпусов плугов / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы II Междунар.

научн.-техн. конф., Минск, 19-21 ноября 2007 г. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2007. – С. 102–105.

9. Ткаченко, Г.А. Анализ структурообразования диффузионных слоев из паст с применением нагрева токами высокой частоты / Г.А. Ткаченко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы II Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 19-21 ноября 2007 г. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2007. – С. 204–207.

10. Ткаченко, Г.А. Разработка износостойких покрытий для повышения долговечности крепежных болтов корпусов плугов / Г.А. Ткаченко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы V междунар. научн.-техн. конф., Минск, 20-25 июня 2007 г. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2007. – С. 275–279.

11. Константинов, В.М. Анализ применения химико-термической обработки для упрочнения режущих элементов плугов / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы VI междунар. научн.-техн. конф., Минск, 20-25 июня 2008 г. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2008. – С. 208.

12. Константинов, В.М. Анализ применения химико-термической обработки рабочих органов почвообрабатывающих машин / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. научн. трудов VII междунар. научн.-техн. конф., Новополоцк, 29-30 апреля 2009 г. / ПГУ ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Новополоцк, 2009. – С. 125–129.

13. Константинов, В.М. О технико-экономических показателях электро-химико-термической обработки / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, Б.Б. Хина // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. научн. труд. VII междунар. научн.-техн. конф., Новополоцк, 29-30 апреля 2009 г. / ПГУ ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Новополоцк, 2009. – С. 129–133.

14. Ткаченко, Г.А. Локальное диффузионное износостойкое покрытие на крепежных элементах / Г.А. Ткаченко, Б.Б. Хина // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. Междунар. симпозиума, Минск, 25-27 марта 2009 г. / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2009. – С. 245–252.

15. Белоцерковский, М.А. Упрочнение химико-термической обработкой покрытий, полученных высокоскоростным распылением стальных проволок / М.А. Белоцерковский, В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сб. докл. Междунар. симпозиума,

Минск, 25-27 марта 2009 г. / Институт порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси ; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2009. – С. 178–184.

16. Константинов, В.М. Применение индукционного нагрева для получения локальных износостойких покрытий на крепежных элементах почвообрабатывающей техники / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, Б.Б. Хина // Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева : материалы II междунар. конф., СПб., 20-22 мая 2009 г. / ЛЭТИ. – СПб., 2009. – С. 119–123.

17. Константинов, В.М. Химико-термическая обработка долот производства РУП «МЗШ» / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко И.С. Сушко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы IV Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 10-13 ноября 2009 г. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – 2009. – С. 255–258.

18. Константинов, В.М. Опыт внедрения термической и электрохимико-термической обработки крепежных элементов корпусов плугов / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы VII междунар. научн.-техн. конф., Минск, 15-17 июня 2009 г. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – С. 239.

19. Константинов, В.М. Образование структуры рекристаллизации при термоциклической обработке конструкционных сталей / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств : материалы X Междунар. научн.-практ. конф., Барнаул, 19-20 ноября 2009 г. / АлтГТУ ; редкол.: А.М. Гурьев [и др.]. – Барнаул, 2009. – С. 61–65.

20. Константинов, В.М. Повышение эксплуатационных характеристик почворезущих деталей / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : материалы VII междунар. научн.-техн. конф., Минск, 27-27 мая 2010 г. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – С. 120–122.

21. Константинов, В.М. Применение индукционной циклической обработки для упрочнения оборотных долот / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы VII междунар. научн.-техн. конф., Минск, 22-25 июня 2010 г. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – С. 340.

22. Ткаченко, Г.А. Формирования структуры рекристаллизации на углеродистых сталях при индукционной термоциклической обработке / Г.А. Ткаченко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы VII междунар. научн.-техн. конф., Минск, 22-25 июня 2010 г. / БНТУ ; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – С. 344.

Тезисы докладов

23. Стефанович, В.А. Получение диффузионных слоев методом электро-химико-термической обработки / В.А. Стефанович, Г.А. Ткаченко // Новые материалы и технологии их обработки : материалы VIII Респ. СНТК. – Минск : БНТУ, 2007. – С. 35–36.

24. Ткаченко, Г.А. Повышение износостойкости деталей корпусов плугов / Г.А. Ткаченко, Е.С. Капленко // Новые материалы и технологии их обработки : материалы VIII Респ. СНТК. – Минск : БНТУ, 2009. – С. 25–27.

25. Ткаченко, Г.А. Анализ технологий нитроцементации / Г.А. Ткаченко, Е.С. Капленко // Новые материалы и технологии их обработки : материалы VIII Респ. СНТК. – Минск : БНТУ, 2009. – С. 38–39.

Авторские свидетельства и патенты

26. Рабочий орган почвообрабатывающей машины : пат. 5303 Респ. Беларусь, МПК А 01В 15/00 / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, И.С. Сушко ; заявитель БНТУ. – № u 20080810 ; заявл. 2008.11.13 ; опубл. 2009.03.02 // Официальный бюллетень / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2009. – № 2 (45). – С. 174.

27. Машина для испытания деталей на трение и износ в условиях абразивного изнашивания : пат. 6351 Респ. Беларусь, МПК G 01N/56 / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, Е.С. Капленко ; заявитель БНТУ. – № u 20091011 ; заявл. 2009.12.01 ; опубл. 2010.04.01 // Официальный бюллетень / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2010. – № 6 (35). – С. 114.

28. Лемех плуга : решение о выдаче патента на изобретение : Респ. Беларусь, МПК А 01В 15/00 / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, О.Е. Лашкевич ; заявитель БНТУ. – № а 20081578 ; заявл. 2008.12.10.

29. Болт (варианты) : решение о выдаче патента на изобретение : Респ. Беларусь, МПК F 16В 23/00, 35/00 / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, И.С. Сушко, М.М. Казак ; заявитель БНТУ. – № а 20091117 ; заявл. 2009.07.23.

РЭЗІЮМЭ

Ткачэнка Глеб Аляксандравіч

Структураабразаванне канструкцыйных сталей пры цыклічнай тэрмічнай і хіміка-тэрмічнай апрацоўцы і ўмацаванне дэталей глебаапрацоўчых машын

Ключавыя словы: цыклічныя фазавыя ператварэнні, індукцыйны нагрэў, фазавы наклёп, рэкрышталізацыя, трыбалагічныя ўласцівасці дыфузійных слаёў, павышэнне канструкцыйнай трываласці.

Мэта работы: стварэнне тэхналогіі паверхневага насычэння з дыфузійным слоём, які хутка фарміруецца і адначасовым павышэннем канструкцыйнай трываласці сталёвага вырабу.

Метады даследавання: мікрацвёрдасць, металаграфічны аналіз, рэнтгенаструктурны аналіз, трыбалагічныя і механічныя выпрабаванні.

Атрыманя вынікі: ўстаноўлена, што пры высокатэмпературнай хіміка-тэрмічнай апрацоўцы ў стацыянарным рэжыме галоўная роля ў інтэнсіфікацыі дыфузіі адводзіцца тэмпературы (1100 °С). У выпадку цыклічнай змены тэмпературы ў інтэрвале хуткасцяў нагрэву 30...40 °С/с і 3...5 °С/с астуджэння, якая суправаджаецца фазавымі ператварэннямі, асноўнай крыніцай паскарэння дыфузіі з'яўляецца фазавы наклёп і рэкрышталізацыя. Пры цыклічнай апрацоўцы сталёвых вырабаў ад 4 і больш цыклаў адбываецца наклёп і рэкрышталізацыя зерня, якая даходзіць да другаснай стадыі на паверхні, а ў асяродку – да поліганізацыі.

Распрацаваны і практычна рэалізаваны тэхналогіі ўмацавання дэталей, якія працуюць ва ўмовах абразіўнага зношвання. Тэхналогіі ўяўляюць сабой комплекснае ўмацаванне паверхні і асяродку з макрагетэрагенным размеркаваннем структур на перасеку дэталі. Вынікам прымянення тэхналогіі стала павышэнне зносаўстойлівасці дэталей у 1,3 і 1,7 разы ў параўнанні з серыйна выпускаемымі фірмай «Kverneland» і РУП «МЗШ».

Ступень выкарыстання: распрацаваны тэхналагічныя працэсы ўмацавання крапежных элементаў карпусоў плугоў (ТД ППН.8.30/50-306У, ТД 4.29.001У). Распрацоўка ўкаранёна на РУП «Мінскі завод шасцерняў» з эканамічным эфектам 42 млн бел. руб. у цэнах 2010 г.

Вобласці ўжывання: умацаванне дэталей, якія эксплуатауюцца ва ўмовах абразіўнага зношвання або ў пары метал–метал, дзе зношванню падвяргаецца ўвесь перасек вырабу.

РЕЗЮМЕ

Ткаченко Глеб Александрович

Структурообразование конструкционных сталей при циклической термической и химико-термической обработке и упрочнение деталей почвообрабатывающих машин

Ключевые слова: циклические фазовые превращения, индукционный нагрев, фазовый наклеп, рекристаллизация, трибологические свойства диффузионных слоев, повышение конструкционной прочности.

Цель работы: создание технологии поверхностного насыщения с быстро формирующимся диффузионным слоем и одновременным повышением конструкционной прочности стального изделия.

Методы исследования: микротвердость, металлографический, рентгеноструктурный, трибологические и механические испытания.

Полученные результаты: установлено, что при высокотемпературной химико-термической обработке в стационарном режиме главная роль в интенсификации диффузии отводится температуре (1100 °С). В случае циклического изменения температуры в интервале скоростей нагрева 30...40 °С/с и 3...5 °С/с охлаждения, сопровождаемой фазовыми превращениями, основным источником, ускоряющим диффузию, является фазовый наклеп и рекристаллизация. При термоциклировании стальных образцов от 4 и более циклов происходит наклеп и рекристаллизация зерен, доходящая до вторичной стадии на поверхности, а в сердцевине – до полигонизации.

Разработаны и практически реализованы технологии упрочнения деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания. Технологии представляют собой комплексное упрочнение поверхности и сердцевины с макронеоднородным распределением структур по сечению детали. Результатом применения технологии стало повышение износостойкости деталей в 1,3 и 1,7 раза по сравнению с серийно выпускаемыми деталями фирмы «Kverneland» и РУП «МЗШ».

Степень использования: разработаны технологические процессы упрочнения крепежных элементов корпусов плугов (ТД ППН.8.30/50-306У, ТД 4.29.001У). Разработка внедрена на РУП «Минский завод шестерен» с экономическим эффектом 42 млн бел. руб. в ценах 2010 г.

Область применения: упрочнение деталей, которые эксплуатируются в условиях абразивного изнашивания или в паре металл-металл, где изнашиванию подвергается все сечение изделия.

SUMMARY

Tkachenko Hleb Aleksandrovich

Structurization of structural steels at cyclic heat and chemical-heat treatment and hardening of details of tillers

Keywords: cyclic phase transformations, induction heating, phase mechanical hardening, grain recovery, tribological properties diffusion layers, increasing structural strength.

The work purpose: to create of technology of superficial saturation with quickly formed diffusion a layer and simultaneous increase in structural strength of steel products.

Research methods: microhardness, metallographic, X-ray, tribological and mechanical tests.

The received results: found that at high temperature chemical heat treatment in a stationary mode, the main role in the intensification of diffusion is given a temperature (1100 °C). In the case of cyclic changes in temperature in the range of heating rates 30..40 °C/sec and 3...5 °C/sec cooling, followed by phase transformation, the main source, accelerating the diffusion is the phase hardening and recrystallization. During thermal cycling of steel samples from 4 or more cycles are hardening and recrystallization grains, reaching to the secondary stage on the surface and the core to polygonization.

Developed and practically implemented technology of hardening of parts operating under conditions of abrasive wear. Technology is a complete hardening of the surface and core with macroheterogeneous distribution structures in the cross section details. Increase of wear resistance of details in 1,3 and 1,7 times in comparison with serially let out details of firm "Kverneland" and RUE "MGP" became result of application of technology.

Extent of use: the technological processes of hardening of fasteners plow (TD PPN.8.30/50-306U, TD 4.29.001U). The development was implemented at the RUE "Minsk Gear Plant" with the economic effect of 42 million Br. rub. at the prices of 2010.

Scope: hardening of parts, which operate in conditions of abrasive wear, or a pair of metal-metal where you want to work the whole section of the product.

Научное издание

ТКАЧЕНКО Глеб Александрович

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ
И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов

Подписано в печать 26.05.2011

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 60. Заказ 526.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.