

УДК 631.31. 02:669. 14. 018

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ДЕТАЛЯХ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАКАЛКОЙ

Г.Ф. Бетенья, к.т.н., доцент, Г.И. Анискович, к.т.н., доцент, С.Н. Рогожинский, аспирант, Д.М. Шмарловский, аспирант
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

В статье приведены сведения о микроструктурном строении упрочненных деталей рабочих органов из углеродистых сталей пониженной прокаливаемости. Установлено, что применение импульсного закалочного охлаждения и низкого отпуска обеспечивает получение стальных изделий с объёмной нанокристаллической структурой. Определено наличие наноразмерных продуктов и их параметры в деталях методами световой и электронной микроскопии.

Введение

Традиционно применяемые материалы и технологии упрочнения деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин достигли своего предела в получении требуемой конструкционной прочности и износостойкости и требуют эффективной замены. Основная причина состоит в том, что с увеличением прочности (твёрдости) и износостойкости пластичность сталей уменьшается [1,2]. Наличие абразивной среды, значительных ударных нагрузок, высоких напряжений и ряд других причин, обусловили необходимость поиска новых подходов для повышения свойств конструкционных сталей в результате формирования в них объёмного микро- и наноструктурированного состояния [2-4]. На современном этапе развития металлостроения из уже получивших практическую реализацию на наномасштабном уровне явлений можно выделить два основных направления:

1. Упрочнение стали путём контролируемого введения ультра- и мелкодисперсных наночастиц [1,2,5];
2. Упрочнение за счёт фрагментации - специального управляемого измельчения структуры стали [6-8].

В последнее время установлено, что наряду с интенсивной пластической деформацией эффективное формирование мелкодисперсных структур может быть достигнуто и при закалке конструкционных сталей за счёт фазового превращения в процессе охлаждения [3]. Практические результаты достигнуты европейскими, американскими и японскими производителями. В работе [7]

сообщается о получении в промышленных условиях стальных заготовок толщиной более 200 мм с размером структурных элементов не более 40 нм.

В случае углеродистых конструкционных сталей, в частности сталей пониженной прокаливаемости (ПП) возможен вариант термической обработки на получение мартенситной структуры с повышением их прочностных характеристик на 25-30% без снижения ударной вязкости [9].

Основная часть

Термическая обработка деталей рабочих органов из углеродистой стали 60ПП, выполнялась на экспериментальной закалочной установке с различной интенсивностью охлаждения. Детали нагревались до температуры закалки с точностью ± 5 °С, время аустенизации составляло 10 минут. Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода. Температура воды находилась в пределах 5-35 °С, время охлаждения - в интервале 0,5-5с в зависимости от толщины изделия.

Исследование микроструктуры упрочненных поверхностей деталей после закалки и низкого отпуска проводилось на образцах в двух плоскостях по схеме, представленной на рис. 1. Образцы вырезались из деталей рабочих органов (лемехов, дисков и др.) почвообрабатывающих машин после различных режимов термической обработки.

Микроструктура упрочненного слоя и сердцевины изучалась на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия). Микроструктура упрочненных слоев дополнительно исследовалась на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) при увеличении $\times 5000$, $\times 20000$, $\times 50000$, $\times 80000$ и с использованием детектора Nordlys II EBSD (Oxford Instruments) обратно рассеянных электронов.

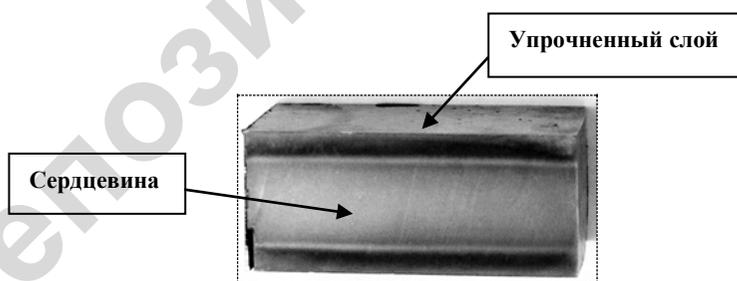


Рисунок 1 – Схема расположения исследуемых поверхностей образца стали 60ПП

Характеристика и балл мартенсита определялись по ГОСТ 8233, размеры фрагментов мартенсита с использованием метода секущих (метод подсчета пересечений границ зерен по ГОСТ 5639).

Фазовый состав, количество остаточного аустенита определялось на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK монохроматизированном излучении, вторичная монохроматизация осуществлялась пиролитическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Количество остаточного аустенита и мартенсита рассчитывались с помощью программы автоматизированного рентгеновского исследования «WinDif», по отношению интенсивностей линий всех фаз, присутствующих в образце.

Твердость по Роквеллу определялась на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013. Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон 1195» в соответствии ГОСТ 473.8.

Термическое упрочнение изготавливаемых деталей рабочих органов осуществляют путём закалки с последующим низким отпуском для получения структуры мартенсита отпуска повышенной твердости (60 - 62HRC). Применяемые температурно-временные режимы классической закалки приводят к высокой хрупкости стальных изделий, снижая их ресурс [9]. Использование интенсивного импульсного водяного охлаждения при термообработке стали 60ПП позволяет избежать этого недостатка в результате получения объёмной нанокристаллической структуры и фрагментации зерен мартенсита.

На рис. 2 (а, б) показаны микроструктуры упрочненного слоя образца стали 60ПП при увеличениях $\times 5000$, $\times 20000$. Максимальная длина игл мартенсита составляет 5-6 мкм, толщина игл - порядка 0,2 – 0,3 мкм. Структура образца характерна для мартенсита пакетного (речного) типа со средним поперечным размером реек 450 – 550 нм. Твердость по Роквеллу упрочненного слоя - 56 - 57 HRC.

Только при увеличениях $\times 50000$ и $\times 80000$ методом электронной микроскопии выявлена фрагментация мартенсита рисунке 2 (в, г). В результате исследований определено, что мартенситные иглы частично фрагментированы, размер фрагментов находится в диапазоне 20 – 150 нм, их средний размер составляет 40 – 50 нм.

На отдельных фрагментах проявляются очертания субмикрозерен. Края мартенситных пластин и фрагментов частично размыты, что говорит об их аморфно-кристаллическом состоянии.

Статистические данные по средней длине фрагментов мартенситных пластин стали 60ПП после упрочнения рабочей поверхности деталей толщиной 6-12мм показали, что размер 80% фрагментов находится в диапазоне 0,02 - 0,08 мкм (таблица 1) После низкого отпуска при 180°C размер фрагментов изменяется незначительно, 60% составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02-0,06 мкм.

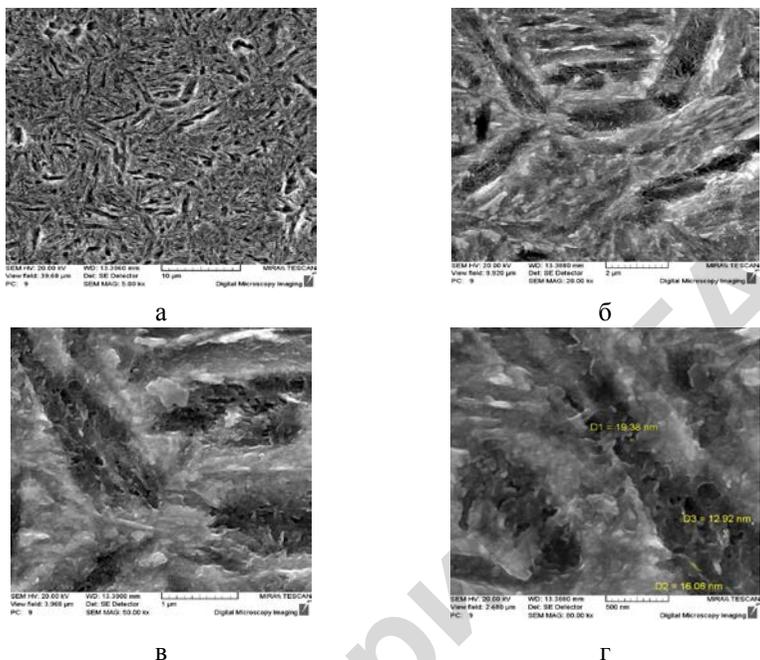


Рисунок 2 – Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска:
а) - x5000; б) - x20000; в) - x50000; г) - x80000

Результаты рентгеноструктурных исследований и расчетов параметров тонкой структуры образца толщиной 6мм в упрочненном слое только после закалки приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Разбиение на классы по длине фрагментов в мартенситных пластинах детали из стали 60ПП после низкого отпуска

Класс	Количество, штук	Интервал, мкм	Доля по количеству, %	Доля по массе, %
1	0	0 – 0,02	0	0
2	2	0,02 – 0,04	3,08	1,14
3	29	0,04 – 0,06	44,62	30,08
4	26	0,06 – 0,08	40	45,04
5	7	0,08 – 0,1	10,77	20,88
6	1	0,1 – 0,12	1,54	2,85
7	0	0,12 – 0,14	0	0
8	0	0,14 – 0,16	0	0
9	0	0,16 – 0,18	0	0
10	0	0,18 – 0,2	0	0

**Секция 1: Технический сервис
машин и оборудования**

Таблица 2 – Расчетные параметры тонкой структуры в упрочненном слое стали 60ПП

Параметр тонкой структуры	Упрочненный слой
Ширина ФФУ	1,9211
Средняя относительная деформация, $\times 10^{-3}$	1,403
Плотность дислокаций, $\text{см}^{-2} \times 10^{11}$	0,128
Размер ОКР, Å	101 ± 3
Параметр ячейки Å	2,8651

Из таблицы 2 видно, что в упрочненном слое размер ОКР уменьшается в 1,1 раза от 116 до 101Å, что подтверждается уширением линии на рентгенограмме. В 1,3 раза увеличивается величина средней относительной деформации от $1,095 \times 10^{-3}$ до $1,403 \times 10^{-3}$. Плотность дислокаций увеличивается в 1,6 раза от $0,780 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $0,128 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ относительно упрочненного слоя образца толщиной 12мм. Распределение относительной среднеквадратической микродеформаций - ОСМД - $\langle E^2(L_n) \rangle^{1/2}$ – степенное, характеризующееся скоплением дислокаций. Расчет количества остаточного аустенита в программе PdfWin показал, что он составляет 6 – 10 %.

Таблица 3 – Структурные характеристики углеродистой конструкционной стали 60ПП при различных режимах термической обработки

Толщина, мм	Режим термич. обработ.	Структурные параметры мартенсита		Твердость, HRC	Характеристика структуры упрочненного слоя
		Макс. длина игл, мкм	Сред. размеры фрагментов, нм		
8	ИЗОЖ+ низкий отпуск	6	40-50	57	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4
8	ИЗОЖ+ низкий отпуск	4	10-50	56	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 3
8	ИЗОЖ+ низкий отпуск	3	40-70	54	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 2-3, аморфнокристаллическое состояние мартенситных пластин
12	ИЗОЖ+ низкий отпуск	4	5-50	58	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4, аморфнокристаллическое состояние мартенситных пластин
6	ИЗОЖ+ низкий отпуск	4	30 - 60	60	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4

Результаты исследований упрочненного слоя образцов стали 60ПП с углубленным изучением микроструктуры мартенсита при больших увеличениях, выявили предпосылки для определения влияния фрагментации игл мартенсита на её механические свойства (таблица 3). Несущественное изменение значений структурно – нечувствительного свойства (твердости) для различных режимов термического упрочнения в полной мере не отражают эту зависимость.

Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов стали 60ПП после термической обработки (без и с отпуском) показали, что наноструктурные изменения приводят к значительному увеличению предела прочности на изгиб в 1,35 - 1,45 раза.

Заключение

1. В объёмных деталях рабочих органов из углеродистых сталей пониженной прокаливаемости при их импульсном закалочном охлаждении и низком отпуске формируется фрагментированная нанокристаллическая структура мартенсита, что позволяет достигнуть оптимального соотношения прочностных и вязкостных характеристик.
2. В результате выбранных режимов термообработки для стали 60ПП мелкоигльчатый мартенсит с наибольшей длиной игл 1 - 4 мкм дробится на отдельные, разориентированные под определёнными углами фасетки размерами 20-80нм внутри пластинок мартенсита. При этом характеристики её механических свойств (например, предел прочности на изгиб) возрастают на 35 - 45%, что существенно превосходит аналогичные показатели при традиционных режимах закалки и отпуска.

Литература

1. Лахтин Ю.М., Леонтьев В.П. *Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений.* – М.: Машиностроение, 1990. – 528с.
2. Арзамасов, Б.Н. *Материаловедение: учебник для вузов /Арзамасов, Б.Н и др. – Изд. 8-е – Москва: Изд-во МГТУ, 2008. - 648с.*
3. Лякишев Н.П., Алымов М.И. *Наноматериалы конструкционного назначения //Российские нанотехнологии, 2006, Т.1, № 1-2, С. 71 - 81.*
4. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. *Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей //МИТОМ, 2009, №6 (643), С. 3-7.*
5. Ушеренко С.М. *Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов.* Минск: НИИ ИП с ОП, 1998. – 210 с.
6. Горынин И.В. и др. *Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях. //Вопросы материаловедения. 2008. №2(54), с.7-19.*

7. Bulk nanocrystalline steel // Ironmaking and steelmaking.-2005.-V.32-р.405-410.

8. Быков Ю.А. Структура и свойства конструкционных наноматериалов // Приложение №7 к журналу «Справочник. Инженерный журнал», 2010, №7, С.1-24.

9. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин /И.Н.Шило [и др.].- Минск: БГАТУ, 2010.-320с.

Abstract

The article presents information on the microstructural details of the structure of the hardened working parts from low carbon steel hardenability. Found that the use of pulsed cooling and hardening of low holiday provides steel products with a bulk nanocrystalline structure. Defined by the presence of nanoscale products and their parameters in detail by light and electron microscopy.

УДК 621.81.004.67

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ

**В.С. Ивашко¹, д.т.н., профессор, В.А. Лойко², к.т.н., доцент,
М.Л. Хейфец³, д.т.н., профессор**

¹УО «Белорусский национальный технический университет», ²УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,

³Национальная академия наук Республики Беларусь,
г. Минск, Республика Беларусь

В статье приведены материалы, позволяющие прогнозировать свойства изделий на основе технологических и эксплуатационных исследований с учетом входных потоков данных о веществе, энергии и другой информации.

Введение

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества деталей машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий.

Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом и эксплуатационном наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [1-4].