

УДК 631.31.02:669.14.018

ОБЪЁМНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ДЕТАЛИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

*канд. техн. наук, доц. Г.Ф. БЕТЕНЯ, канд. техн. наук, доц. Г.И. АНИСКОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. А.А. АНДРУШЕВИЧ, П.А. ДЕКЕВИЧ, Д.П. ЛИТОВЧИК
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск);
Л.А. МАРИНИЧ*

*(Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Минск);
д-р техн. наук, проф. Е.Е. ПЕТЮШИК, канд. техн. наук Л.В. МАРКОВА,
канд. техн. наук И.В. ФОМИХИНА
(Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск)*

Рассматривается микроструктурное строение упрочненных деталей рабочих органов из углеродистых сталей пониженной прокаливаемости. Фрагментация микроструктуры углеродистых конструкционных сталей является не только предметом исследований, но становится реальной технологической операцией термической обработки стальных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин. Установлено, что применение импульсного закалочного охлаждения и низкого отпуска обеспечивает получение стальных изделий с объёмной нанокристаллической структурой. В объёмных деталях рабочих органов из углеродистых сталей ПП при их импульсном закалочном охлаждении и низком отпуске формируется фрагментированная нанокристаллическая структура мартенсита, что позволяет достигнуть оптимального соотношения прочностных и вязкостных характеристик, с максимальным обеспечением требуемых технико-экономических показателей. Наличие наноразмерных продуктов и их параметры в деталях определены 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 металловедения 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].

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), отличающихся относительной дешевизной и недефицитностью, возможен вариант термической обработки на получение мартенситной структуры с повышением их прочностных характеристик на 25...30 % без снижения ударной вязкости [9].

Цель настоящей работы – сведения о возможностях формирования объёмной нанокристаллической структуры в углеродистых сталях пониженной прокаливаемости при реализации импульсного закалочного охлаждения жидкостью (ИЗОЖ) рабочих органов с последующим низким отпуском, а также получаемых механических свойствах.

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 мин. Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода; температура воды 5...35 °С; время охлаждения 0,5...5 с, 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 рисунке 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) при увеличении $\times 500$. 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. 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_α -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.

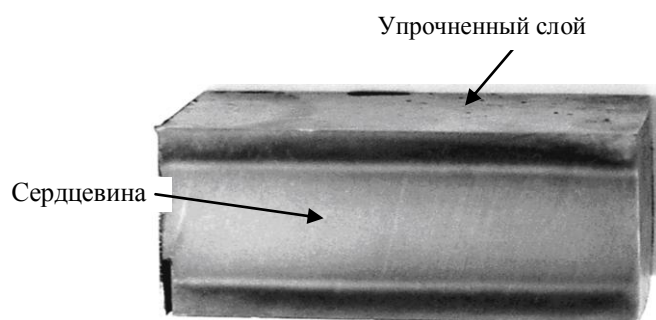


Рис. 1. Схема расположения исследуемых поверхностей образца стали 60ПП

Сталь 60ПП в исходном состоянии (в состоянии поставки после отжига) имеет феррито-перлитную структуру, что не обеспечивает требуемых механических и эксплуатационных свойств. Термическое упрочнение изготавливаемых деталей рабочих органов осуществляли путём закалки с последующим низким отпуском для получения структуры мартенсита отпуска повышенной твердости (60...62 HRC). 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 объемной нанокристаллической структуры и фрагментации зерен мартенсита.

На рисунке 2, а, б показана микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП при увеличениях $\times 5\,000$, $\times 20\,000$. Максимальная длина игл мартенсита – 5...6 мкм, толщина игл – порядка 0,2...0,3 мкм. Структура образца характерна для мартенсита пакетного (реечного) типа со средним поперечным размером реек 450...550 нм.

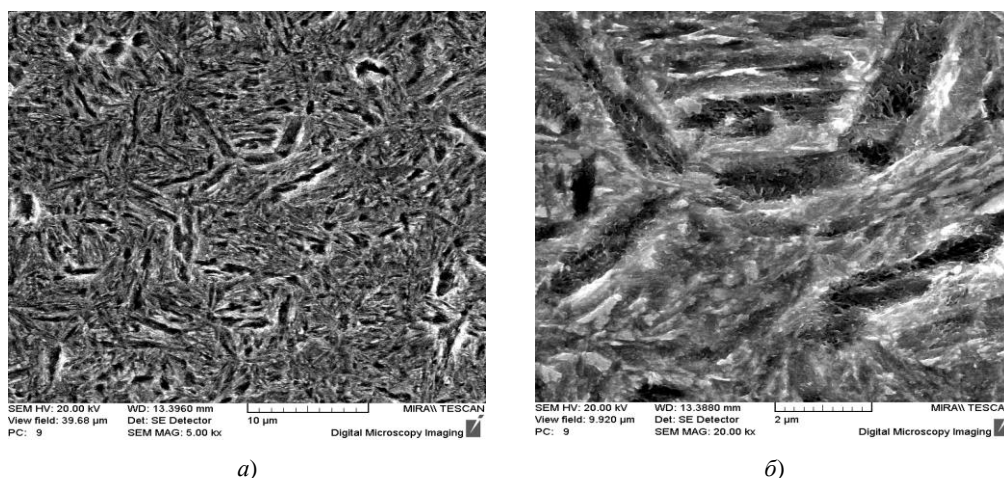
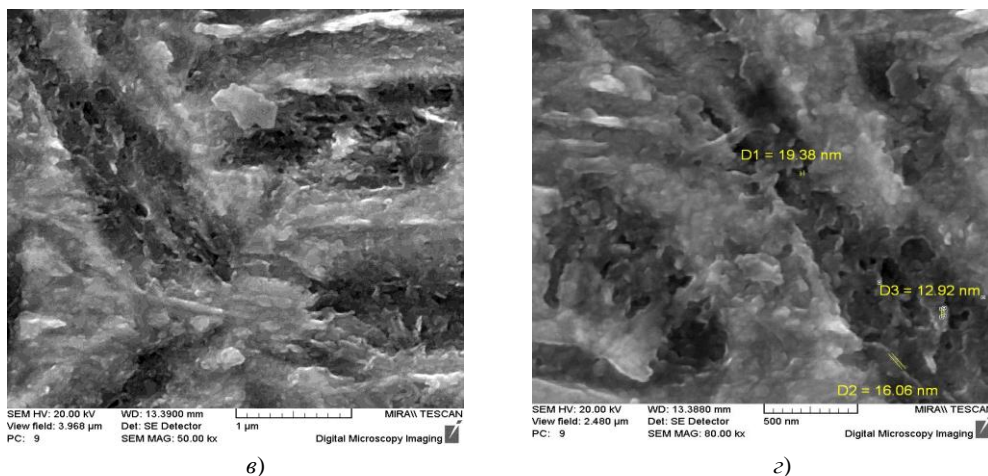


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8 мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска (см. также с. 48): а – увеличение $\times 5000$; б – $\times 20000$

Твердость по Роквеллу упрочненного слоя составляет 56...57 HRC. Только при увеличениях $\times 50\,000$ и $\times 80\,000$ методом электронной микроскопии выявлена фрагментация мартенсита (рис. 2, в, з).



в)

з)

Рис. 2. Окончание:

в – увеличение $\times 50\,000$; з – $\times 80\,000$

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 субмикрочерен. 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...12 мм показали, что размер 80 % фрагментов находится в диапазоне 0,02...0,08 мкм (табл. 1, рис. 3); после низкого отпуска при 180 °С размер фрагментов изменяется незначительно, 60 % составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02...0,06 мкм.

Таблица 1

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

Класс	Количество, шт.	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

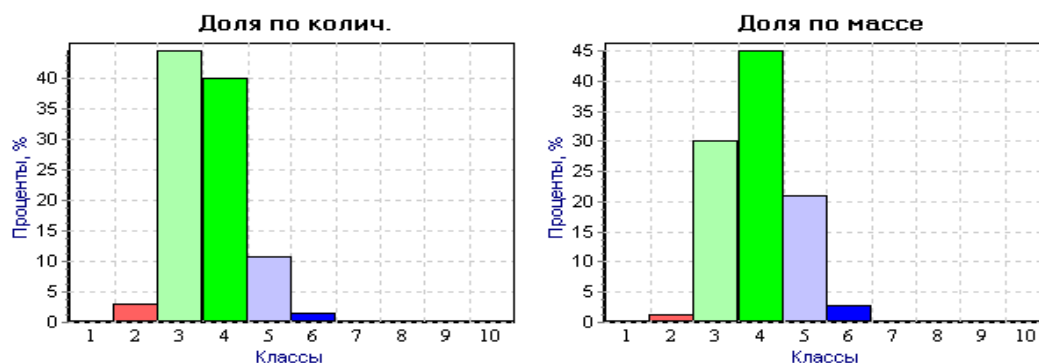


Рис. 3. Гистограммы распределения фрагментов мартенсита по длине в рабочей части детали из стали 60ПП после низкого отпуска: а – доля по количеству; б – доля по массе

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

Таблица 2

Расчетные параметры тонкой структуры в упрочненном слое стали 60ПП

Параметр тонкой структуры	Упрочненный слой
Ширина функции физического уширения	1,9211
Средняя относительная деформация, $\times 10^{-3}$	1,403
Плотность дислокаций, см^{-2} , $\times 10^{11}$	0,128
Размер области когерентного рассеяния, Å	101 ± 3
Параметр ячейки Å	2,8651

Из таблицы 2 видно, что в упрочненном слое размер области когерентного рассеяния уменьшается в 1,1 раза – от 116 до 101 Å, что подтверждается уширением линии на рентгенограмме. В 1,3 раза увеличивается величина средней относительной деформации от $1,095 \cdot 10^{-3}$ до $1,403 \cdot 10^{-3}$. Плотность дислокаций увеличивается в 1,6 раза от $0,780 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $0,128 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ относительно упрочненного слоя образца толщиной 12 мм. Распределение относительной среднеквадратической микродеформации – 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 %.

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 (табл. 3). Несущественное изменение значений структурно нечувствительного свойства (твердости) для различных режимов термического упрочнения в полной мере не отражают эту зависимость.

Таблица 3

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

Толщина образца, мм	Режим термической обработки	Структурные параметры мартенсита		Аустенит остаточный, %	Твердость, HRC	Характеристика структуры упрочненного слоя
		максимальная длина игл, мкм	средние 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, аморфно-кристаллическое состояние мартенситных пластин
12	ИЗОЖ + низкий отпуск	4	5...50	–	58	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4, аморфно-кристаллическое состояние мартенситных пластин
6	ИЗОЖ + низкий отпуск	4	30...60	6...10	60	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4

Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов стали 60ПП после термической обработки приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты испытаний упрочненной стали 60ПП на трехточечный изгиб

Номер образца	Геометрические размеры сечения образцов		Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности на изгиб, МПа
	толщина, мм	ширина, мм		
04/850/ без отпуска	11,93	7,59	50	3022,5
05/800/ без отпуска	11,92	7,92	50	2796,4
1т/800/ + низкий отпуск	9,75	8,05	50	3803,3
2т/850/ + низкий отпуск	9,46	8,62	50	4433,6

Изучение механических свойств стали 60ПП после закалки (без отпуска и с ним) показали, что наноструктурные изменения приводят к значительному увеличению предела прочности на изгиб в 1,35...1,45 раза.

Для получения более полной информации изучалось строение упрочненных слоев методом дифракции обратно рассеянных электронов. Исследования осуществляли на образце толщиной 12 мм после закалки и низкого отпуска в зоне упрочнения и вне её на сканирующем электронном микроскопе «Mira». Была проведена оценка разориентации фрагментов зерен мартенсита при различных режимах методом обратного рассеивания вторичных электронов. В результате исследований упрочненного слоя и вязкой сердцевины выявлена повышенная концентрация малоугловых границ в крупных зернах. Наибольшее количество фрагментов характеризуются разориентировкой границ меньше 2° .

На рисунке 4 представлены карта и гистограммы ориентации кристаллита с обозначенными границами зерен на участке упрочнения.

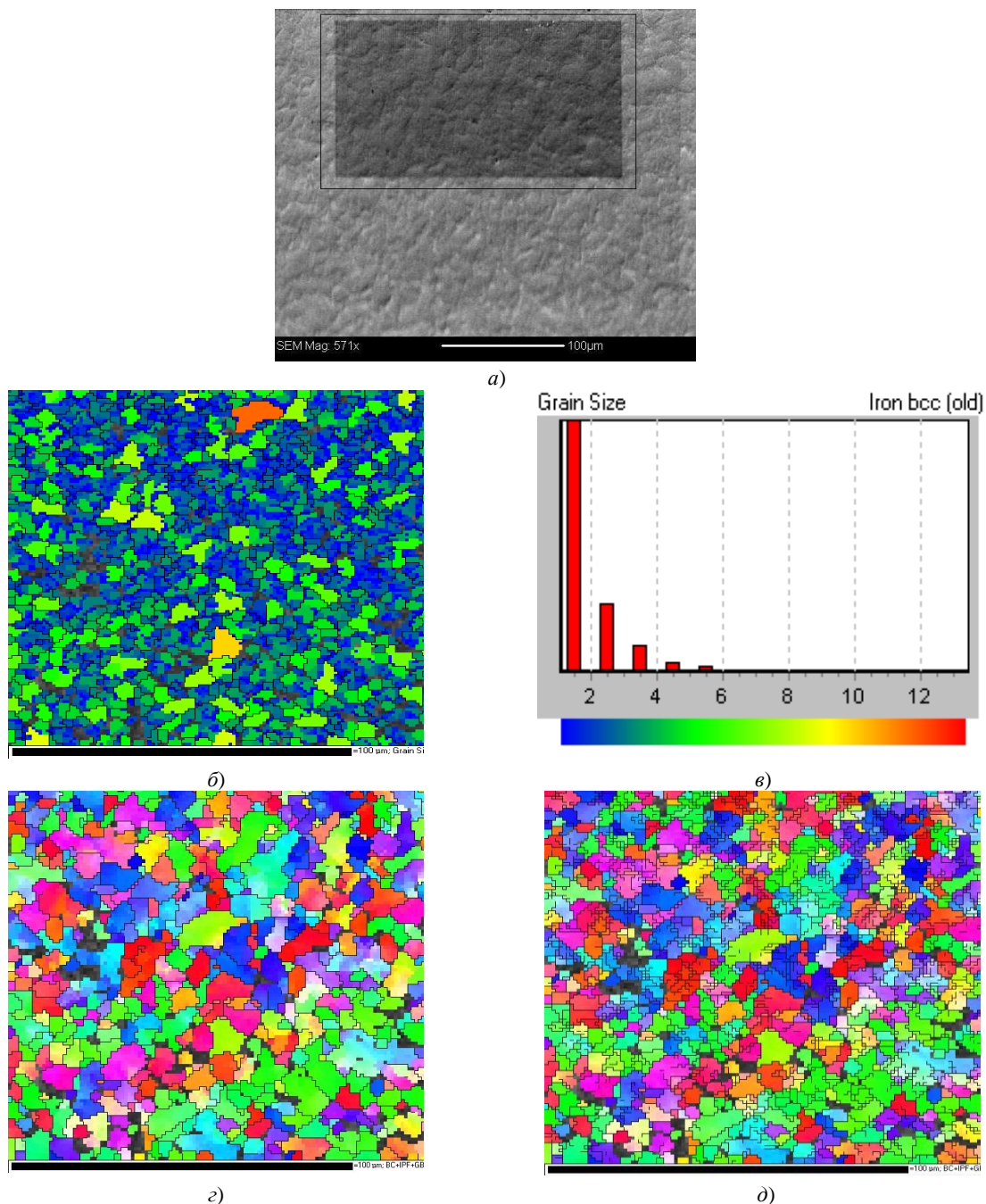


Рис. 4. Строение упрочненного слоя образца стали 60ПП:

a – анализируемый участок; *б* – карта распределения зерен по размерам; *в* – гистограмма распределения зерен по размерам;

г – границы зерен с углами разориентации больше десяти градусов;

д – границы зерен и фрагментов – субзерен с углами разориентации больше двух градусов

Из рисунка видно, что в упрочненном слое зерна разбиты на фрагменты (субзерна) с углами разориентации больше двух градусов. Преобладают зерна размером порядка 0,02...0,08 мкм. Размер субзерен меньше 0,1 мкм. В случае сердцевин разбитие зерен на фрагменты практически отсутствует, преобладают зерна размерами порядка 1...2 мкм.

Выводы:

1. В объёмных деталях рабочих органов из углеродистых сталей ПП при их импульсном закалочном охлаждении и низком отпуске формируется фрагментированная нанокристаллическая структура мартенсита, что позволяет достигнуть оптимального соотношения прочностных и вязкостных характеристик с максимальным обеспечением требуемых технико-экономических показателей.

2. Фрагментация микроструктуры углеродистых конструкционных сталей является не только предметом исследований, но становится реальной технологической операцией термической обработки стальных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин.

3. В результате выбранных режимов термообработки для стали 60ПП мелкоигльчатый мартенсит с наибольшей длиной игл, равной 1...4 мкм, дробится на отдельные, разориентированные под определёнными углами фасетки размерами 20...80 нм 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. *Материаловедение: учебник для высш. техн. учеб. заведений* / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьев. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. *Материаловедение: учеб. для вузов* / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – Изд. 8-е. – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 648 с.
3. Лякишев, Н.П. *Наноматериалы конструкционного назначения* / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов // *Российские нанотехнологии*. – 2006. – Т. 1, № 1 – 2. – С. 71 – 81.
4. Рыбин, В.В. *Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей* / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // *МИТОМ*. – 2009. – № 6(643). – С. 3 – 7.
5. Ушеренко, С.М. *Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов* / С.М. Ушеренко. – Минск: НИИ ИП с ОП, 1998. – 210 с.
6. *Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях* / И.В. Горынин [и др.] // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 2(54). – С. 7 – 19.
7. *Bulk nanocrystalline steel* // *Ironmaking and steelmaking*. – 2005. – V. 32. – P. 405 – 410.
8. Быков, Ю.А. *Структура и свойства конструкционных наноматериалов* / Ю.А. Быков // *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. – 320 с.

Поступила 23.01.2012

VOLUMINOUS NANOCRYSTALLINE WEAR-RESISTING PARTS OF WORKING ELEMENTS OF AGRICULTURAL EQUIPMENT

**G. BETENYA, G. ANISKOVIKH, A. ANDRUSHEVICH, P. DEKEVICH, D. LITOVCHIK, L. MARINICH,
E. PETIUSHIK, L. MARKOVA, I. FOMIKHINA**

The article presents information on the microstructural details of the structure of the hardened working parts from low carbon steel hardenability. Fragmentation of the microstructure of carbonic constructional steels is not only a subject for study, but has become substantive manufacturing operation of heat treatment of steel parts of agricultural machinery working elements. It was found that the use of pulsed cooling and hardening of low holiday provides steel products with a bulk nanocrystalline structure. In voluminous parts of the working elements made of carbon high-strength steel in the course of their impulse hardening cooling and deep drawing fragmented nanocrystalline structure of martensite is formed. Thus, we can reach optimum relationship hardening and viscosity ratings, with maximum provision of the required cost-performance ratio. Defined by the presence of nanoscale products and their parameters in detail by light and electron microscopy.