

ному поведению электронной системы управления, что в свою очередь приводит к ухудшению достоверности результатов при выполнении диагностирования. Результаты, полученные при компьютерном диагностировании обязательно необходимо подтверждать проведением поэлементного диагностирования. Использование функций активации исполнительных механизмов и вывод фактических параметров с использованием компьютерного сканирующего тестера значительно сокращают объем работ поэлементного диагностирования. Достоинством введения системы OBD-II является диагностирование электронных систем управления различных марок автомобилей универсальными сканирующими тестерами.

*Список использованных источников*

1. Элементы автоматики: учеб.-метод. пособие / М.Г. Киселев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – 113 с.
2. Экология и ресурсосбережение на транспорте: учебник / М.М. Болбас [и др.]; под ред. М.М. Болбаса. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2011. – 296 с.: ил.
3. Соснин, Д.А., Яковлев, В.Ф. Пowsейшие автомобильные электронные системы. – М.: СОЛОН - Пресс, 2005. – 240 с., ил.
4. Тюнин, А.А. Диагностика электронных систем управления двигателем легковых автомобилей. М.: СОЛОН - Пресс, 2007. – 352 с., ил.
5. Савич, Е.Л., Болбас, М.М., Ярошенич, В.К. Техническое обслуживание и ремонт легковых автомобилей / Под общ. ред. Е.Л. Савича. – Минск: Вышэйш. школа, 2001. – 252 с.
6. Электронные системы управления автомобилем: лабораторные работы (практикум) для студентов специальностей 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» и 1-37 01 07 «Автосервис»: в 3 ч. Ч. 1. «Диагностирование электронных систем управления двигателем» / Сост.: Е.Л. Савич, А.С. Гурский. – Минск: БНТУ, 2007. – 80 с.

УДК 631.3.02:621.78.084

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЗАКАЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОСТЬЮ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛЕЙ ПОНИЖЕННОЙ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ**

<sup>1</sup>*Бетенья Г.Ф., к.т.н., доцент, <sup>1</sup>Анискович Г.И., к.т.н., доцент,  
<sup>2</sup>Церба А.В, директор*

<sup>1</sup>*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск*

<sup>2</sup>*ОАО «Минский агросервис», г. Минск*

Для обеспечения длительной эксплуатации сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин (ДРОМ), работающих в тяжелых условиях абразивного изнашивания, характерных для почв республики, необходимо при их производстве применять качественные конструкционные стали и соответствующие технологии их упрочнения.

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 (твердости) 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 объемного 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].

В последнее время установлено, что наряду с интенсивной пластической деформацией эффективное формирование мелкодисперсных структур может быть достигнуто и при закалке конструкционных сталей за счет 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 применения углеродистых конструкционных сталей, в частности сталей пониженной прокаливаемости (ПП), отличающихся относительно дешевой и недефицитностью, возможен вариант термической обработки на получение мартенситной структуры с повышением их прочностных характеристик на 25–30% без снижения ударной вязкости [9]. Получение требуемых механических свойств достигается за счет формирования объемной нанокристаллической структуры при реализации импульсного закалочного охлаждения жидкостью (ИЗОЖ) рабочих органов с последующим низким отпускком.

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  $\pm 5$  °С, время аустенизации составляло 10 мин. Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода. Температура воды находилась в пределах 5–35 °С, время охлаждения – в интервале 0,5–5 с в зависимости от толщины изделия.

Техническое обеспечение технологии ИЗОЖ включает функционирование взаимосвязанных технических средств, с помощью которых реализуются:

- импульсная подача охлаждающей жидкости к закалочному устройству;
- управление продолжительностью технологического цикла охлаждения;
- управление в автоматическом режиме обратным снабжением охлаждающей жидкостью.

Оценка оптимальных технологических параметров термического цикла осуществлялась по показателям качества изделия. На первое место среди этих показателей ставится структурное состояние металла изделия, приобретаемое в процессе термической обработки.

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.

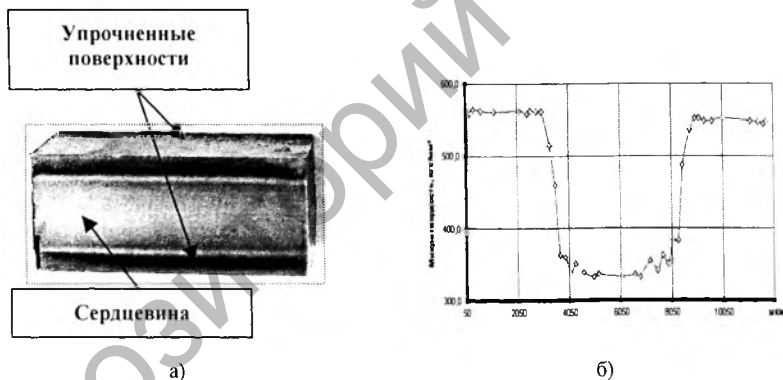


Рис. 1. Схема расположения исследуемых поверхностей а) и результатов измерения микротвердости по толщине б) образца из стали 60ГП

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 *SiK* монохроматизированном излучении, вторичная монохроматизация осуществлялась пироли- тическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Ко- личество остаточного аустенита и ма́ртенсита рассчитывались с помощью программы автоматизированного рентгеновского исследования «WinDif», по отношению интенсивностей линий всех фаз, присутствующих в образ- це.

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

Сталь 60ПП в исходном состоянии (в состоянии поставки после отжи- га) имеет феррито-перлитную структуру, что не обеспечивает требуемых механических и эксплуатационных свойств. Термическое упрочнение из- готавливаемых деталей рабочих органов осуществляют путем закалки с последующим низким отпускком для получения структуры мартенсита от- пуска повышенной твердости (60–62HRC). Применяемые температурно- временные режимы классической закалки приводят к высокой хрупкости стальных изделий, снижая их ресурс [9]. Использование интенсивного им- пульсного водяного охлаждения при термообработке стали 60ПП позволя- ет избежать этого недостатка в результате получения объемной нанокри- сталлической структуры и фрагментации зерен мартенсита.

На рисунке 2 (а, б) показаны микроструктура упрочненного слоя об- разца 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 (реечного) типа со средним поперечным размером реек 450–550 нм. Твердость по Роквел- лу упрочненного слоя – 56–57 HRC.



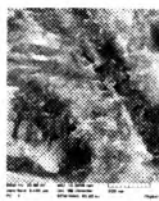
а)



б)



в)



г)

**Рис. 2.** Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8 мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска:

а) -  $\times 5000$ ; б) -  $\times 20000$ ; в) -  $\times 50000$ ; г) -  $\times 80000$

Только при увеличениях  $\times 50000$  и  $\times 80000$  методом электронной микроскопии выявлена фрагментация мартенсита (рис. 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.

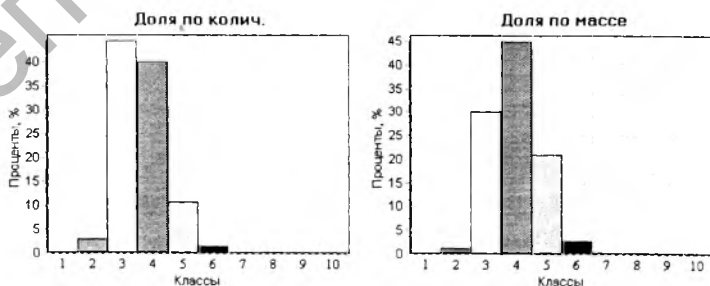
На отдельных фрагментах проявляются очертания субмикрозерен. Края мартенситных пластин и фрагментов частично размыты, что говорит об их аморфно-кристаллическом состоянии.

Статистические данные по средней длине фрагментов мартенситных пластин стали 60ПП после упрочнения рабочей поверхности деталей толщиной 6–12 мм показали, что размер 80% фрагментов находится в диапазоне 0,02–0,08 мкм (табл. 1 и рис. 3). После низкого отпуска при 180 °С размер фрагментов изменяется незначительно, 60% составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02–0,06 мкм.

Результаты рентгеноструктурных исследований и расчетов параметров тонкой структуры образца толщиной 6 мм 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



**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

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 101 Å, 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 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 %.

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

Толщина образца, мм	Режим термической обработки	Структурные параметры мартенсита		Аустенит ост., %	Твердость, HRC	Характеристика структуры упрочненного слоя
		Макс. 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, 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	6-10	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 ее механические свойства (табл. 3). Несущественное изме-

нение значений структурно-нечувствительного свойства (твердости) для различных режимов термического упрочнения в полной мере не отражает эту зависимость. Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов стали 60ПП после термической обработки приведены в таблице 4. Изучение механических свойств стали 60ПП после закалки (без и с отпуском) 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 ее 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  $2^\circ$ .

Таблица 4 – Результаты испытаний упрочненной стали 60ПП на трехточечный изгиб

Шифр 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

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 сердцевине разбиение зерен на фрагменты практически отсутствует, преобладают зерна размерами порядка 1–2 мкм.

Внешние поверхности трения ДРОМ, имея дисперсную структуру мартенсита, обладают комплексом механических и триботехнических свойств: твердость около 60 HRC; прочность не менее 2000 МПа; ударная вязкость свыше 1 МДж/м<sup>2</sup>; коэффициент относительной абразивной износостойкости не менее 3,0–3,5.

По технологии ИЗОЖ с использованием сталей пониженной и регламентированной прокаливаемости (55ПП, 60ПП, 55РП и др.) в настоящее время изготавливается целый ряд различных по конструкции сменных ДРОМ почвообрабатывающих и кормоуборочных машин (лемехи, полевые доски, груди отвалов плугов, стрельчатые и оборотные лапы культив-

ваторов, ножи измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов, ножи измельчителей рулонов и др.).

По техническому уровню ДРОМ, изготовленные в соответствии с разработанной технологией, являются конкурентоспособными изделиями в сравнении с лучшими зарубежными аналогами.

**Заключение.** 1. В объемных 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 1–4 мкм дробится на отдельные, разориентированные под определенными углами фасетки размерами 20–80 нм внутри пластинок мартенсита. При этом характеристики ее механических свойств (например, предел прочности на изгиб) возрастают на 35–45%, что существенно превосходит аналогичные показатели при традиционных режимах закалки и отпуска.

#### *Список использованных источников*

1. Лахтин, Ю.М., Леонтьев, В.П. *Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений.* – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. Арзамасов, Б.Н. *Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – Изд. 8-е.* – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 648 с.
3. Лякишев, Н.П., Алымов, М.И. *Нanomатериалы 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. *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. – P. 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. – 320 с.