

## МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ Пониженной прокаливаемости при импульсном закалочном охлаждении жидкостью

*Григорий Бетенья, Геннадий Анискович*

*(УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»)*

*Пр. Независимости 99, Минск, Беларусь E-mail: rektorat@batu.edu.by*

*Grigory Betenya, Gennady Aniskovich*

*(EE "Belarusian State Agrarian Technical University")*

*Pr. Nezavisimosti 99, Minsk, Belarus E-mail: rektorat@batu.edu.by*

**Аннотация.** 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 объемной нанокристаллической структурой, являющейся основой повышения конструкционной прочности и износостойкости деталей.

**Ключевые слова:** сталь, прочность, износостойкость, нанокристаллическая структура.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

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 [1,11]. 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 [1, 12, 18].

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

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, 11, 20];

2. Упрочнение за счёт фрагментации - специального управляемого измельчения структуры стали [2, 3, 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 [12]. Практические результаты достигнуты европейскими, американскими и японскими производителями. В работе [2] 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 относительно дешевой и недефицитностью, возможен вариант термической обработки на получение мартенситной структуры с повышением их прочностных характеристик на 25-30% без снижения ударной вязкости [17].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной целью настоящей работы являлось предоставление информации и ознакомление заводских технологов с возможностями формирования объемной 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.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Термическая обработка деталей рабочих органов из углеродистой стали 60ПП, выполнялась на экспериментальной закалочной установке с различной интенсивностью ох-

лаждения. Детали нагревались до температуры закалки с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ , время аустенизации составляло 10 минут. Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода. Температура воды находилась в пределах  $5\text{--}35^\circ\text{C}$ , время охлаждения - в интервале 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* 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.

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 осуществляется 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 [17]. Использование интенсивного импульсного водяного охлаждения при термообработке стали 60ПП позволяет избежать этого недостатка в результате получения объемной нанокристаллической структуры и фрагментации зерен мартенсита.

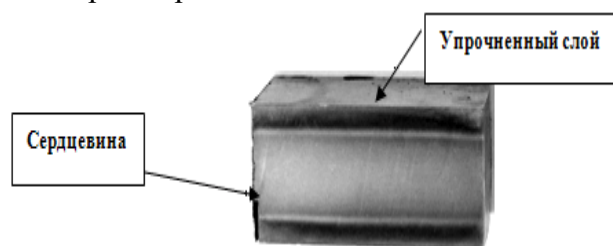


Рис. 1. Схема расположения исследуемых поверхностей образца стали 60ПП

Fig. 1. Map of the surfaces of the sample were investigated 60PP

На рисунке 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 (реечного) 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

# МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПОНИЖЕННОЙ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАКАЛОЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ЖИДКОСТЬЮ

деталей толщиной 6-12мм показали, что размер 80% фрагментов находится в диапазоне 0,02 - 0,08мкм (таблица 1 и рисунок 3) После низкого отпуска при 180°C 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 6мм в упрочненном слое только после закалки приведены в таблице 2.

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 %.

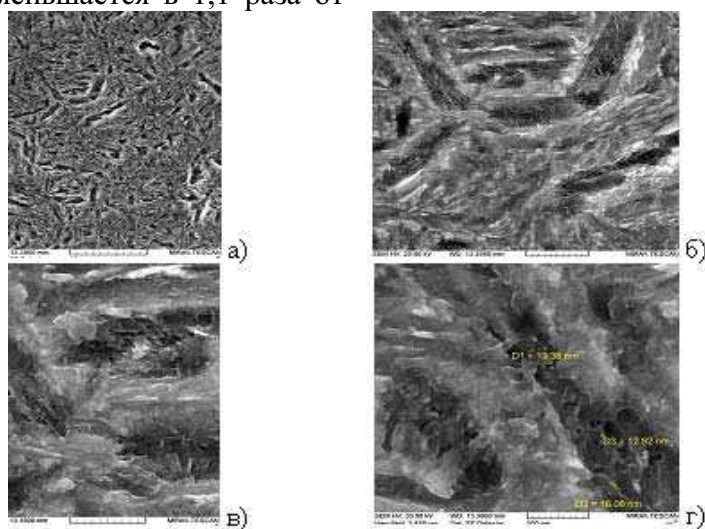


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска: а) - х5000; б) - х20000; в) - х50000; г) - х80000

Fig. 2. The microstructure of the hardened layer of the sample 60PP 8mm thick steel after quenching pulse cooling water and low-temperature: a) - h5000 b) - h20000 c) - h50000 d) - h80000

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

Table 1 - Splitting into classes according to the length of the fragments in the martensite plates, steel parts 60PP after low tempering

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

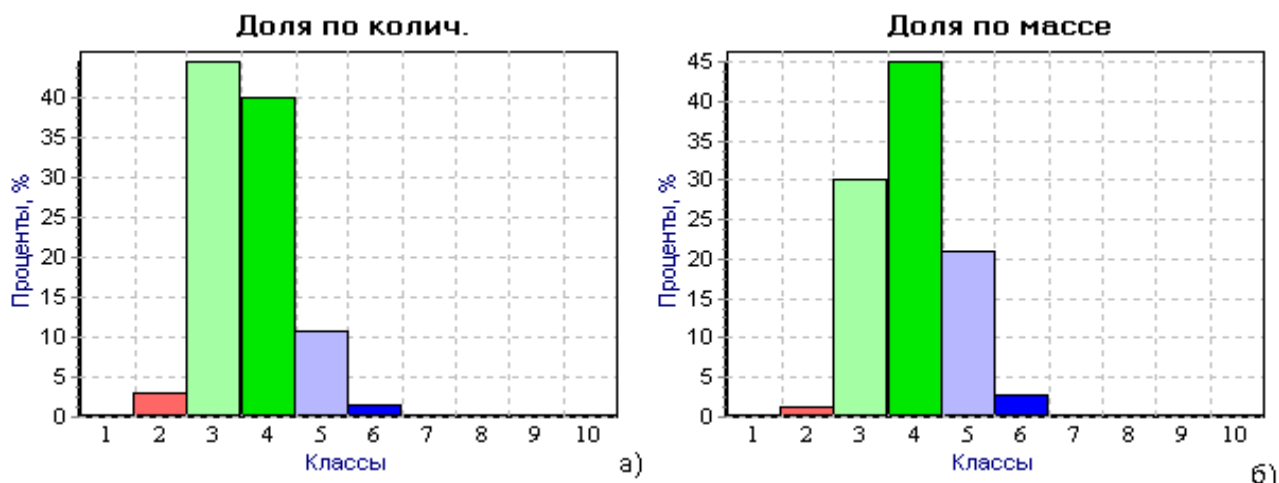


Рис. 3. Гистограммы распределения фрагментов мартенсита по длине в рабочей части детали из стали 60ПП после низкого отпуска: а) доля по количеству; б) доля по массе

Fig. 3. Histograms of the distribution of fragments along the length of the martensite in the working part of steel parts 60PP after low tempering: a) the proportion of the number, and b) the proportion by weight

Таблица 2. Расчетные параметры тонкой структуры в упрочненном слое стали 60ПП  
Table 2. Estimated parameters of the fine structure in the hardened layer steel 60PP

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	$101 \pm 3$
Параметр ячейки Å	2,8651

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 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 12мм 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  $2^\circ$ .

На рисунке 4 представлены карта и гистограммы ориентации кристаллита с обозначенными границами зерен на участке упрочнения. 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 сердцевины разбиение зерен на фрагменты практически отсутствует, преобладают зерна размерами порядка 1 - 2 мкм.

**МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПОНИЖЕННОЙ  
ПРОКАЛИВАЕМОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАКАЛОЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ  
ЖИДКОСТЬЮ**

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

Table 3. Structural characteristics 60PP carbon structural steel in various modes of heat treatment

Толщина образца, мм	Режим термической обработки	Структурные параметры мартенсита		Аустенит ост., %	Твердость, HRC	Характеристика структуры упрочненного слоя
		Максимальная длина игл, мкм	Средние размеры фрагментов, нм			
8	ИЗОЖ+низкий отпуск	6	40-50	-	57	Мелкоигольчатый мартенсит, балл 4
8	ИЗОЖ+низкий отпуск	4	10-50	-	56	Мелкоигольчатый мартенсит, балл 3
8	ИЗОЖ+низкий отпуск	3	40-70	-	54	Мелкоигольчатый мартенсит, балл 2-3, аморфно-кристаллическое состояние мартенситных пластин
12	ИЗОЖ+низкий отпуск	4	5-50	-	58	Мелкоигольчатый мартенсит, балл 4, аморфно-кристаллическое состояние мартенситных пластин
6	ИЗОЖ+низкий отпуск	4	30 - 60	6-10	60	Мелкоигольчатый мартенсит, балл 4

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

Table 4. Test Results hardened steel three-point bending 60PP

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



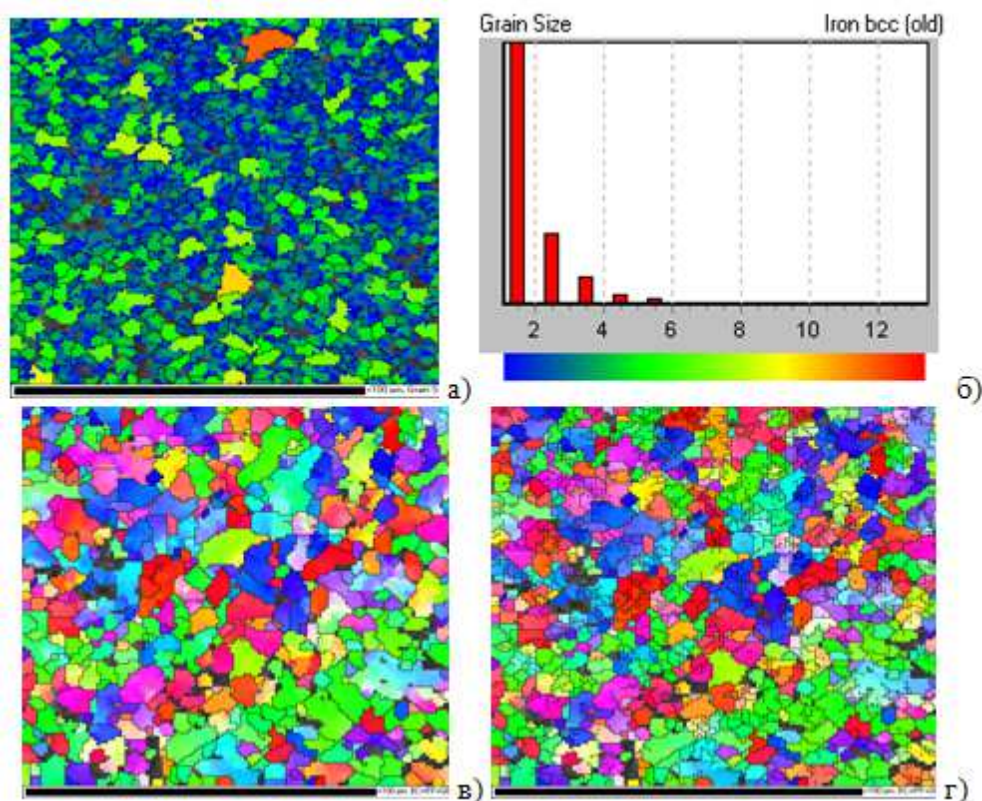


Рис. 4. Строение упрочненного слоя образца стали 60ПП

а) карта распределения зерен по размерам; б) гистограмма распределения зерен по размерам; в) границы зерен с углами разориентации больше десяти градусов; г) границы зерен и фрагментов – субзерен с углами разориентации больше двух градусов

Fig. 4. Structure of the hardened layer of the sample were 60PP

a) The map of the distribution of grain sizes, and b) a histogram of the grain size distribution, and c) the grain boundaries with misorientation angles of more than ten degrees, and d) the grain boundaries and fragments - subgrains with misorientation angles of more than two degrees

### 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 мелкоугольчатый мартенсит с наибольшей длиной игл 1 - 4 мкм дробится на отдельные, разориентиро-

ванные 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. Arzamasov B. N. 2008. Materialovedeniye: uchebnyk dlya vuzov. Izd. 8-e. Moskva: Izd-vo MGTU, 648.
2. Bulk nanocrystalline steel. Ironmaking and steelmaking.-2005.-V.32-405-410. 7
3. Bykov Yu. A. 2010. Struktura i svoystva konstruksionnykh nanomaterialov. Prilozheniye №7 k zhurnalu «Spravochnik. Inzhenerny zhurnal», №7, 1-24.
4. Simonov Yu. N., Nishta A. P., Yugay S. S., Pertsev A. S. 2010 Dispergirovaniye struktury

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПОНИЖЕННОЙ  
ПРОКАЛИВАЕМОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЗАКАЛОЧНОМ ОХЛАЖДЕНИИ  
ЖИДКОСТЬЮ

- stali 35Kh vplot do nanourovnya s tselyu sozdaniya materiala dlya sudov vysokogo davleniya. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. – №11. 7-12.
5. Maslenkov S. B., Lyapunov V. M., Zinchenko V. M., Ushakov B. K. 2003. Entsiklopedichesky spravochnik termista-tehnologa : v 3 T. : T.1 Pod obshch. red. S.B. Maslenkova. M. : Nauka i tekhnologii, – 392.
6. Maslenkov S. B., Lyapunov V. M., Zinchenko V. M., Ushakov B. K. 2004. Entsiklopedichesky spravochnik termista-tehnologa : v 3 T. : T.3 Pod obshch. red. S.B. Maslenkova. M.: Nauka i tekhnologii, – 704.
7. Sarychev V. D., Granovsky A. Yu., Starovatskaya S. N., Gromov V. E. 2012. Gidrodinamicheskaya model obrazovaniya nanostrukturnykh sloyev. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Chernaya metallurgiya. – №6. – 57-60.
8. Gorynin I. V. 2008. Ekonomnolegirovannyye stali s nanomodifitsirovannoy strukturoy dlya ekspluatatsii v ekstremalnykh usloviyakh. Voprosy materialovedeniya. №2(54), 7-19.
9. Khronika. Vtoroy Vserossysky seminar po problemam zakalochnogo okhlazhdeniya. - M i TOM. 1997. №10. 37-38.
10. Kobasko N. I. 1980. Zakalka stali v zhidkikh sredakh pod davleniyem – K. : Naukova Dumka, -208.
11. Lakhtin Yu. M., Leontyev V. P. 1990. Materialovedeniye. : Uchebnik dlya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeny. – M. : Mashinostroyeniye, – 528.
12. Lyakishev N. P., Alymov M. I. 2006. Nanomaterialy konstruktsionnogo naznacheniya. Rossyskiye nanotekhnologii, T.1, № 1-2, 71 - 81.
13. Ksenevich I. P., Varlamov G. P., Kolchin N. N. 2002. Mashinostroyeniye. Entsiklopediya. - M. : Mashinostroyeniye. Selskokhozyaystvennyye mashiny i oborudovaniye. / pod red. I.P. Ksenevicha. // T. IV-16. – 720.
14. Kechin V. A., Vaganov V. E. 2010. Osnovnyye tendentsii sozdaniya nanostrukturirovannykh materialov. Metallurgiya mashinostroyeniya. – №2. 27-30.
15. Panin V. E., Yegorushkin V. E. 2009. Fizicheskaya mezomekhanika i neravnovesnaya termodinamika kak metodologicheskaya osnova nanomaterialovedeniya. Fizicheskaya mezomekhanika – T. 12. № 4. – 7-26.
16. Panin V. E., Yegorushkin V. E. 2010. Nanostrukturnye sostoyaniya v tverdykh telakh. Fizika metallov i metallovedeniye – T. 110. №5, – 486-496.
17. Shilo I. N. 2010.-Povysheniye rabotosposobnosti detaley rabochikh organov selskokhozyaystvennykh mashin. - Minsk : BGATU, 320.
18. Rybin V. V., Malyshevsky V. A., Khlusova Ye. I. 2009. Tekhnologii sozdaniya konstruktsionnykh nanostrukturirovannykh staley. MITOM, №6 (643), 3-7.
19. Vaganov V.E., Kechin V. E., Yevdokimov I. A. 2010. Sovremennyye dostizheniya po polucheniyu materialov s nanokristallicheskoy strukturoy. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. – №6. 3-11.
20. Usherenko S. M. 1998. Sverkhglubokoye pronikaniye chastits v pregrady i sozdaniye kompozitsionnykh materialov. Minsk : NII IP s OP, – 210.
21. Volokushin V. 2005. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. Uch.-sprav. posobiye. Vinnitsa : Kniga-Vega. - 504.

**MODIFICATION OF THE STRUCTURE  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF  
STEEL LOWER HARDENABILITY AT  
PULSE HARDENING LIQUID COOLING**

**Summary.** 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, the basis of the strength and wear resistance.

**Key words:** steel, toughness, wear resistance, nanocrystalline structure.