

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.3.02:621.78.084

Г. Ф. Бетня, Г. И. Анискович

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
Минск

ОПЫТ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛЕЙ ПОНИЖЕННОЙ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ ИМПУЛЬСНЫМ ЗАКАЛОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЖИДКОСТЬЮ

Приведены технологические аспекты упрочнения деталей из сталей пониженной прокаливаемости (55ПП, 60ПП) с применением термической обработки, сведения о микроструктурном строении упрочнённых деталей рабочих органов из углеродистых сталей пониженной прокаливаемости. Показано, что технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью (далее — ИЗОЖ) позволяет формировать мелкозернистую структуру, являющуюся основой повышения конструкционной прочности и износостойкости деталей.

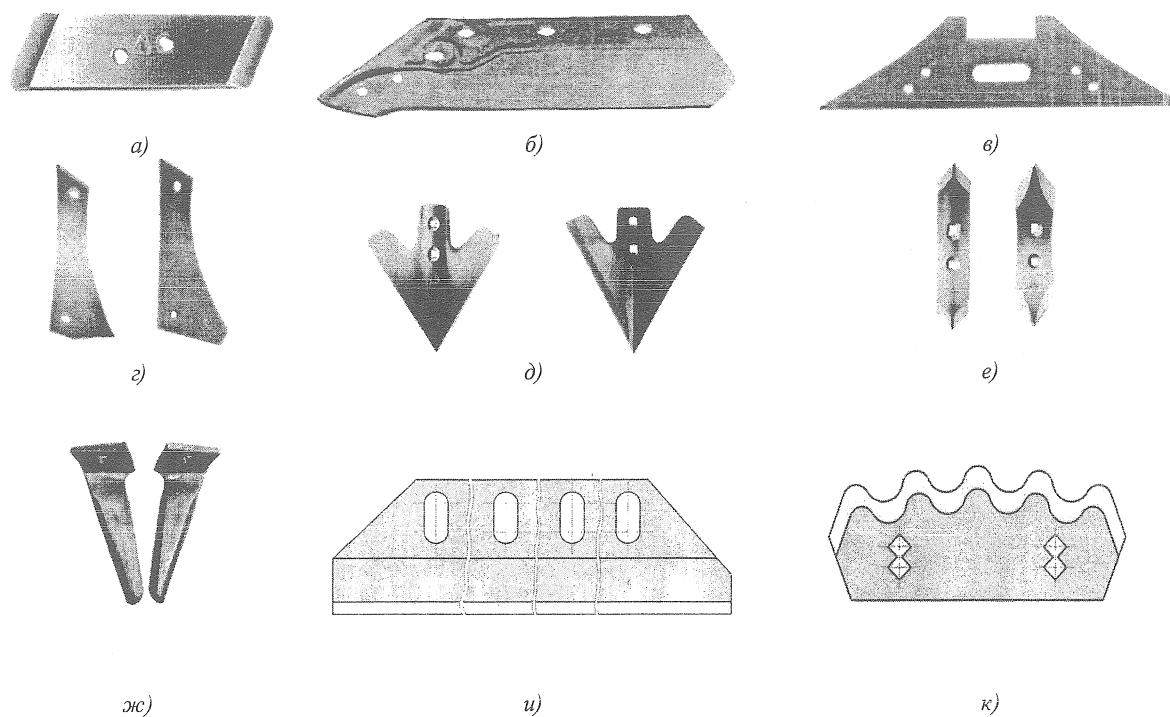
Введение. Сменные детали рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин (далее — ДРОМ) определяют их технический уровень [1], [2]. Проблема повышения надёжности сельскохозяйственной техники в целом, а также сменных ДРОМ в отдельности является сегодня одной из важнейших задач. Для предприятий республики, являющихся на территории СНГ основными поставщиками продукции сельскохозяйственного машиностроения нового поколения, имидж формируется, главным образом, показателями технического уровня производимой сельскохозяйственной техники.

Традиционно применяемые материалы и технологии упрочнения сменных ДРОМ достигли своего предела в получении требуемого уровня конструкционной прочности и износостойкости и подлежат эффективной замене. Основная причина состоит в том, что с увеличением прочности (твёрдости) и износостойкости пластичность сталей уменьшается.

Сменные ДРОМ относятся к числу самых сложных изделий сельскохозяйственного машиностроения (рисунок 1). Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, а также с различными рабочими средами

(почвой, растительной массой, влагой и т. д.) Этим экстремальным условиям эксплуатации должны соответствовать основные критерии работоспособности (прочность, твёрдость, ударная вязкость, пластичность, износостойкость) сменных ДРОМ.

На современном этапе развития материаловедения требуемые прочность, надёжность, долговечность и износостойкость применяемых конструкционных материалов, в частности сталей, должны достигаться целенаправленным формированием в них суб-, микро- и нанокристаллического структурного состояния [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Теория сплавов [3] и производственный опыт свидетельствуют, что для формирования наиболее благоприятной структуры и обеспечения прочности и надёжности получаемых стальных изделий должны применяться следующие основные варианты: рациональное легирование; измельчение зерна; металлургическое качество стали. Прогнозный анализ показывает, что в обозримом будущем для изготовления сменных ДРОМ стальной прокат останется преимущественным материалом. Потенциал стали как материала для сельскохозяйственного машиностроения



a — долото; *б* — лемех; *в* — полевая доска; *г* — груди отвалов; *д* — стрелчатые лапы; *е* — оборотные лапы; *жс* — зубья роторных борон; *и* — нож измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна; *к* — нож измельчителей рулонов

Рисунок 1 — Типовые представители сменных ДРОМ почвообрабатывающих и кормоуборочных машин

не исчерпан, о чём свидетельствует происходящая явная смена приоритетов в металловедении. Усиленно разрабатываются новые способы термической обработки стальных изделий из низко- и среднеуглеродистых сталей, чему раньше уделяли мало внимания. На первый план выступает задача использования нелегированных сталей. Расширяется круг научных работ по термической обработке изделий из сталей регламентированной (РП) и пониженной прокаливаемости (ПП), отличающихся относительной дешевизной и доступностью. В настоящее время претерпели в производственных условиях изготовленные из сталей ПП сменные ДРОМ нового поколения с использованием отечественной технологии ИЗОЖ.

Основной целью публикуемой статьи является ознакомление научных работников, технологов предприятий с возможностями формирования нанокристаллической структуры в сменных ДРОМ, изготовленных из

углеродистой стали 55ПП, 60ПП и упрочнённых по технологии ИЗОЖ с последующим низким отпуском, а также приобретаемых ими физико-механических свойствах.

Методология и методы исследования. 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 упрочнённых поверхностей деталей после закалки и низкого отпуска проводилось на образцах в двух плоскостях по схеме (рисунок 2). Образцы вырезались из деталей рабочих органов (лемехов, дисков и др.) почвообрабатывающих машин после различных режимов термической обработки.

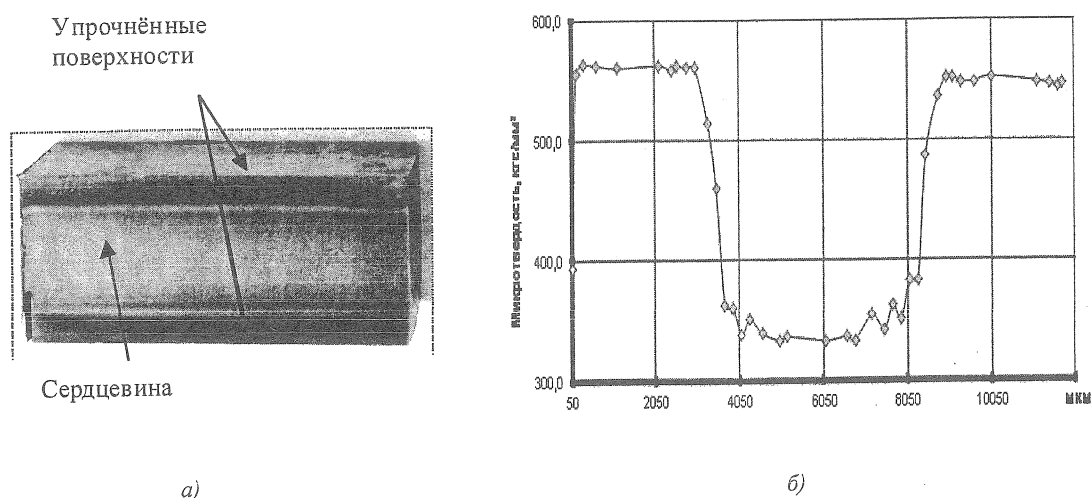


Рисунок 2 — Схема расположения исследуемых поверхностей (а) и результатов измерения микротвёрдости по толщине (б) образца из стали 60ПП

Микроструктура упрочнённого слоя и сердцевины изучалась на световом микроскопе MeF-3 фирмы Reichert (Австрия) при увеличении 500. Микроструктура упрочнённых слоёв дополнительно исследовалась на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira фирмы Tescan (Чехия) при увеличении 5 000, 20 000, 50 000, 80 000 и с использованием детектора Nordlys II EBSD (Oxford Instruments) обратно рассеянных электронов.

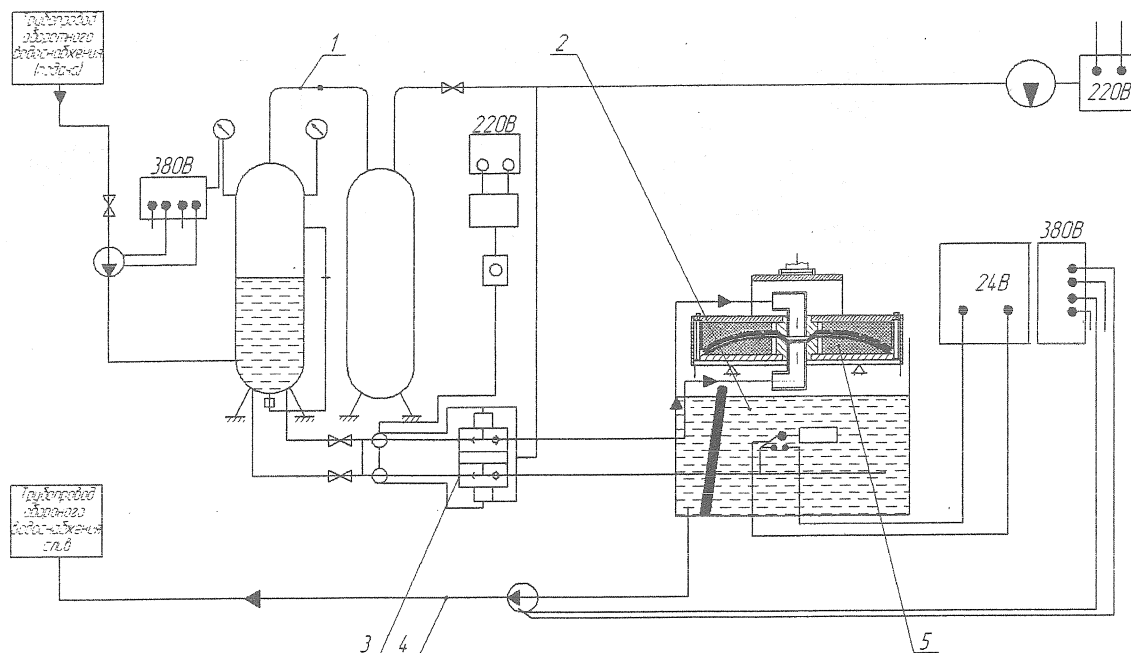
Характеристика и балл мартенсита определялись по ГОСТ 8233-56 [9], размеры фрагментов мартенсита с использованием метода секущих (метод подсчёта пересечений границ зёрен по ГОСТ 5639-82 [10]).

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 рассчитывалось с помощью программы автоматизированного рентгеновского исследования WinDif, по отношению интенсивностей линий всех фаз, присутствующих в образце.

Твёрдость по Роквеллу определялась на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013-59 [11]. Испытания на трёхточечный изгиб (ГОСТ 14019-2003 [12]) проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон 1195».

Организация исследования. Первоначально экспериментальные работы по упрочнению сменных ДРОМ из углеродистой стали 60ПП выполнялись на базе технологического научно-производственного центра БГАТУ. Исследования проводились с использованием установки ТМ-60 (рисунок 3). Заготовки нагревались до температуры закалки с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$, время аустенизации составляло 10 мин. Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода. Температура воды находилась в пределах $5...35^\circ\text{C}$, время охлаждения — от $-0,5$ до 5 с в зависимости от толщины изделия. Интенсивность охлаждения исследовалась в интервале от $1\ 000^\circ\text{C}/\text{с}$ до $20\ 000^\circ\text{C}/\text{с}$.

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



1 — блок управления расходом охлаждающей жидкости; 2 — блок управления отводом охлаждающей жидкости; 3 — система управления клапаном «Бабочка»; 4 — система обратного водоснабжения; 5 — закалочное устройство

Рисунок 3 — Принципиальная схема технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью

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

Результаты исследования и их обсуждение. Сталь 60ПП в исходном состоянии (поставка после отжига) имеет феррито-перлитную структуру. Термическое упрочнение изготавливаемых образцов сменных ДРОМ осуществлялось путём закалки с последующим низким отпускком. Применяемые температурно-временные режимы традиционной закалки (погружением) приводят к высокой хрупкости стальных изделий, снижая их ресурс [2]. Использование интенсивного импульсного водяного охлаждения при термообработке стали 60ПП позволяет избежать этого недостатка получением нанокристаллической структуры

в результате фрагментации продуктов фазового превращения.

В работах [13], [14] сообщается, что в твёрдых телах в полях внешних воздействий любой природы возникают локальные нарушения трансляционной инвариантности кристаллической структуры. В результате этого кристалл непрерывно фрагментируется. Физический предел измельчения твёрдого тела, согласно [14], определяется неравновесным термодинамическим потенциалом Гиббса, а также многими другими факторами.

Выполненные исследования технологии ИЗОЖ для определённых параметров режимов (область высоких скоростей охлаждения 10 000°С / с и более) свидетельствуют о наличии фрагментации мартенсита наноразмерного масштаба, что, по рекомендациям [13], [14], можно классифицировать как наноструктурные материалы. На рисунке 4, а и б, показаны микроструктуры упрочнённого слоя образца стали 60ПП при увеличениях.

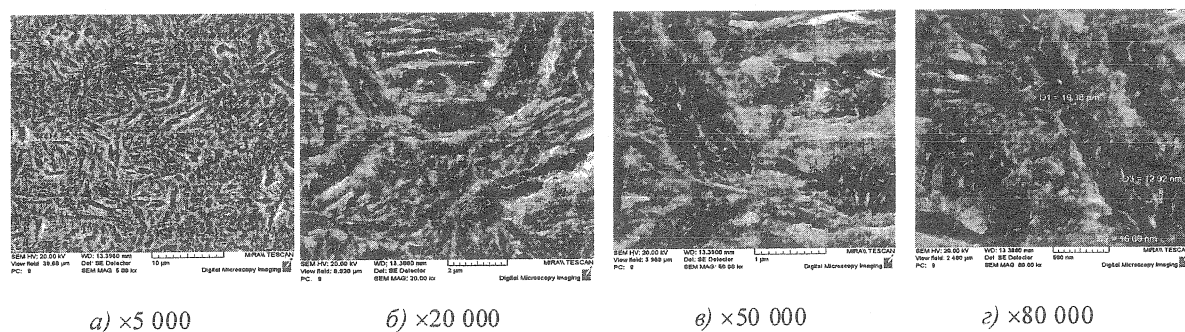


Рисунок 4 — Микроструктура упрочнённого слоя образца стали 60ПП толщиной 8 мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска

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, твёрдость упрочненного слоя по Роквеллу — 56...57 HRC.

Только при более значительных увеличениях методом электронной микроскопии выявлена фрагментация мартенсита (см. рисунок 4, в и г). В результате исследований определено, что мартенситные иглы частично фрагментированы, размеры фрагментов находятся в диапазоне 20...150 нм, средний размер — 40...50 нм.

На отдельных фрагментах проявляются очертания субмикрозёрен. 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 (таблица 1). После низкого отпуска при 180°C их размер изменяется незначительно, 60% составляют фрагменты зёрен мартенсита размерами 0,02...0,06 мкм.

Т а б л и ц а 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	0,00...0,02	0,00	0,00
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	40,00	45,04
5	7	0,08...0,10	10,77	20,88
6	1	0,10...0,12	1,54	2,85
7	0	0,12...0,14	0,00	0,00
8	0	0,14...0,16	0,00	0,00
9	0	0,16...0,18	0,00	0,00
10	0	0,18...0,20	0,00	0,00

Результаты испытаний на трёхточечный изгиб образцов стали 60ПП после термической обработки приведены в таблице 2. Изучение механических свойств стали 60ПП после закалки (без отпуска и с отпуском) показали, что наноструктурные изменения приводят к увеличению предела прочности на изгиб в 1,35...1,45 раза.

Для получения более полной информации изучалось строение упрочнённых слоёв 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 зёрен мартенсита при различных режимах методом обратного

рассеивания вторичных электронов. В результате исследований упрочнённого слоя и вязкой сердцевины выявлена повышенная концентрация малоугловых границ в крупных зёрнах. Наибольшее количество фрагментов характеризуются разориентацией границ меньше 2° .

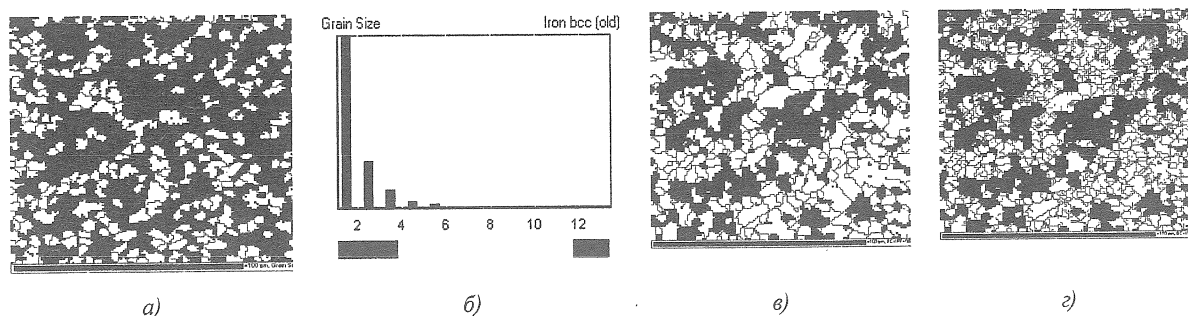
В упрочнённом слое (рисунок 5) зёрна разбиты на фрагменты (субзёрна) с углами разориентации больше 2° , при этом преобладают зёрна размером 0,02...0,08 мкм, размер субзёрен меньше 0,1 мкм.

В сердцевине разбиение зёрен на фрагменты практически отсутствует, преобладают зёрна размерами 1...2 мкм.

По технологии ИЗОЖ с использованием сталей пониженной прокаливаемости (55ПП, 60ПП) в настоящее время изготавливается

Т а б л и ц а 2 — Результаты испытаний упрочнённой стали 60ПП на трёхточечный изгиб

Шифр образца	Геометрические размеры сечения образцов, мм		Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности на изгиб, МПа
	толщина	ширина		
04/850/ без отпуска	11,93	7,59	50	3 022,5
05/800/ без отпуска	11,92	7,92	50	2 796,4
1т/800/+ низкий отпуск	9,75	8,05	50	3 803,3
2т/850/+ низкий отпуск	9,46	8,62	50	4433,6



а — карта распределения зёрен по размерам; б — гистограмма распределения зёрен по размерам; в — границы зёрен с углами разориентации больше 10° ; г — границы зёрен и фрагментов (субзёрен) с углами разориентации 2°

Рисунок 5 — Строение упрочнённого слоя образца стали 60ПП

целый ряд различных по конструкции сменных ДРОМ почвообрабатывающих и кормоуборочных машин. Разработанные технологии изготовления сменных ДРОМ нового поколения освоены на ОАО «КЗТШ» (г. Жодино), РУП «МЗШ», ОАО «БЭМЗ», ОАО «Дрогичинский ТРЗ», ОАО «Минский Агросервис», КУПП «Берёзаагросервис», ТНПЦ БГАТУ и др. За последние 2,5 года предприятиями республики произведено сменных ДРОМ на сумму 15,4 млрд р. Стоимость деталей отечественного производства на 20...30% ниже стоимости импортных аналогов.

Отличительными свойствами сменных ДРОМ нового поколения являются сочетание высоких показателей твёрдости (около 60 HRC), прочности (свыше 2 000 МПа), ударной вязкости (не менее 1,0 МДж / м²), пластичности, наличие наноразмерного (30...80 нм) структурного строения, абразивной износостойкости (коэффициент не менее 3,0...3,5). Технологии производства сменных ДРОМ нового поколения в ближайшие 10...15 лет будут обладать коммерческой перспективой. По техническому уровню сменные ДРОМ, изготовленные в соответствии с разработанной технологией, являются конкурентоспособными изделиями в сравнении с лучшими зарубежными аналогами.

Заключение. Проведённые исследования позволяют утверждать следующее:

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 достигать оптимального соотношения прочностных и вязкостных характеристик с максимальным обеспечением требуемых технико-экономических показателей.

2. Фрагментация микроструктуры углеродистых конструкционных сталей не только является предметом исследований, но и становится реальной технологической операцией термической обработки стальных сменных

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 определёнными углами, фасетки размерами 20...80 нм внутри пластинок мартенсита. При этом характеристики механических свойств (например, предел прочности на изгиб) возрастают на 35...45%, что существенно превосходит аналогичные показатели при традиционных режимах закалки и отпуска.

Список цитируемых источников

1. Машиностроение : энцикл. / ред. совет: К. В. Фролов [и др.]. — М. : Машиностроение, 2002. — Т. IV-16 : Сельскохозяйственные машины и оборудование / И. П. Ксенович [и др.] ; под ред. И. П. Ксеновича. — 720 с.
2. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
3. Материаловедение: учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. — 8-е. — М. : МГТУ, 2008. — 648 с.
4. Лякишев, Н. П. Наноматериалы конструкционного назначения / Н. П. Лякишев, М. И. Альмов // Рос. нанотехнологии. — 2006. — Т. 1. — № 1—2. — С. 71—81.
5. Рыбин, В. В. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей / В. В. Рыбин, В. А. Малышевский, Е. И. Хлусова // Магнитно-импульсная технология обработки материалов. — 2009. — № 6 (643). — С. 3—7.
6. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях / И. В. Горынин [и др.] // Вопр. 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 // Прил. № 7 к журн. «Справочник. Инженерный журнал». — 2010. — № 7. — С. 1—24.
9. Сталь. Эталоны микроструктуры : ГОСТ 8233-56. — Введ. 01.07.1957. — Послед. изм. 18.05.2011. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации. — 2011.
10. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна : ГОСТ 5639-82. — Введ.

01.01.1983. — Послед. изм. 18.05.2011. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации. — 2011.

11. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу : ГОСТ 9013-59. — Введ. 01.01.1969. — Послед. изм. 18.05.2011. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации. — 2011.

12. Материалы металлические. Метод испытаний на изгиб : ГОСТ 14019-2003. — Взамен ГОСТ 14019-80; Введ. 01.09.2004. — Минск : Межгос. совет по стандар-

тизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации. — 2011.

13. Панин, В. Е. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин // Физ. мезомеханика. — 2009. — Т. 12. — № 4. — С. 7—26.

14. Панин, В. Е. Наноструктурные состояния в твёрдых телах / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин // Физика металлов и металловедение. — 2010. — Т. 110. — № 5. — С. 486—496.

Материал поступил в редакцию 15.02.2013 г.

The technological aspects of hardening the parts made of steels of low hardenability (55PP, 60PP) by means of using thermal treatment, are under study. The article also presents information on the microstructural details of the hardened working parts structure. It is shown how the technology allows to create IZOZH fine-grained structure, the basis of the strength and wear resistance.