

Бетенья Г.Ф.

Анискович Г.И.

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: mpc-bgatu@mail.ru

УПРОЧНЕНИЕ БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ
СМЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
МАШИН ИМПУЛЬСНОЙ ЗАКАЛКОЙ

УДК 631.3.02:621.78.084

В статье приведены технологические аспекты упрочнения деталей из сталей пониженной прокаливаемости (55ПП, 60ПП), с применением импульсной закалки. Показано, что технология импульсной закалки позволяет формировать мелкозернистую структуру, являющейся основой повышения конструкционной прочности и износостойкости деталей.

Ключевые слова: сменные детали, импульсная закалка, структурное строение, микротвердость, прочность, износостойкость.

Введение. Сменные детали рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин определяют их технический уровень и относятся к числу наиболее сложных изделий сельскохозяйственного машиностроения [1, 2]. 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 сменных деталей (прочность, твёрдость, ударная вязкость, пластичность, износостойкость).

Традиционно применяемые при изготовлении сменных деталей материалы и технологии их упрочнения термической обработкой (закалка и отпуск) 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 [3,4].

Для решения проблемы повышения ресурса сменных деталей необходима разработка эффективных и доступных для широкого применения инновационных технологий, на основе новых подходов повышения свойств конструкционных сталей в результате формирования в них объёмного микро- и наноструктурированного состояния [4,5]. Исследования последних десятилетий показали, что наиболее эффективным способом повышения прочности при обеспечении достаточной вязкости и пластичности является измельчение структуры путем применения микролегирования, контролируемой прокатки и других способов обработки [6].

Постановка проблемы. К настоящему времени 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 [5]. 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 последние годы при производстве сменных деталей сельскохозяйственных машин получила распространение технология импульсной закалки. Она применяется для упрочнения деталей, преимущественно изготавливаемых из сталей пониженной прокаливаемости, обеспечивая высокие прочностные и вязкостные характеристики, за счет формирования субмикроструктурной структуры мартенсита.

Результаты исследований. По аналогии с традиционными методами термической обработки технология импульсной закалки включает три основных этапа: нагрев; изотермическую выдержку; охлаждение заготовок в заданных параметрах этих режимов.

Технологическая схема упрочнения деталей с применением импульсной закалки (рисунок 1) разрабатывалась для условий печного нагрева заготовок. В технологической схеме стадии охлаждения стальных заготовок предшествуют две стадии: стадия нагрева до температуры аустенитизации и стадия выдержки при температуре аустенитизации.

Стадия нагрева стальных заготовок до температуры аустенитной области при использовании печей сопротивления протекает в реальных условиях от исходной комнатной температуры со скоростью $1,5 - 2,5 \text{ }^\circ\text{C/с}$. Заготовки нагревались до температуры закалки с точностью $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Продолжительность аустенитизации составляет порядка 10 минут.

Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода. Температура воды находилась в пределах $5 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$, время охлаждения – в интервале $0,5 - 5 \text{ с}$ в зависимости от толщины изделия.

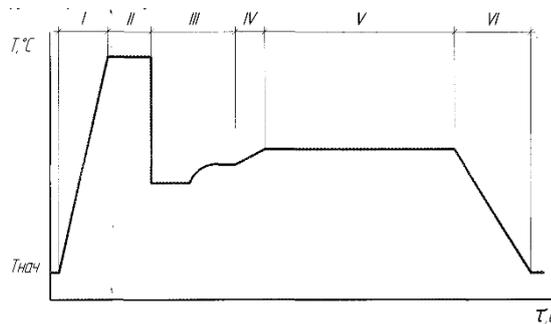


Рис. 1 – Технологическая схема упрочнения стальных заготовок с применением импульсной закалки: I – стадия нагрева до температуры аустенитизации; II – стадия выдержки при температуре аустенитизации; III – стадия охлаждения до температуры самоотпуска; IV – стадия нагрева до температуры низкого отпуска; V – стадия выдержки при температуре низкого отпуска; VI – стадия охлаждения на воздухе.

Охлаждение заготовок в заданных параметрах технологических режимов обеспечивается функционированием взаимосвязанных технических средств (рисунок 2), с помощью которых реализуются:

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

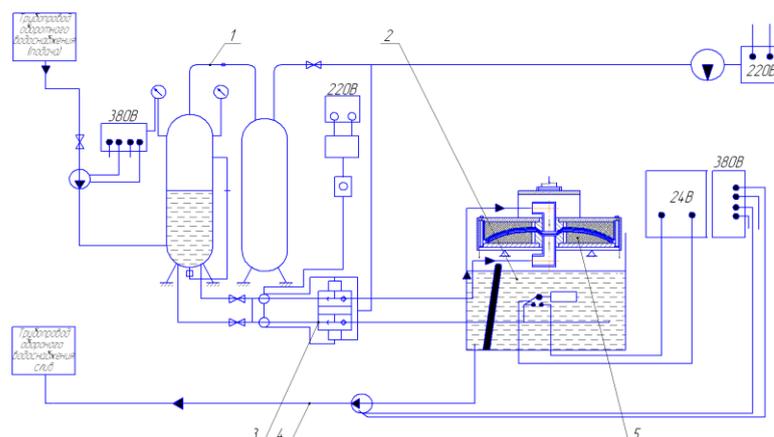


Рис. 2 – Принципиальная схема технологии импульсной закалки:
1 – блок управления расходом охлаждающей жидкости; 2 – блок управления отводом охлаждающей жидкости;
3 – система управления подачей охлаждающей жидкости; 4 – система обратного водоснабжения; 5 – закалочное устройство

Для реализации технологии импульсной закалки в составе технологического модуля имеется закалочное устройство, которое предназначено для фиксации деталей в процессе

закалки потоком охлаждающей жидкости и разрабатывается для каждого типоразмера деталей индивидуально. Принципиальная схема закалочного устройства для закалки дискообразных деталей представлена на рисунке 3.

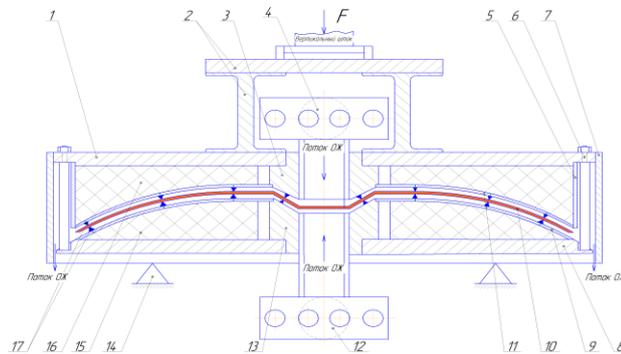


Рис. 3 – Принципиальная схема закалочного устройства дисков:
1-плита верхняя; 2-фланец; 3-вставка верхняя; 4-коллектор верхний; 5-кожух внутренний; 6-упор; 7-кожух наружный; 8-плита нижняя; 9-матрица; 10-заготовка диска; 11-пуансон; 12-коллектор нижний; 13-вставка нижняя; 14-опора; 15-плита монтажная нижняя; 16-плита монтажная верхняя; 17-фиксатор.

Применение закалочных устройств позволяет охлаждать детали при их термической обработке с учетом требуемой критической скорости охлаждения, регламентируемой для данной марки стали, со скоростью от $400^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $5000^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и более. Режим и время термообработки изменяется в зависимости от формы детали, марки материала заготовки и требований, предъявляемых к детали в эксплуатации.

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.

По разрабатываемой технологии, включающей закалку с импульсным охлаждением жидкостью, осуществлялось упрочнение экспериментальных образцов деталей. В связи с необходимостью уточнения структурного строения проводились измерения микротвёрдости в поперечном сечении макрошлифов (сторона 2 рисунок 4а). Было выявлено убывание (диссипация) значений микротвёрдости в направлении к сердцевине образца (рисунок 4б).

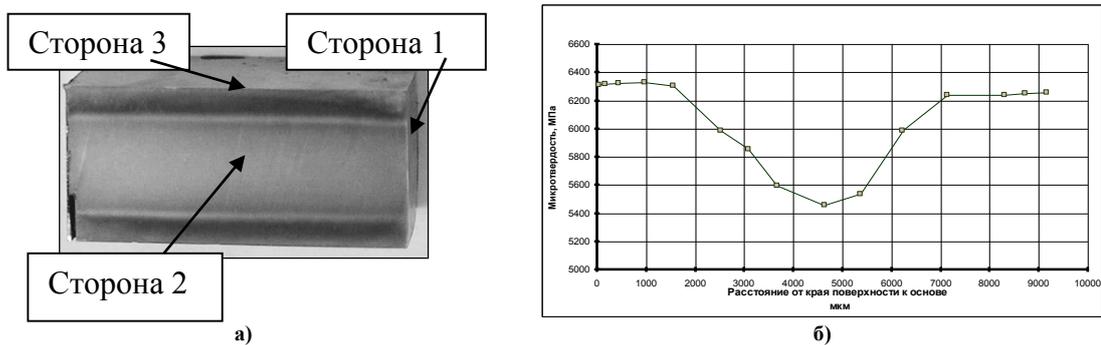


Рис. 4 – Схема исследования (а) и график (б) изменения микротвёрдости в поперечном сечении (сторона 2) плоского образца

Анализ численных значений микротвёрдости в поперечном сечении макрошлифов свидетельствует о наличии в поверхностном слое упрочненных деталей структуры мартенсита, далее троостомартенсита, а в сердцевине – трооститной структуры. Изучение микроструктурного строения показало, что в поверхностном слое (рисунок 5а) образовалась микроструктура весьма мелкоигльчатого мартенсита, наибольшая длина игл которого по

оценке металлографическим методом [8] составляет до 1 мкм, что свидетельствует о их мелкозернистости (дисперсности и баллу между 1 и 2).

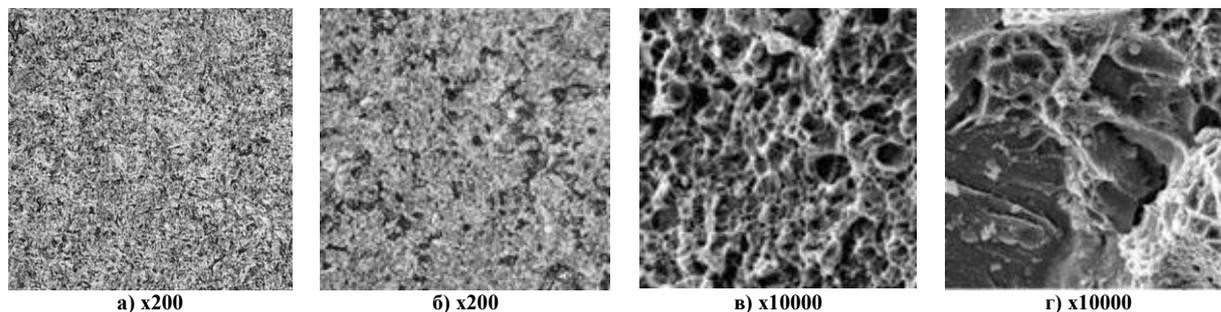


Рис. 5 – Микроструктура внешних поверхностей (а) и сердцевины (б) и морфология ячеистого излома образца, испытанного на ударный изгиб (в-наружного слоя, г - сердцевины)

При увеличении соответственно $\times 50\,000$ и $\times 80\,000$ (рисунок 6) выявлена фрагментация (дробление) мартенситных пластин. Их размер в поперечном сечении составляет 50 – 100 нм, а размер фасеток отдельных пластин мартенсита находится в пределах 20 – 80 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 – 0,08мкм. После низкого отпуска при 180°C размер фрагментов изменяется незначительно, 60% составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02 – 0,06 мкм.

Снимки микроструктуры троостита в сердцевине плоского образца (рисунок 5б) также свидетельствуют о его дисперсности. В поперечном сечении размеры фрагментов троостита составляют 20 – 60 нм, а длина трооститных пластин находится в пределах 120 – 500 нм.

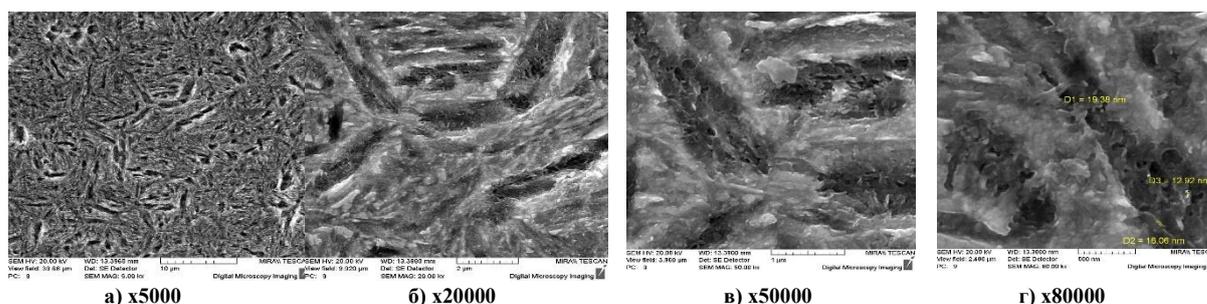


Рис. 6 – Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска

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

Таким образом, технологией импульсной закалки достигается формирование в плоских изделиях объемного нанокпозиционного состояния. Оно характеризуется, во-первых, наличием диссипативного структурного строения в поперечном сечении изделия, во-вторых, субмелкокристаллическим зерном мартенсита. В ходе интенсивного закалочного охлаждения жидкостью заготовок из сталей ПП в них формируются продукты мартенситного превращения нанометрового размера. Придание такого дисперсного структурного строения деталей является основой повышения их конструкционной прочности и износостойкости [9, 10].

В настоящее время с использованием сталей пониженной прокаливаемости (55ПП, 60ПП) и технологии упрочнения импульсной закалкой изготавливается целый ряд различных по конструкции сменных деталей почвообрабатывающих и кормоуборочных машин (рисунок 7). Разработанные технологии изготовления сменных деталей нового поколения освоены на ОАО «КЗТШ» (г. Жодино), РУП «МЗШ» (г. Минск), ОАО «БЭМЗ» (г. Брест), ОАО «Дрогичинский ТРЗ», ОАО «ВМРЗ» (г. Витебск), ОАО «Минский Агросервис», КУПП «Берёзаагросервис» и др. Стоимость деталей отечественного производства на 20...30% ниже стоимости импортных аналогов.

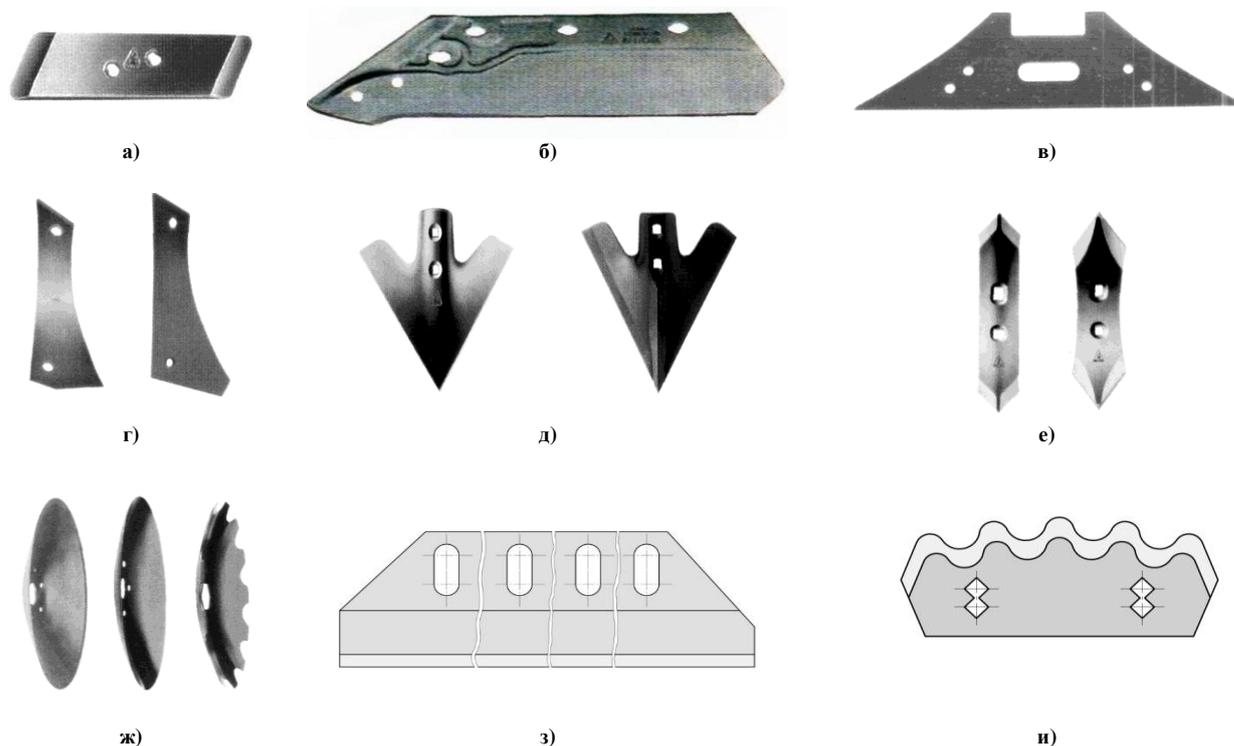


Рис. 7 – Типовые представители сменных деталей почвообрабатывающих и кормоуборочных машин:
а – долото; б – лемех; в – полевая доска; г – груди отвалов; д – стрелчатые лапы; е – оборотные лапы; ж – диски; з – нож измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна; и – нож измельчителей рулонов

Отличительными свойствами сменных деталей нового поколения являются сочетание высоких показателей твёрдости (около 60 HRC), прочности (свыше 2000 МПа), ударной вязкости (не менее 1,0 МДж/м²), пластичности, наличием наноразмерного (20 – 80 нм) структурного строения, абразивной износостойкости (коэффициент не менее 3,0 – 3,5). По техническому уровню детали, изготовленные в соответствии с разработанной технологией, являются конкурентоспособными изделиями в сравнении с лучшими зарубежными аналогами.

Выводы. На основании полученных результатов исследований структурного строения образцов из стали 60ПП, упрочненных импульсной закалкой можно заключить следующее:

- технологией импульсной закалки достигается формирование в плоских изделиях объёмного наноконпозиционного состояния. Оно характеризуется, во-первых, наличием диссипативного структурного строения в поперечном сечении изделия, во-вторых, субмелкокристаллическим зерном мартенсита.

- установлено, что в ходе интенсивного закалочного охлаждения жидкостью заготовок из сталей ПП в них формируются продукты мартенситного превращения нанометрового размера (20 – 80 нм). Придание такого дисперсного структурного строения является основой повышения конструкционной прочности и износостойкости.

- технология импульсной закалки обладает высокой производительностью, экономической эффективностью и адаптирована к производственным условиям упрочнения сменных деталей сельскохозяйственной техники.

Литература

1. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. совет: Фролов К.В. и др. М.: Машиностроение. Сельскохозяйственные машины и оборудование. Т. IV-16/ И.П. Ксеневиц, Г.П. Варламов, Н.Н. Колчин и др.; под ред. И.П. Ксеневица. 2002. – 720с.
2. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин /И.Н.Шило [и др.].- Минск: БГАТУ, 2010. – 320с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьев В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Машиностроение, 1990. – 528с.
4. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов /Арзамасов, Б.Н и др. – Изд. 8-е – Москва: Изд-во МГТУ, 2008. - 648с.
5. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения //Российские нанотехнологии, 2006, Т.1, № 1-2, С. 71 - 81.
6. Рыбин В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей //МИТОМ, 2009, №6 (643), С. 3-7.
7. Bulk nanocrystalline steel // Ironmaking and steelmaking.-2005.-V.32-p.405-410.
8. Сталь. Эталоны микроструктуры: ГОСТ 8233-56. – Введ. 07.01.1957. – Послед. Изм. 18.05.2011. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации и сертификации. – 2011.
9. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения // Физическая мезомеханика – 2009. – Т. 12. № 4. – С. 7-26.
10. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Наноструктурные состояния в твердых телах // Физика металлов и металловедение – 2010. – Т. 110. №5. – С.486-496.
11. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 Т.: Т.3/ С.Б. Масленков, В.М. Ляпунов, В.М. Зинченко, Б.К. Ушаков. Под общ. ред. С.Б. Масленкова. М.: Наука и технологии, 2004. – 704с.
12. Гидродинамическая модель образования наноструктурных слоев/В.Д. Сарычев, А.Ю. Грановский, С.Н. Старовацкая, В.Е. Громов//Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. - №6. – С.57-60.
13. Горынин И.В. и др. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях. //Вопросы материаловедения. 2008. №2(54), с.7-19.
14. Быков Ю.А. Структура и свойства конструкционных наноматериалов // Приложение №7 к журналу «Справочник. Инженерный журнал», 2010, №7, С.1-24.
15. Хроника. Второй Всероссийский семинар по проблемам закалочного охлаждения// М и ТОМ. 1997. №10. С.37-38.
16. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 Т.: Т.1/ С.Б. Масленков, В.М. Ляпунов, В.М. Зинченко, Б.К. Ушаков. Под общ. ред. С.Б. Масленкова. М.: Наука и технологии, 2003. – 392с.
17. Основные тенденции создания наноструктурированных материалов/В.А. Кечин, В.Е. Ваганов//Металлургия машиностроения. – 2010. - №2. – С.27-30.

18. Современные достижения по получению материалов с нанокристаллической структурой/В.Е. Ваганов, В.Е. Кечин, И.А. Евдокимов//Вестник научно-технического развития. – 2010. - №6. – С.3-11.
19. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск: НИИ ИП с ОП, 1998. – 210 с.
20. Волокушин В.Д. Металловедение и термическая обработка. Уч.-справ. пособие. Винница: Книга-Вега. 2005.-504с.

Betenya G., Aniskovich G. Strengthening of wearing of replacement parts agricultural machines by pulsed quenching

The article presents the technological aspects of the hardening of low-hardenability steels (55PP, 60PP) using pulsed quenching. It is shown that pulse quenching technique allows forming a fine grain structure. It is established that during the intensive cooling liquid quenching workpieces of steels PP products formed therein martensite nanometer size (20 - 80 nm). Giving such a dispersed structure is the basis of the structural increase structural strength and durability.

Technology quenching pulse formation is achieved in flat products volume nanocomposite state. It is characterized, firstly, the presence of dissipative structural framework in a transverse section of the product, and secondly, submelkokristallicheskim grain martensite. It is established that during the intensive cooling liquid quenching workpieces of steels PP products are formed martensite nanometer size (20 - 80 nm). Giving such a dispersed structure of the structure is the basis of the strength and durability. Technology pulse hardening has high performance, cost-effective and adapted to the production conditions of hardening of replacement parts of agricultural machinery.

Keywords: replacement parts, pulse hardening, structural composition, microhardness, strength, wear resistance.

References

1. 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.
2. Shilo I. N. 2010.-Povysheniye rabotosposobnosti detaley rabochikh organov selskokhozyaystvennykh mashin. - Minsk : BGATU, 320.
3. Lakhtin Yu. M., Leontyev V. P. 1990. Materialovedeniye. : Uchebnik dlya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeny. – M. : Mashinostroyeniye, – 528.
4. Arzamasov B. N. 2008. Materialovedeniye: uchebnik dlya vuzov. Izd. 8-e. Moskva: Izd-vo MGTU, 648.
5. Lyakishev N. P., Alymov M. I. 2006. Nanomaterialy konstruktsionnogo naznacheniya. Rossyskiye nanotekhnologii, T.1, № 1-2, 71 - 81.
6. Rybin V. V., Malyshevsky V. A., Khlusova Ye. I. 2009. Tekhnologii sozdaniya konstruktsionnykh nanostrukturirovannykh staley. MITOM, №6 (643), 3-7.
7. Bulk nanocrystalline steel. Ironmaking and steelmaking.-2005.-V.32-405-410. 7
8. Steel. Standards microstructure GOST 8233-56. - Enter. 01/07/1957. - Follow-up. Chg. 18.05.2011. - Minsk: Mezghos. Council for Standardization and Certification. - 2011.
9. Panin V. E., Yegorushkin V. E. 2009. Fizicheskaya mezomekhanika i neravnovesnaya termodinamika kak metodologicheskaya osnova nanomaterialovedeniya. Fizicheskaya mezomekhanika – T. 12. № 4. – 7-26.
10. Panin V. E., Yegorushkin V. E. 2010. Nanostrukturnye sostoyaniya v tverdykh telakh. Fizika metallov i metallovedeniye – T. 110. №5, – 486-496.
11. Maslennikov S. B., Lyapunov V. M., Zinchenko V. M., Ushakov B. K. 2004. Entsiklopedichesky spravochnik termistatekhnologa: v 3 T. : T.3 Pod obshch. red. S.B.Maslennikova. M.: Nauka i tekhnologii, – 704.
12. Sarychev V. D., Granovsky A. Yu., Starovatskaya S. N., Gromov V. E. 2012. Gidrodinamicheskaya model obrazovaniya nanostrukturnykh slojev. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Chernaya metallurgiya. – №6. – 57-60.
13. Gorynin I. V. 2008. Ekonomnolegirovannyye stali s nanomodifitsirovannoy strukturoy dlya ekspluatatsii v ekstremalnykh usloviyakh. Voprosy materialovedeniya. №2(54), 7-19.

14. Bykov Yu. A. 2010. Struktura i svoystva konstruktsionnykh nanomaterialov. Prilozheniye №7 k zhurnalu «Spravochnik. Inzhenerny zhurnal», №7, 1-24.
15. Khronika. Vtoroy Vserossysky seminar po problemam zakalochnogo okhlazhdeniya. - M i TOM. 1997. №10. 37-38.
16. Maslenkov S. B. , Lyapunov V. M., Zinchenko V. M., Ushakov B. K. 2003. Entsiklopedichesky spravochnik termistatekhnologa: v 3 T.: T.1 Pod obshch. red. S.B. Maslenkova. M. : Nauka i tekhnologii, – 392.
17. Kechin V. A., Vaganov V. E. 2010. Osnovnye tendentsii sozdaniya nanostrukturirovannykh materialov. Metallurgiya mashinostroyeniya. – №2. 27-30.
18. Vaganov V.E., Kechin V. E., Yevdokimov I. A. 2010. Sovremennye dostizheniya po polucheniyu materialov s nanokristallicheskoj strukturoj. Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. – №6. 3-11.
19. Usherenko S. M. 1998. Sverkhglubokoye pronikaniye chastits v pregrady i sozdaniye kompozitsionnykh materialov. Minsk : NII IP s OP, – 210.
20. Volokushin V. 2005. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. Uch.-sprav. posobiye. Vinnitsa : Kniga-Vega. - 504.