

Г.Ф. Бетенья, Г.И. Анискович, кандидаты технических наук, доценты
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск

УПРОЧНЕНИЕ БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ СМЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ИМПУЛЬСНОЙ ЗАКАЛКОЙ

Аннотация. 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, являющуюся основой повышения конструкционной прочности и износостойкости деталей.

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, твердость, 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 (твердости) 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 объемного 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].

К настоящему времени 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 [5]. Практические результаты достигнуты европейскими, американскими и японскими производителями. Есть сведения о получении в промышленных условиях стальных заготовок толщиной более 200 мм с размером структурных элементов не более 40 нм [7].

В последние годы при производстве сменных деталей сельскохозяйственных машин получила распространение технология импульсной закалки. Она применяется для упрочнения деталей, изготавливаемых преимущественно из сталей пониженной прокаливаемости. 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 разрабатывалась для условий печного нагрева заготовок (рис. 1). В технологической схеме стадии охлаждения стальных заготовок предшествуют 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 °C/с. Заготовки нагревались до температуры закалки с точностью ± 5 °C. Продолжительность аустенитизации составляла порядка 10 минут.

Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода. Температура воды находилась в пределах 5–35 °C, время охлаждения – в интервале 0,5–5 с в зависимости от толщины изделия.

Охлаждение заготовок в заданных параметрах технологических режимов обеспечивается функционированием 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 (рис. 2).

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

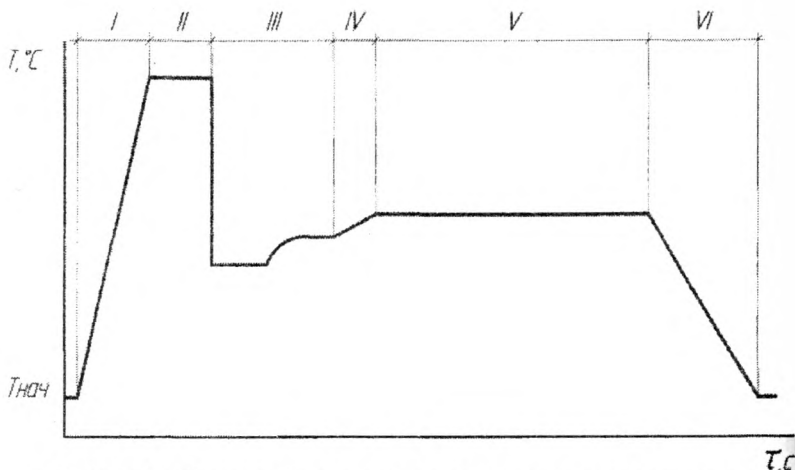


Рисунок 1 – Технологическая схема упрочнения стальных заготовок с применением импульсной закалки:

- 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

индивидуально. Принципиальная схема закалочного устройства для закалки дискообразных деталей представлена на рисунке 3.

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 до 5000 °C/с и более. Режим и время термообработки изменяются 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 микротвердости в поперечном сечении макрошлифов (сторона 2 рис. 4а). Было выявлено убывание (диссипация) значений микротвердости в направлении к сердцевине образца (рис. 4б).

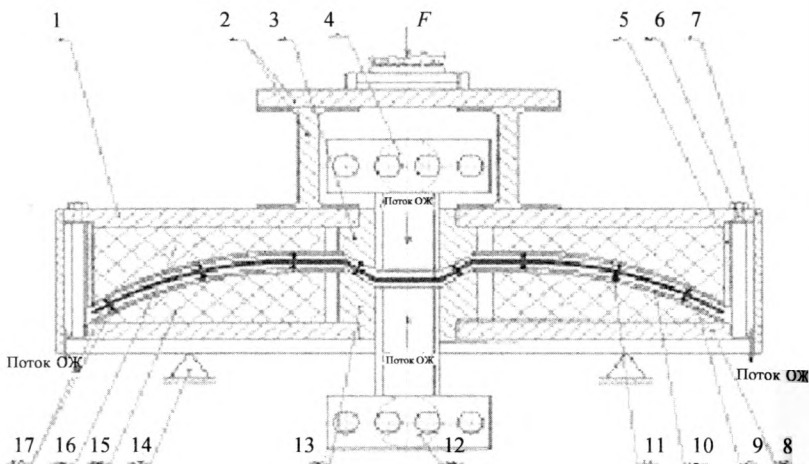


Рисунок 3 – Принципиальная схема закалочного устройства дисков:

- 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

Анализ численных значений микротвердости 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 (рис. 5а) образовалась микроструктура весьма мелкоигльчатого мартенсита, наибольшая длина игл которого по оценке металлографическим методом составляет до 1 мкм, что свидетельствует об их мелкозернистости (дисперсности и баллу между 1 и 2) [8].

При увеличении соответственно $\times 50\,000$ и $\times 80\,000$ выявлена фрагментация (дробление) мартенситных пластин (рис. 6). 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 6–12 мм показали, что размер 80 % фрагментов находится в диапазоне 0,02–0,08 мкм. После низкого отпуска при 180 °С размер

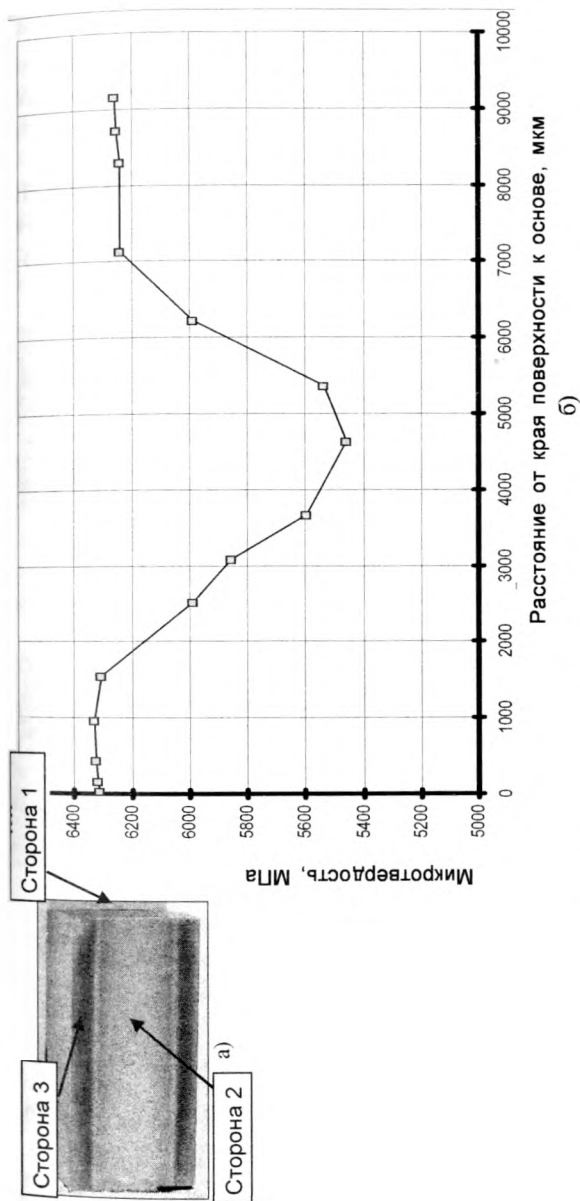
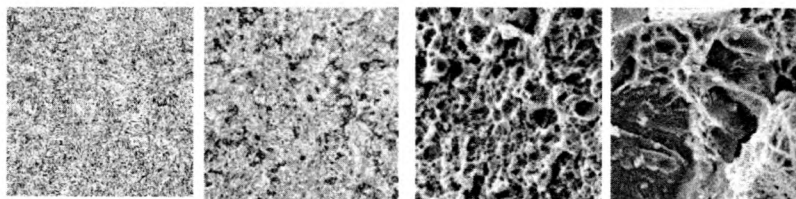


Рисунок 4 – Схема исследования (а) и график (б) изменения микротвердости в поперечном сечении (сторона 2) плоского образца

фрагментов изменяется незначительно, 60 % составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02–0,06 мкм.

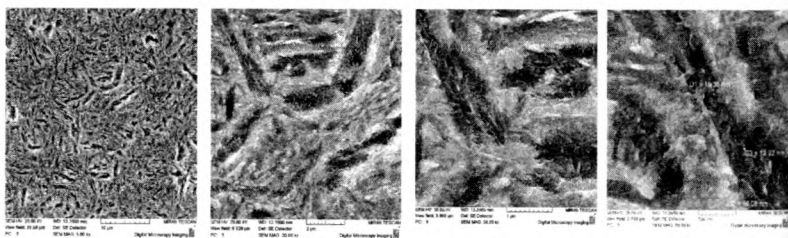
Снимки микроструктуры троостита в сердцевине плоского образца также свидетельствуют о его дисперсности (рис. 5б). В поперечном сечении размеры фрагментов троостита составляют 20–60 нм, а длина трооститных пластин находится в пределах 120–500 нм.

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 (табл. 1).



а) $\times 200$ б) $\times 200$ в) $\times 10\,000$ г) $\times 10\,000$

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



а) б) в) г)

Рисунок 6 – 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) $\times 80000$

Таблица 1 – 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

Таким образом, технологией импульсной закалки достигается формирование в плоских изделиях объемного наноконпозиционного 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 деталям 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 (рис. 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 «Березаагросервис» и др. Стоимость деталей отечественного производства на 20–30 % ниже стоимости импортных аналогов.

Отличительными свойствами сменных деталей нового поколения являются сочетание высоких показателей твердости (около 60 HRC), прочности (свыше 2000 МПа), ударной вязкости (не менее 1,0 МДж/м²), пластичности, с 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.

Заключение. На основании полученных результатов исследований структурного строения образцов из стали 60ПП, упрочненных импульсной закалкой, можно сделать следующие выводы:

- технологией импульсной закалки достигается формирование в плоских изделиях объемного 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;

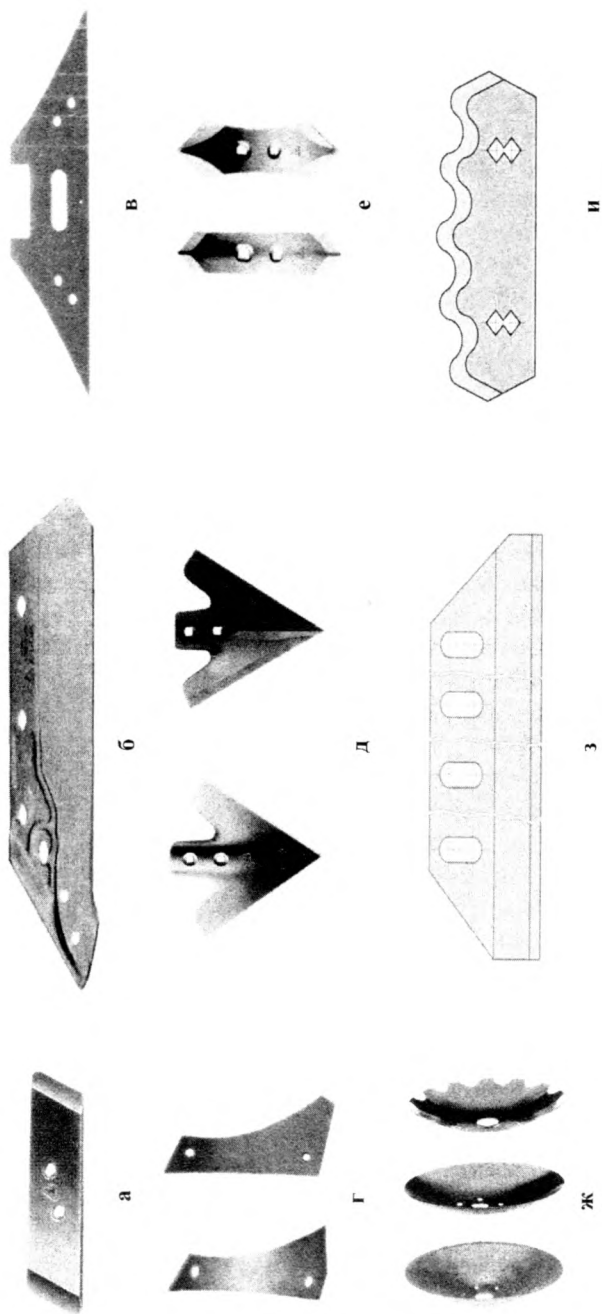


Рисунок 7 – Типовые представители сменных деталей почвообрабатывающих и кормоуборочных машин:
 а – долото; б – полевая доска; в – левая доска; г – груди отвалов; д – стрелчатые лапы; е – оборотные лапы; ж – диски;
 з – нож измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна; и – нож измельчителей рулонов

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

Список использованных источников

1. Машиностроение: энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов [и др.]. – М.: Машиностроение. Сельскохозяйственные машины и оборудование. – Т. IV-16 / И.П. Ксенович [и др.]; под ред. И.П. Ксеновича. – 2002. – 720 с.

2. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.

3. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для высш. техн. учеб. заведений / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьев. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

4. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – Изд. 8-е. – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 648 с.

5. Лякишев, Н.П. Наноматериалы конструкционного назначения / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов // Российские нанотехнологии, 2006. – Т. 1. – № 1–2. – С. 71–81.

6. Рыбин, В.В. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // 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. Физическая мезомеханика и неравновесная термодинамика как методологическая основа наноматериаловедения / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 7–26.

10. Панин, В.Е. Наноструктурные состояния в твердых телах / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физика металлов и металловедение. – 2010. – Т. 110, № 5. – С. 486–496.

Поступила 20.03.2015