

УДК 721.785

Г. Ф. Бетенья ¹, Г. И. Анискович ¹, В. С. Голубев ², А. Н. Давидович ²

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск

² Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Приведены результаты исследований по разработке и применению отечественных упрочняющих технологий при изготовлении деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин (далее — ДРОСМ), по техническому уровню не уступающих лучшим мировым аналогам. К числу технологических решений относятся: технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью с печного нагрева; технология формообразования лезвийной части термопластической обработкой на станах продольной и поперечной прокатки; плазменные и лазерные упрочняющие технологии. Эти технологии являются высокопроизводительными, экологически чистыми и отвечают требованиям по энерго- и ресурсосбережению.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, формообразование лезвий, пластическая деформация, плазменная обработка, поперечно-клиновое прокатка.

Введение. Условия работы деталей рабочих органов машин (далее — ДРОСМ) являются определяющими при выборе материала и технологии их изготовления. Абразивная среда, в которой эксплуатируются сменные ДРОСМ, создаёт экстремальные условия для их работы. Для обеспечения длительной эксплуатации сменных ДРОСМ, работающих в тяжёлых условиях абразивного изнашивания, необходимо при их производстве применять качественные конструкционные стали и соответствующие технологии их упрочнения [1].

Прогнозный анализ показывает, что в обозримом будущем для изготовления ДРОСМ стальной прокат останется преимущественным материалом. Потенциал стали как материала для сельскохозяйственного машиностроения совершенно не исчерпан. Практическую ценность, применительно к изготовлению ДРОСМ, представляет использование сталей пониженной и регламентированной прокаливаемости (55ПП, 60ПП, 55РП и др.). В настоящее время созданы и проверены в производственных условиях технологии упрочнения различных по конструкции ДРОСМ с применением отечественных материалов.

Для изготовления ДРОСМ применяются разработанные отечественные технологии, позволяющие производить конкурентоспособные изделия. К числу технологических решений относятся: технология импульсного закалочного охлаждения жидкостью с печного или индукционного нагрева; технология формообразования лезвийной части термопластической обработкой на станах продольной и поперечной прокатки; технология отпуска при индукционном нагреве; плазменные (закалка, модифицирование) и лазерные (закалка, модифицирование) технологии; технология диффузионного намолаживания износостойкими сплавами. Перечисленные технологии являются высокопроизводительными, экологически чистыми и отвечают требованиям по энерго- и ресурсосбережению. Они являются базовыми при изготовлении ДРОСМ.

Методология и методы исследования. Процесс формообразования лезвийной части ДРОСМ продольно-поперечной прокаткой осуществляют на стане, созданном в Государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (далее — ФТИ НАН Беларуси) со специальной технологической оснасткой, представляющей собой валки, установленные на ползуне стана, и систему упоров на его нижней плите.

Установление предельных условий деформации при прокатке плоской заготовки между плоской плитой и подвижным коническим валком, совершающим поступательное движение, должно вестись с учётом того, что на заготовку действуют силы во взаимно-перпендикулярных плоскостях (рисунок 1). В связи с этим процесс можно представить как комбинированную пластическую деформацию в двух направлениях: прокатка лезвия вдоль оси заготовки с образованием локального очага деформации и пластический сдвиг в плоскости поперечного сечения вследствие движения этого очага деформации по длине лезвия. Интенсивность каждой из компонент деформации зависит от соотношения скорости движения конического вала и угла его заострения.

Толщина обжимаемого валком слоя металла Δ ограничивается условием поперечного захвата заготовки валком. При очень больших величинах Δ возможно буксование вала о заготовку.

Стабильность процесса прокатки зависит прежде всего от условий трения на контакте заготовки с инструментом, обусловленных действием горизонтальной составляющей сил трения $F_{тр}$ и вертикальной составляющей внешней силы P .

Технологическая схема упрочнения деталей с применением технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью (далее — ТИЗОЖ) разрабатывалась для условий печного нагрева заготовок. По аналогии с традиционными методами термической обработки [2], [3] ТИЗОЖ включает три основных этапа: нагрев; изотермическую выдержку; охлаждение заготовок в заданных параметрах этих режимов. Стадия нагрева стальных заготовок до температуры аустенитной области при использовании печей сопротивления протекает со скоростью $1,5...2,5^{\circ}\text{C} / \text{с}$. В этой связи в технологической схеме упрочнения стадии охлаждения стальных заготовок с использованием ТИЗОЖ (рисунок 2) предшествуют: стадия нагрева до температуры аустенитезации и стадия выдержки при температуре аустенитезации.

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 работой бустерных насосов.

Конструкция системы закалочного охлаждения [4] обеспечивает реализацию и воспроизводимость оптимальных технологических параметров термического цикла, позволяющих получить высокие показатели качества изделия. На первое место среди этих параметров ставится структурное состояние металла изделия, приобретаемое в процессе термической обработки [5], [6]. Для фиксации изделий в процессе закалки потоком охлаждающей жидкости в составе системы охлаждения предусмотрено закалочное устройство (далее — ЗУ), которое разрабатывается для каждого типоразмера деталей индивидуально. Представлена принципиальная схема ЗУ для закалки дисков (рисунок 3).

Лазерная обработка проводилась на CO_2 -лазере непрерывного действия «Комета-2» мощностью 1 кВт. Параметры обработки: мощность лазерного излучения составила ~ 750 Вт, линейная скорость перемещения пятна — $30...50$ мм / с, шаг перемещения лазерных дорожек — $1,0...1,5$ мм.

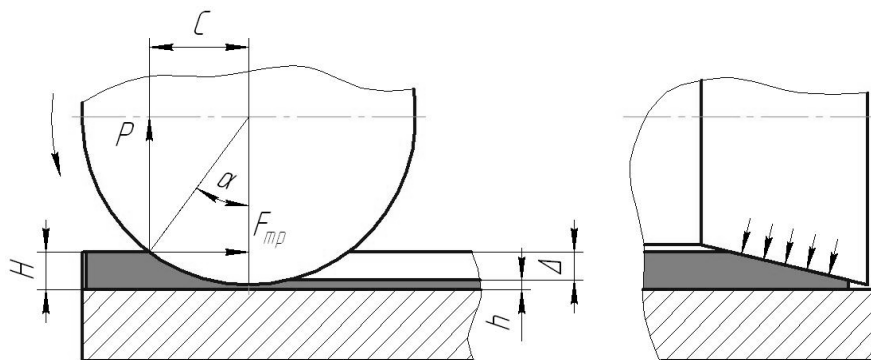
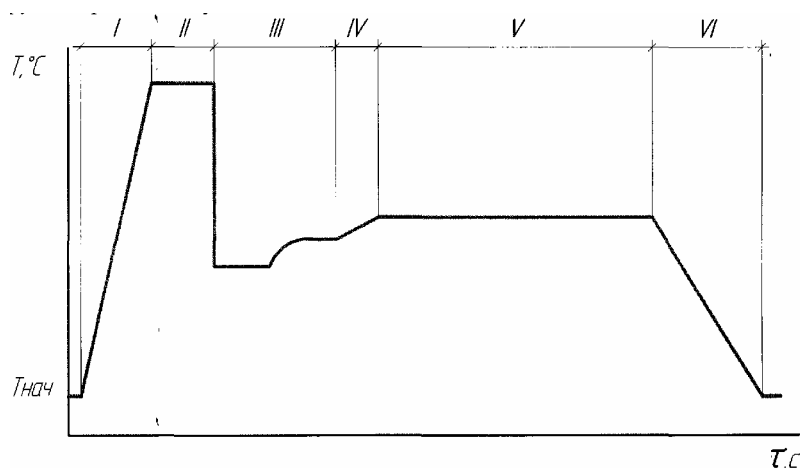
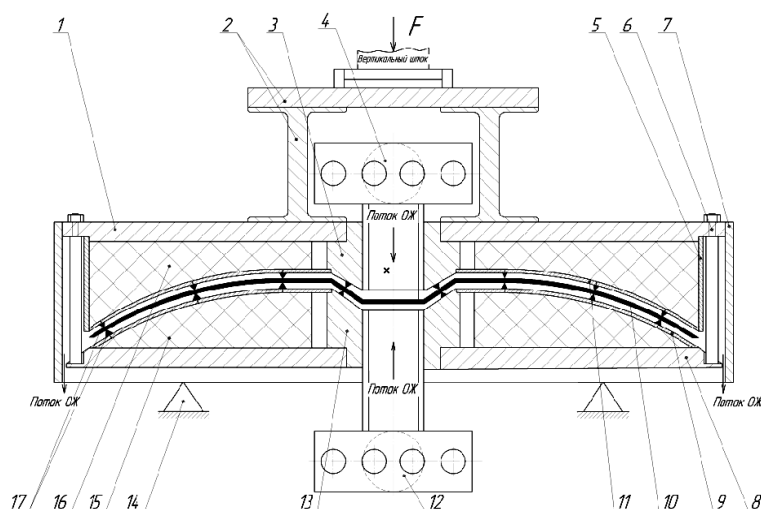


Рисунок 1 — Схема действия сил, возникающих на площадке контакта конического вала с заготовкой



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

Рисунок 2 — Технологическая схема упрочнения стальных заготовок с применением ТИЗОЖ



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 верхняя; 16 — плита монтажная нижняя; 17 — фиксатор

Рисунок 3 — Принципиальная схема закалочного устройства дисков, имеющих седлообразную вогнутую форму крепёжной части

Технологическими параметрами плазменной обработки являются линейная скорость перемещения дуги, расстояние между упрочняемыми дорожками, расход плазмообразующего и защитного газа. В качестве плазмообразующего газа применяли аргон, защитного — 100%-й аргон.

Модифицирование поверхности упрочняемой детали осуществлялось путём нанесения шликерным методом состава износостойкого порошка, содержащего карбиды хрома, вольфрама, бориды и другие соединения, с последующей обработкой высококонцентрированными потоками энергии.

Организация исследования. Экспериментальные работы по разработке и исследованию перспективных технологий упрочнения ДРОСМ выполнялись на базе технологического научно-произ-

водственного центра учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (далее — БГАТУ) с использованием технологического модуля и закалочных устройств, соответствующих конструкциям упрочняемых деталей, а также в лабораториях ФТИ НАН Беларуси: лазерной обработки материалов — CO₂-лазером непрерывного действия и плазменной дугой; термопластической обработки — на стане со специальной технологической оснасткой. Для разработки оптимальных параметров упрочнения, рационального использования оборудования и качества обработки исследовалось влияние технологических параметров на структуру и механические свойства упрочнённых деталей.

Результаты исследования и их обсуждение. Преимущественное использование листового металлопроката при изготовлении сменных ДРОСМ с учётом их конструктивных особенностей предполагает получение заготовок путём раскроя металлического листа в целях их дальнейшей обработки и получения конечного продукта. С учётом достоинств и недостатков различных способов раскроя наибольший интерес представляют лазерный и плазменный способы, которые позволяют изготавливать изделия любой сложности, в любом количестве и при минимальном количестве отходов.

Конструктивной особенностью рабочих органов почвообрабатывающей и кормоуборочной сельскохозяйственной техники является наличие заострённых лезвийных частей. Формообразование заготовок с рабочей частью переменного сечения является одной из сложных технических задач. Традиционной технологией изготовления лезвий на заготовках является операция фрезерования в специальных приспособлениях, обеспечивающих получение нужного угла заострения лезвия и его толщину.

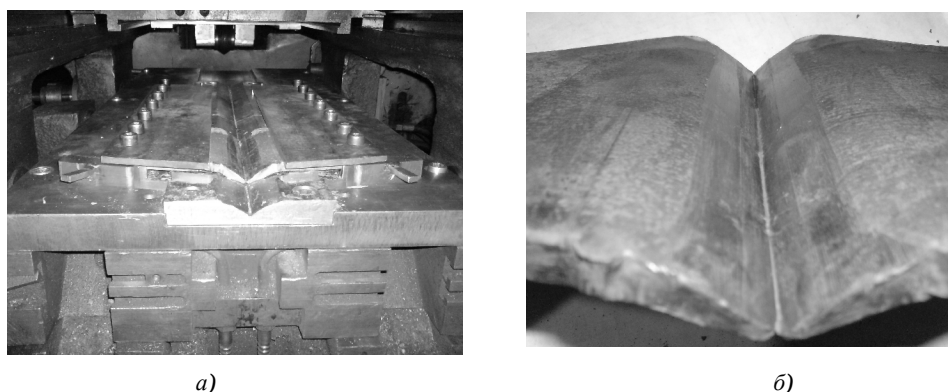
Способ поперечно-клиновой прокатки лезвийных частей деталей, который является наиболее экономичным в отношении производительности и коэффициента использования металла, разработан и запатентован ФТИ НАН Беларуси.

На базе этого способа создан комплексный технологический процесс, включающий в себя плазменную вырезку листовой заготовки, индукционный нагрев, продольно-поперечную прокатку лезвия изделия и, при необходимости, объёмное пластическое формообразование его окончательной формы и размеров. После завершения операций формообразования производят закалку до температуры окончания деформации. В этом случае технологический процесс обеспечивает оптимальное соотношение прочностных и вязких характеристик изделия, необходимых в условиях ударно-абразивной эксплуатации. Такой комплекс свойств определяется образованием субмелкодисперсной мартенситной структуры в процессе ускоренного охлаждения деформированного аустенита, полученного на стадии горячего пластического формообразования изделия. То есть упрочнение материала достигается осуществлением механизмов термического и деформационного упрочнения, а в конечном итоге — процессом ячеистой фрагментации металла при термопластической обработке.

В лаборатории термопластической обработки ФТИ НАН Беларуси разработаны технологии изготовления заготовок ножей измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна (рисунок 4), долот и лемехов плугов, лап культиваторов, ножей свеклоуборочного комбайна, зубьев роторной бороны, ножей роторной косилки. Полученная после прокатки заготовка подвергается объёмному термическому или высокочастотному объёмному термическому модифицированию и другим методам упрочнения.

Применение метода поперечно-клиновой прокатки позволяет увеличить коэффициент использования металла до 0,98, производительность труда — в 8...10 раз по сравнению с обработкой резанием, максимально приблизить поковку к требуемым точности размеров и чистоте поверхности детали. За один проход инструмента диаметральные размеры могут быть уменьшены в 4...8 раз. При этом обеспечивается изготовление деталей или полуфабрикатов диаметром от 2 до 120 мм длиной от 40 до 1 000 мм, достигаемая точность — $\pm 0,1$ мм, максимально достигаемая чистота поверхности — 0,6 Ra.

Наиболее распространённым и эффективным технологическим методом повышения конструкционной прочности и износостойкости сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин при их изготовлении является термическая обработка (закалка + отпуск) [7]. При этом, в отличие от термомеханической обработки, не требуется применения дорогостоящего специального технологического оборудования.



а) — формообразование лезвийной части ножа в клети прокатного стана; б) — заготовки ножей измельчителя после прокатки

Рисунок 4 — Накатка лезвий ножа измельчителя методом термопластической обработки

В последние годы при производстве ДРОСМ получила применение ТИЗОЖ. Она используется для объёмно-поверхностной заковки сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин, преимущественно изготавливаемых из сталей пониженной прокаливаемости. Опытные образцы с применением технологии упрочнения деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники разрабатываются на базе технологического научно-производственного центра БГАТУ с последующей передачей документации предприятиям-изготовителям этой наукоёмкой продукции. По результатам выполнения заданий Государственных научно-технических программ 2.1 «Белсельхозмеханизация» и 1.74 «Ресурсосбережение, новые материалы и технологии» (головной исполнитель — БГАТУ) освоена ТИЗОЖ в производственных условиях для упрочнения дисков лушильников и дискаторов (ОАО «Брестский электромеханический завод», ОАО «Витебский мотороремонтный завод»), лемехов (ОАО «Кузнечный завод тяжёлых штамповок», г. Жодино), долот (РУП «Минский завод шестерён»), сложнопрофильных деталей (ОАО «Минский Агросервис»).

По разрабатываемой специалистами БГАТУ технологии, включающей заковку с импульсным охлаждением жидкостью, осуществлялось упрочнение экспериментальных образцов деталей. В связи с необходимостью уточнения структурного строения проводились измерения микротвёрдости в поперечном сечении макрошлифов.

Было выявлено убывание (диссипация) значений микротвёрдости в направлении к сердцевине образца (рисунок 5). Анализ численных значений микротвёрдости свидетельствует о наличии в поверхностных слоях структуры мартенсита, далее — троостомартенсита, а в сердцевине — трооститной структуры.

Изучение микроструктурного строения показало, что в поверхностном слое образца (рисунок 6, а, б) образовалась микроструктура весьма мелкоиглочатого мартенсита. По оценке металлографическим методом [8] наибольшая длина игл составляет до 1 мкм, что свидетельствует о их мелкозернистости (дисперсности и баллу между 1 и 2). При увеличении $\times 50\,000$ и $\times 80\,000$ соответственно 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. Такое наноструктурное строение мартенсита в поверхностных слоях плоского образца, присущее данному методу и режимам термической обработки по ТИЗОЖ, предопределяет комплекс высоких механических свойств (твёрдость — ~ 60 HRC; прочность не менее 2 000 МПа; ударная вязкость — свыше 1 МДж / м²; коэффициент относительной абразивной износостойкости — не менее 3,0...3,5).

Микроструктура переходного слоя — троостита — в сердцевине плоского образца также свидетельствует о его дисперсности. В поперечном сечении размеры фрагментов троостита составляют 20...60 нм, а длина трооститных пластин находится в пределах 120...500 нм.

Таким образом, ТИЗОЖ помогает достичь формирования в плоских изделиях объёмного наноконпозиционного состояния. Оно характеризуется, во-первых, наличием диссипативного структурного

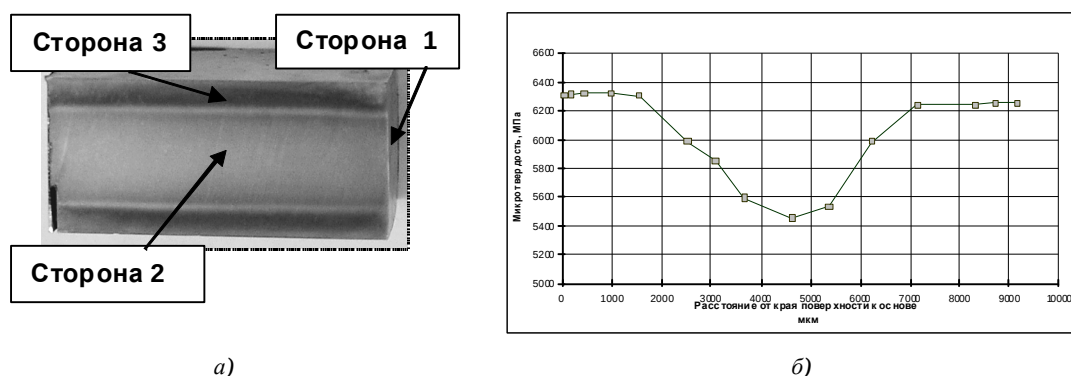


Рисунок 5 — Схема исследования (а) и график (б) изменения микротвёрдости в поперечном сечении (сторона 2) плоского образца

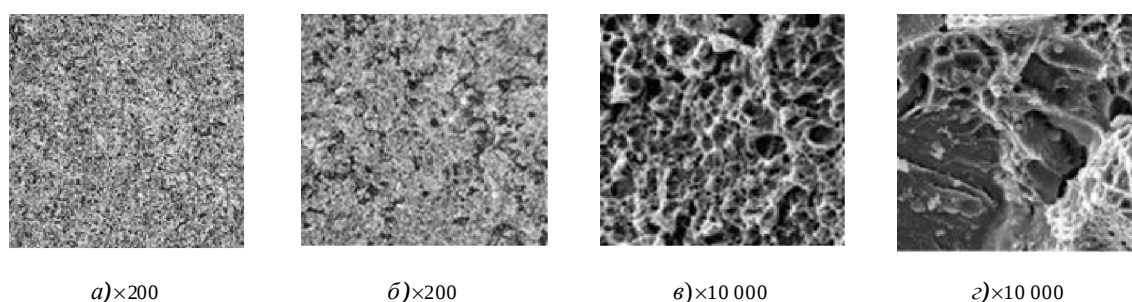


Рисунок 6 — Микроструктура внешних поверхностей (а), сердцевины (б) и морфология ячеистого излома образца, испытанного на ударный изгиб наружного слоя (в), сердцевины (г)

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 (20...80 нм). Придание такого дисперсного структурного строения ДРОСМ является основой повышения их конструкционной прочности и износостойкости [9], [10].

Применение сталей пониженной прокаливаемости для изготовления деталей сельскохозяйственных машин потребовало выполнения исследований по их упрочнению и модифицированию с использованием CO_2 -лазера непрерывного действия и плазменной дуги с плазмообразующим газом аргоном. Установлено, что степень упрочнения при лазерной обработке выше, так как при ней происходит более интенсивный вклад энергии в изделие при нагреве, а последующее охлаждение с более высокими скоростями позволяет в большей степени наследовать имеющиеся дефекты кристаллического строения, искажённость кристаллической решётки. При этом уменьшается время пребывания твёрдого раствора в интервале аустенитезации, что ограничивает рост зёрен аустенита и при последующем мартенситном превращении приводит к большей степени упрочнения [11], [12], [13]. Величина максимальной твёрдости, полученной в результате лазерной обработки, составляет 12 100 МПа, плазменной — 8 850 МПа (рисунок 7). Протяжённость зоны отпуска при лазерном нагреве значительно меньше, чем при плазменной обработке.

При лазерном модифицировании на поверхности образуется износостойкий слой, содержащий легированный твёрдый раствор основы порошка с остаточными нерастворившимися частицами карбидных, боридных и других соединений. Легированный твёрдый раствор износостойкой наплавки имеет твёрдость ~12 700...16 000 МПа (рисунок 8). Твёрдость нерастворившихся остаточных упрочняющих частиц достигает 25 000...28 000 МПа. Глубина наплавленного слоя составляет ~0,2 мм, глубина упрочнённой части подслоя ~0,2 мм. На границе «слой—подслой» имеется узкая полоска переходной зоны со значительным снижением твёрдости (~4 500 МПа) шириной ~0,02 мм. Это происходит, по нашему мнению, вследствие того, что углерод подслоя приграничного слоя диффундирует в наплавленный слой

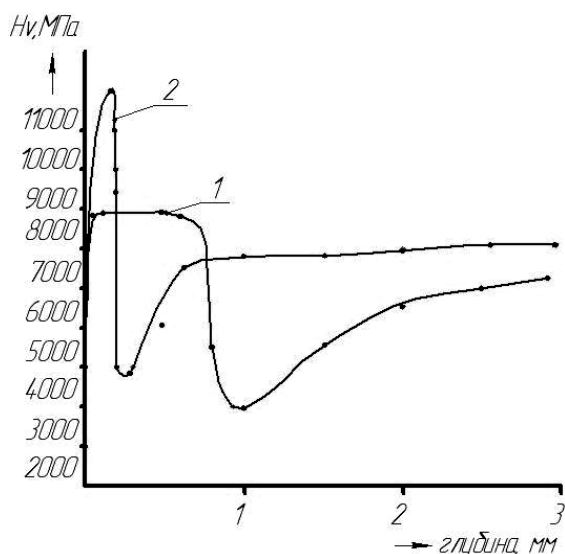


Рисунок 7 — Изменение микротвёрдости стали 60 ПП, подвергнутой лазерному (2) и плазменному (1) упрочнению

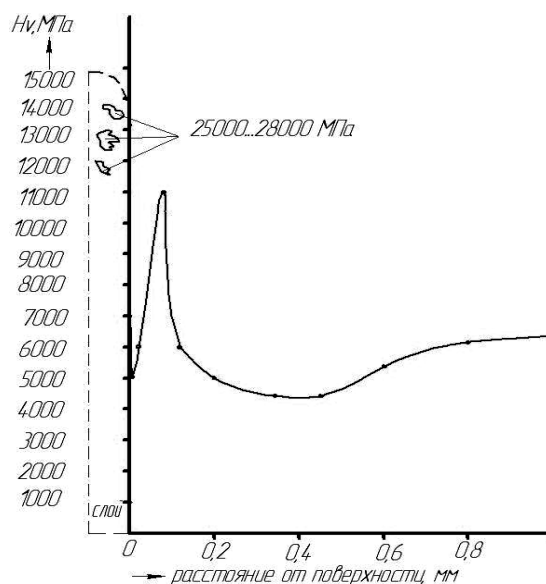


Рисунок 8 — Распределение микротвёрдости по глубине образца из стали 60ПП, подвергнутого лазерному модифицированию

и откладывается на имеющихся остаточных карбидных частицах, служащих готовыми центрами кристаллизации, либо образует их в приграничной зоне, где происходит частичное оплавление подслоя и смешение расплавов слоя и подслоя. Суммарная глубина упрочнения при лазерном модифицировании составляет 0,4...0,5 мм. Наличие аустенитной прослойки на границе раздела «слой—подслой» должно оказывать положительное влияние на свойства переходного слоя, улучшая адгезию, уменьшая растягивающие и скалывающие напряжения.

В отличие от лазерного, при плазменном модифицировании на поверхности образцов не наблюдалось образования слоя с упрочняющими частицами. По нашему мнению, температуры и времени воздействия при плазменном нагреве было достаточно для расплавления нанесённого шликерным методом порошка износостойкого сплава, растворения упрочняющих частиц, конвективного перемешивания с оплавленным слоем подслоя. В результате на поверхности имеется упрочнённый мартенситный слой, образованный при кристаллизации областей легированного расплава и областей перекристаллизованного твёрдого раствора легированных первичных кристаллов аустенита. Вследствие этого образованный упрочнённый слой состоит из смеси областей, в которых мартенсит различается по составу, морфологии и дисперсности. После плазменной обработки с оплавлением поверхности и с использованием порошка износостойкого сплава того же состава, что и при лазерном модифицировании, в микротвёрдости стали 60ПП наблюдаются изменения (рисунок 9). Суммарная глубина упрочнения при плазменной обработке с модифицированием поверхности составляла ~1 мм при максимальной твёрдости ~13 000 МПа (см. рисунок 9) и могла достигать ~2 мм при обработке плазмой в режимах с глубоким проплавлением поверхности. Что касается переходных зон при плазменном модифицировании, то их протяжённость значительно больше, причём с характерным постепенным изменением смежных структурных составляющих и свойств по глубине.

Результаты исследований по упрочнению стали пониженной прокаливаемости 60ПП лазерной и плазменной обработкой позволяют рекомендовать их для использования в технологиях изготовления ряда деталей сельскохозяйственных машин, например режущих элементов, требующих повышенных характеристик эксплуатационной стойкости, когда долговечность лимитируется высокими значениями твёрдости, износостойкости в сочетании с повышенными значениями прочности и ударной вязкости.

Закключение. На основании полученных результатов исследований упрочняющих технологий, применяемых для изготовления деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин, можно заключить следующее:

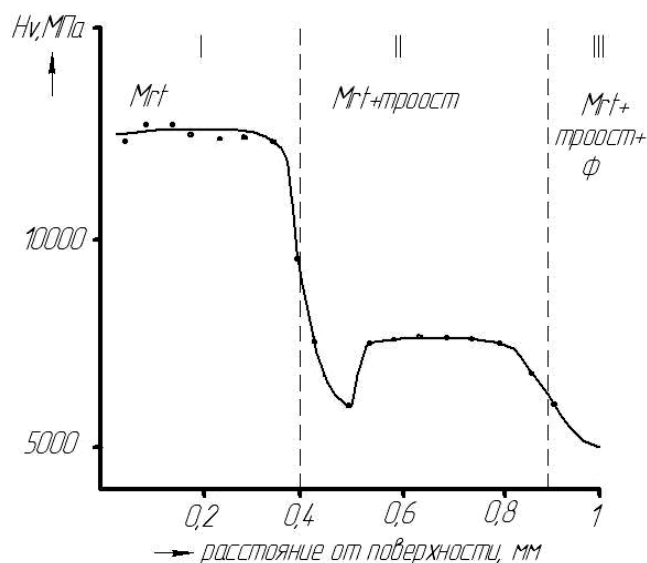


Рисунок 9 — Распределение микротвёрдости по глубине образца из стали 60 ПП, подвергнутого плазменному модифицированию

1) применение метода поперечно-клиновой прокатки для формообразования заготовок с рабочей частью переменного сечения вместо обработки резанием позволяет увеличить коэффициент использования металла до 0,98, производительность труда — в 8...10 раз, максимально приблизить поковку к требуемым точности размеров и чистоте поверхности детали;

2) применение ТИЗОЖ позволяет достичь формирования в плоских изделиях объёмного 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 пониженной прокаливаемости в них формируются продукты мартенситного превращения нанометрового размера (20...80 нм). Придание такого дисперсного структурного строения ДРОСМ является основой повышения их конструкционной прочности и износостойкости;

3) при изготовлении деталей сельскохозяйственных машин, требующих повышенных характеристик эксплуатационной стойкости, когда их долговечность лимитируется высокими значениями твёрдости, износостойкости в сочетании с повышенными значениями прочности и ударной вязкости, можно рекомендовать применение сталей пониженной прокаливаемости, упрочнённых лазерной или плазменной обработкой.

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. Энциклопедический справочник термиста-технолога : в 3 т. / С. Б. Масленков [и др.]; под общ. ред. С. Б. Масленкова. — М. : Наука и технологии, 2003. — Т. 1. — 392 с.
3. Энциклопедический справочник термиста-технолога : в 3 т. / С. Б. Масленков [и др.]; под общ. ред. С. Б. Масленкова. — М. : Наука и технологии, 2004. — Т. 3. — 704 с.
4. Бетень, Г. Ф. Опыт упрочнения деталей из сталей пониженной прокаливаемости импульсным закалочным охлаждением жидкостью / Г. Ф. Бетень, Г. И. Анискович // Вестн. БарГУ. — 2013. — Вып. 1. — С. 152 — 159.
5. Кобаско, Н. И. Закалка стали в жидких средах под давлением / Н. И. Кобаско. — Киев : Наук. думка, 1980. — 208 с.
6. Волокушин, В. Д. Металловедение и термическая обработка : учеб.-справ. пособие / В. Д. Волокушин. — Винница : Книга-Вега, 2005. — 504 с.
7. Хроника. Второй Всероссийский семинар по проблемам закалочного охлаждения // М и ТОМ. — 1997. — № 10. — С. 37—38.

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. *Быков, Ю. А.* Структура и свойства конструкционных наноматериалов / Ю. А. Быков // Справочник. Инженер. журн. (с прил.). — 2010. — № 7. — С.1—24.
10. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
11. *Гуляев, А. П.* Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
12. *Григорьянц, А. Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
13. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]. — Киев : Техника, 1990. — 109 с.

Материал поступил в редакцию 30.05.2014 г.

The results of studies on the development and application of technologies for the manufacture of parts and hardening of the working bodies of agricultural machinery, the technical level that corresponds to the best world standards. These include the technology of pulsed quenching technology shaping the blade part thermoplastic processing, technology of plasma and laser cladding. These technologies are powerful, environmentally friendly and meet the requirements for energy and resource saving.

Key words: abrasive wear, shaping of blades, plastic deformation, plasma processing, cross-wedge rolling.