

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ПОВЫШЕНИЕ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
МАШИН**

Минск  
БГАТУ  
2010

УДК 631.31.02

**Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]:** Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. Белорусский государственный аграрный технический университет. – Минск : БГАТУ, 2010. – 320 с. : ил. – ISBN 978-985-519-331-0.

В монографии изложены теоретические предпосылки, методические положения и способы повышения работоспособности новых и отремонтированных рабочих органов сельскохозяйственной техники.

Пособие предназначено для научных сотрудников, аспирантов и студентов по специальностям «Технологии технического обслуживания машин и оборудования в сельском хозяйстве» и «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве».

Табл. 41. Ил. 140. Библиогр.: 127 назв.

Авторы:

доктор технических наук, профессор *И. Н. Шило*, кандидат технических наук, доцент *Г. Ф. Бетенья*, *Л. А. Маринич*, кандидат технических наук, доцент *Г. И. Ашискович*, кандидат физико-математических наук *В. С. Голубев*, кандидат технических наук *А. Н. Давидович*, кандидат экономических наук, доцент *П. А. Дроздов*, кандидат технических наук, доцент *А. Д. Четкин*, *Д. П. Литовчик*, *И. А. Декевич*

Рецензенты:

член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор *А. П. Ласковнев*;  
доктор технических наук, профессор *В. П. Иванов*

ISBN 978-985-519-331-0

© Оформление. БГАТУ, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1	
АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ.....	8
1.1. Состояние решаемой проблемы.....	8
1.2. Энергосбережение в земледелии.....	14
1.2.1. Машины для основной обработки почвы.....	17
1.2.2. Машины для предпосевной подготовки почвы и посева.....	23
БИБЛИОГРАФИЯ.....	26
РАЗДЕЛ 2	
ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СРЕД.....	29
2.1. Агротехнические основы обработки почвы.....	29
2.2. Механика взаимодействия рабочих органов с почвой.....	40
2.3. Влияние физико-механических свойств почвы на изнашивание деталей.....	50
БИБЛИОГРАФИЯ.....	56
РАЗДЕЛ 3	
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ.....	57
3.1. Материалы и новые технические решения конструкции деталей.....	57
3.2. Современные технологии изготовления деталей.....	72
БИБЛИОГРАФИЯ.....	75
РАЗДЕЛ 4	
ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН.....	77
4.1. Типовые представители деталей.....	77

4.2. Методика сравнительной оценки технического уровня деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники.....	80
4.3. Обоснование критериев работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники.....	85
4.4. Обоснование выбора материала ДРОМ.....	90
БИБЛИОГРАФИЯ.....	95
РАЗДЕЛ 5	
ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН.....	98
5.1. Контроль качества на этапах производства деталей.....	98
5.2. Применение сталей пониженной прокаливаемости.....	99
5.3. Методы получения заготовок.....	102
5.3.1. Лазерный раскрой листового материала.....	105
5.3.2. Плазменный раскрой листового материала.....	108
5.3.3. Формообразование заготовок и рабочей части термопластической обработкой.....	111
5.4. Технология термического модифицирования заготовок.....	128
5.4.1. Объемно-поверхностное термическое модифицирование.....	128
5.4.2. Высокочастотное термическое модифицирование.....	164
5.5. Технология диффузионного намораживания.....	182
5.5.1. Теоретический анализ тепловых процессов, происходящих при намораживании.....	182
5.5.2. Структура, физико-механические свойства и работоспособность покрытий.....	193
5.6. Применение лазерных технологий.....	217
5.6.1. Лазерное модифицирование.....	217
5.6.2. Лазерная паплавка.....	227
5.6.3. Лазерная закалка.....	231
5.7. Применение плазменных технологий.....	237
5.7.1. Плазменная закалка.....	237
5.7.2. Плазменная наплавка.....	249
БИБЛИОГРАФИЯ.....	255

РАЗДЕЛ 6	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ.....	259
6.1. Технологические регламенты изготовления деталей повышенной работоспособности .....	259
6.2. Практические результаты освоения технологий изготовления деталей.....	265
БИБЛИОГРАФИЯ .....	270
РАЗДЕЛ 7	
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ.....	273
7.1. Методика оценки экономической эффективности .....	273
7.2. Себестоимость изготовления сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин.....	283
БИБЛИОГРАФИЯ .....	303
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	304
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	307

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение работоспособности деталей рабочих органов почвообрабатывающей, посевной и кормоуборочной техники является одной из актуальных проблем современного сельскохозяйственного машиностроения. Анализ конструкционных материалов, используемых в последние 10–15 лет предприятиями Республики Беларусь и другими государствами СНГ, свидетельствует о применении недорогих марок сталей, а также традиционных методов термообработки. Твердость изделий составляет 35–48 HRC, прочность не превышает 900–1200 МПа, ударная вязкость – в пределах 0,2–0,6 МДж/м<sup>2</sup>.

За рубежом детали рабочих органов машин получают преимущественно из более прочных борсодержащих мало- и среднеуглеродистых сталей с добавками молибдена, титана и других элементов. Применение таких сталей и специальных способов термической обработки позволило достичь повышенных эксплуатационных свойств. Детали упрочняются до твердости 48–52 HRC, прочность превышает 1200 МПа, ударная вязкость составляет 0,80–0,85 МДж/м<sup>2</sup>. Аналогами их в СНГ являются стали 30ГР, 40ГР, 30Г2Р и др.

Наряду с этим, западноевропейские фирмы разработали и реализовали наукоемкие технологии с применением новых материалов, а также лазерных и плазменных способов упрочнения деталей в сочетании со специальными процессами термической обработки: «Conit» – *Kverneland*, Норвегия; «Triplex» и «Dreilagenmaterial» – *Huard*, Франция; «Rabid» – *Rabewerk*, Германия; «Plasmabid» – *Rabe*, Германия; «Petmanit» – *Vogel & Noot*, Австрия. Изделия, полученные с применением технологий «Conit» и «Triplex», обладают высокой конкурентоспособностью и наиболее соответствуют ударно-абразивным условиям эксплуатации.

Отличительной особенностью этих изделий является двух- или трехслойное строение поперечного сечения – диссипативное структурное строение. Поверхностные слои изделий имеют прочность 1200–1800 МПа и твердость до 67 HRC. Пластичная сердцевина при этом обеспечивает повышенную ударную вязкость изделий.

Специалистами УО «Белорусский государственный аграрный технический университет» и ПО «Минский тракторный завод» получены положительные результаты по изготовлению деталей для работы в абразивной среде из сталей пониженной прокаливаемости – стали 55ПП, 60ПП и др. Технологии упрочнения этих конструкционных материалов являются экологически чистыми и соответствуют специфическим свойствам почв – засоренности камнями и высокой абразивной изнашивающей способности. Основными характеристиками экспериментальных деталей являются: мелкозернистая мартенситная структура поверхностного слоя толщиной 2–3 мм; прочность – в пределах 2100–2300 МПа; твердость поверхности – 60 HRC и более; пластичная сердцевина изделия имеет твердость 28–40 HRC, ударная вязкость составляет 1,0–1,25 МДж/м<sup>2</sup>. Полученные изделия по техническому уровню сравнимы с лучшими мировыми аналогами.

## РАЗДЕЛ 1

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

#### 1.1. Состояние решаемой проблемы

Сменные детали рабочих органов сельскохозяйственной техники относятся к числу самых сложных изделий сельскохозяйственного машиностроения [1, 2, 3]. Повышение их работоспособности является важной задачей отечественного сельскохозяйственного машиностроения и ремонтного производства. Решение этой научно-технической проблемы требует комплексного подхода, учитывающего конструктивные, технологические, материаловедческие, эксплуатационные, экологические и экономические факторы [15, 16].

Машиностроительными и ремонтными предприятиями республики освоено производство почворежущих элементов (ПРЭ): лемехов и долот плугов, обратных рыхлительных лап чизельных культиваторов и комбинированных агрегатов для предпосевной обработки почвы, ковшовых зубьев экскаваторов и других деталей, работающих в абразивной среде. Они являются изделиями массового производства, относятся к быстроизнашивающимся деталям и по мере износа заменяются новыми запасными частями.

Эти детали конструктивно состоят из трех частей: режущей – почворежущего профиля, стержневой – несущей и монтажной – крепежной. Каждая из этих частей имеет функциональное назначение. Повреждение или выход из строя хотя бы одной из частей приводит к потере работоспособности детали в целом.

Почворежущие элементы работают в непосредственном контакте с почвой, подвергаясь динамическим нагрузкам, абразивному изнашиванию и химическому воздействию внешней среды [5, 6, 7]. Результатом действия внешних факторов на ПРЭ являются их поломка, деформация, нарушение первоначальной формы и геометрических размеров. Основной причиной деформации и поломок является недостаточная прочность металла, принятого для изготовления ПРЭ.

Для изготовления ПРЭ применяют конструкционные стали 40, 40Х, 45, Л53, 65Г и других марок [1]. Как правило, при изготовлении ПРЭ используют штамповку из полосового или периодического проката и традиционные методы упрочняющей технологии (закалка + отпуск), придавая поверхности трения твердость 38–43 HRC. Однако, как показывает практика, закалка не дает существенного эффекта. Закалка деталей из конструкционных сталей не исключает прямого разрушения их рабочей части: микроцарапание и микрорезания кварцевыми частицами. Интенсивность изнашивания таких деталей достигает 30 мкм/км пути.

Анализ уровня надежности почвообрабатывающей техники по данным испытаний на МИС показывает, что из общего числа отказов около 40 % приходится на ПРЭ [2]. Особенно низкой является наработка на отказ лемехов, сменных груденок отвала и полевых досок. Коэффициент готовности плугов находится в пределах 0,93–0,98. Почворезущие элементы серийного производства имеют фактическую наработку почти в 2 раза меньше нормативной.

Ежегодный расход сменных деталей и экономические потери от изнашивания рабочих органов машин огромны. Основными причинами такого положения являются несоответствие конструкций, технологии и материала деталей условиям их работы [15, 16]. Например, многие десятилетия для изготовления сменных деталей корпусов плугов используются стали Л53 и 65Г. При этом не учитываются закономерности абразивного изнашивания и возросшие скорости пахотных агрегатов. Скорость относительного перемещения деталей рабочих органов плугов при вспашке возросла с 1,0 м/с до 3,5 м/с. Это повлекло увеличение ударных нагрузок и интенсивности абразивного изнашивания. Для обеспечения работоспособного состояния таким деталям требуется значительное увеличение прочности, ударной вязкости и твердости материалов [15, 16].

Как показывают исследования, для современных условий обработки почвы необходимо обеспечить прочность материала изделия 1500–1800 МПа. Ударная вязкость должна соответствовать значениям не менее 0,8–1,0 МДж/м<sup>2</sup>. Для снижения интенсивности абразивного изнашивания необходимо обеспечивать максимально возможную твердость поверхности – 60–65 HRC [16]. Такие значения прочности, ударной вязкости и твердости при изготовлении деталей из сталей Л53 и 65Г традиционными технологиями (закалка + отпуск) не обеспечиваются [1].

Кроме того, при серийном производстве сменных деталей корпусов плугов отечественными производителями недостаточно используются специальные профили, например, профиль 122С и 142С для лемехов, полоса 120×18 мм и 120×14 мм для долот. Недостаточно внимания уделяется сокращению операций механической обработки при изготовлении деталей. Как правило, применяются традиционные операции термической обработки изделий (закалка + отпуск) с использованием масел в качестве охлаждающей среды, что свидетельствует также об их экологическом несоответствии современным технологиям. Такие технологии [1] позволяют достигать твердости рабочей поверхности изделий только в пределах 38–43 HRC, что также является недостаточным для их эффективной работы в абразивной среде.

Работоспособное состояние ПРЭ определяется значениями параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствующие требованиям конструкторской документации. Основными из них являются: способность к заглублению, тягосопроотивление перемещению в почвенном слое, ресурс, прочность, ударная вязкость, сохраняемость остроты лезвия. От качества изготовления и состояния ПРЭ в ходе эксплуатации зависят: обеспечение агротехники обработки почвы, энергоёмкость процесса почвообработки и экономическая эффективность использования почвообрабатывающей техники.

В зависимости от условий работы ПРЭ, процесс их абразивного изнашивания может изменяться и переходить от более интенсивных форм к менее интенсивным и наоборот. Изнашивание металла в абразивной среде зависит от множества факторов, сопутствующих работе ПРЭ. Это непрерывно меняющиеся нагрузки на поверхности трения, неоднородность абразивной среды, сложность динамики процессов контактирования и перемещения части абразива. К их числу можно добавить влияние механических свойств металла детали и абразивных частиц, соотношение твердости абразива и металла, скорость относительного перемещения и др. Многообразие этих факторов обуславливает наличие смешанных видов изнашивания [3].

Изучением закономерностей и механизма абразивного изнашивания, поиском технических решений повышения ресурса деталей, работающих в абразивной среде, занимаются специалисты и ученые во всем мире. Общепризнанными являются научные труды М. М. Хрушова [8], М. А. Бабичева [8], В. Н. Качева [5, 10, 11], И. В. Крагельского [9], П. Н. Львова [12], Б. И. Костецкого [13, 14], М. М. Севернева [6], М. М. Тененбаума [7, 15], Л. С. Лившица [16],

А. Ш. Рабиновича [17], Н. В. Цыпина [18], В. Н. Кашеева [19], У. А. Икрамова [20], В. Ф. Лоренца [21] и др. В теоретическом и практическом плане большое значение имеют исследования абразивной износостойкости, выполненные ИЭС им. Е.О.Патона, ИМашем РАН, Ростовским НИИТМом, ЦНИИМашем, НИИСтройдормашем, ГосНИПИ, ВИСХОМом и другими научными центрами.

Исходя из анализа современных теорий абразивного изнашивания, можно полагать, что применительно к ПРЭ механизм абразивного изнашивания в основном объясняется явлениями микрорезания, микроцарапания, хрупкого разрушения, одно- и многократного пластического деформирования. Эти явления протекают совместно с коррозионно-механическим износом деталей.

В процессе работы ПРЭ могут иметь место отказы (поломки, деформации) по стержневой или монтажной части. Они, как правило, являются следствием ошибок и отклонений, допущенных конструкторами при проектировании или технологами при изготовлении. Ошибочные решения, допущенные конструкторами или технологами по стержневой или монтажной части в ходе эксплуатационных испытаний выявляются незамедлительно. Просчеты по режущей части (ошибочный выбор формы режущих кромок, размеров или материала) являются более скрытыми и появляются неоднозначно.

Результаты исследований [3, 5, 6, 17, 22] и анализа ремонтного фонда ПРЭ свидетельствуют, что у деталей, износ почворежущего профиля которых достиг предельного состояния, как правило, крепёжная и стержневая части не претерпевают существенных изменений по отношению к первоначальному состоянию. Линейный износ почворежущего профиля до предельного состояния является неизбежным фактором при эксплуатации ПРЭ. Для одних деталей предельное состояние характеризуется линейным износом в определенном сечении, для других – изменениями формы, например, затуплением, для третьих – сочетанием размерных и геометрических изменений. В третьем случае искажаются первоначальные размеры и форма рабочих поверхностей ПРЭ.

Геометрические изменения формы рабочей части ПРЭ в процессе работы неоднозначно сказываются на работоспособности деталей. Так, например, если изменения формы носят локальный, направленный характер и при этом не нарушается режущая кромка, а износ по толщине режущей части незначителен [22], то ПРЭ сохраняет работоспособное состояние до наступления предельного износа.

В процессе работы ПРЭ могут иметь место отказы (поломки, деформации) по стержневой или монтажной части. Они, как правило, являются следствием ошибок и отклонений, допущенных конструкторами при проектировании или технологами при изготовлении. Ошибочные решения, допущенные конструкторами или технологами по стержневой или монтажной части в ходе эксплуатационных испытаний, выявляются незамедлительно. Просчеты по режущей части (ошибочный выбор формы режущих кромок, размеров или материала) являются более скрытыми и проявляются неоднозначно.

Износ деталей является основной формой физического старения машины. Он сопровождается изменением размеров, формы и состояния рабочих поверхностей, ухудшением функциональных качеств, уменьшением прочности деталей и др. Об изменении формы и состояния ПРП на примере изнашивания лемеха свидетельствуют сведения, приведенные в научных трудах [5, 11].

При обработке тяжелой глинистой почвы лезвие лемеха затупляется и, как правило, приобретает скругленную форму. На примере изнашивания лемеха установлено, что с появлением на лезвии фаски шириной 2 мм, лемех при обработке твердых почв необходимо затачивать. Известно также из наблюдений, если на лемехе появилась фаска шириной 3–4 мм, то тяговое сопротивление увеличивается на 25 %, на 6–8 % возрастает расход топлива. При обработке тяжелых суглинистых почв возникает затылочная фаска под углом около 30° ко дну борозды. Передняя фаска в этих условиях отсутствует.

По мнению авторов [11, 23], кромка лезвия при резании песчаной почвы, как правило, остается работоспособной до предельного износа. Аналогично изнашивается почворежущий профиль оборотных рыхлительных лап чизельных культиваторов и долот плугов [24, 25]. Для этих деталей конструкторами предложен запас на износ почворежущего профиля до предельного состояния, соответственно равный 70 мм и 120 мм. Нарботка серийно выпускаемых лемехов, долот плугов, рыхлительных оборотных лап чизельных культиваторов является особенно низкой при обработке супесчаных и песчаных почв, засоренных гравийными частицами, из-за высокой изнашивающей способности [24] данного типа почв. Так, например, при средней сезонной наработке плуга около 40 га ресурс долота составляет всего 8–15 га.

Примером направленного линейного износа режущей части служат ковшовые зубья мелиоративных элементов [22]. Анализ ремонтного фонда и наблюдения за эксплуатацией мелиоративных экскаваторов свидетельствуют о направленном характере изменения формы и размеров режущей части ковшовых зубьев.

Наблюдениями установлено, что по мере нарастания линейного износа на активной (рабочей) поверхности зубьев образуется фаска. Конфигурация поверхности этой фаски отличается от исходной. Это объясняется неравномерным распределением давления на активной поверхности режущей части ковшовых зубьев. Предельное состояние ковшовых зубьев определяется линейным износом по длине, равным 20 мм. Нарботка этих деталей до предельного состояния (12 км траншей) в 2–3 раза меньше средней сезонной наработки на машину. Аналогичный характер изнашивания присущ полозовым сошникам и черенковым ножам сеялок.

Как свидетельствует мировой опыт производства, для изготовления сменных деталей рабочих органов машин должны применяться наукоемкие технологии [4–14]. Такие подходы обеспечивают ведущим производителям запасных частей способность сохранять конкурентоспособность, а также занимать доминирующее положение на рынке. Передовые позиции на рынке принадлежат норвежской фирме *Kverneland*, немецкой *Rabe*, французской *Kuhn*, австрийской *Vogel & Noot* и др. Эти компании во второй половине 90-х годов разработали новые специальные методы термической обработки деталей, что позволило им обеспечить в настоящее время высокое качество и надежность изделий при сохранении цены на сравнительно низком уровне.

Анализ причин утраты работоспособности серийно выпускаемых ПРЭ, их наработки до предельного состояния и требуемой средней сезонной наработки свидетельствуют о сравнительно низком техническом уровне отечественных изделий и необходимости поиска технических решений повышения в 2–4 раза их ресурса. Это обуславливает необходимость теоретического обоснования конструкторских параметров почвообрабатывающего профиля (ПРП), применяемых материалов и технологий изготовления с целью повышения ресурса ПРП в 2–4 раза.

Предлагаемые технологии производства сменных деталей почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин с использованием специальных методов термической обработки из сталей пониженной прокаливаемости характеризуются высокой производительностью труда, экономической эффективностью, патентной чистотой и т. п. Технологии являются экологически безопасными, так как для специальной термической обработки изделий рекомендуется использовать спрейерное охлаждение водой с высокой интенсивностью [16].

Применение соответствующих материалов и специальных профилей для заготовок с использованием прогрессивных методов термиче-

ской обработки позволяет обеспечивать твердость изделий в пределах 60–64 HRC и более, ударную вязкость – 0,8–1,25 МДж/м<sup>2</sup>, прочность – 2500–3500 МПа. При этом интенсивность абразивного изнашивания разрабатываемых сменных деталей рабочих органов почвообрабатывающей техники снижается в 2–4 раза. Она составляет для долот по их длине не более 50–60 мкм/км, лемехов по ширине – 40–50 мкм/км и отвала – 0,20–0,30 мкм/км пути.

Технологии получения деталей превосходят аналогичные показатели традиционных методов. Достигаемый технический уровень не уступает показателям ведущих фирм-производителей сельскохозяйственной техники, использующих наукоемкие технологии и высокопрочные стали марок «Racold TS», «Permanit», износостойких бористых сталей типа «SB27M12CB» и др. [4]. Освоение в производственных условиях технологий получения сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники позволит обеспечивать сельхозпроизводителей изделиями собственного производства (взамен приобретения по импорту), по техническому уровню не уступающими лучшим мировым аналогам.

## 1.2. Энергосбережение в земледелии

Технический уровень современных почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин определяется внедрением современных почвозащитных и энергосберегающих технологий, демополизацией производства техники и развитием регионального машиностроения.

Альтернативой традиционным системам земледелия было появление новых «щадящих» технологий обработки почвы: минимальной, «нулевой», гребневой, полосной, мульчирующей и др. Из них проверку временем выдержали почвозащитные технологии, которые направлены на предотвращение ветровой и водной эрозии почвы, сохранение и повышение ее плодородия, защиту окружающей среды. Основу почвозащитных технологий составляет безотвальная обработка, включающая сплошное и полосное рыхление с оставлением пожнивных остатков. Новая технология потребовала создания чизельных орудий – плугов и культиваторов, а также сеялок с пневматическим высевом, которые можно комбинировать с чизельными культиваторами.

Необходимо отметить, что соотношение земельной площади, обрабатываемых по отвальной и безотвальной технологиям, к на-

стоящему времени стабилизировалось и составляет примерно 1:1. В связи с этим, значение отвально-лемешных плугов как основных орудий для уничтожения сорняков, борьбы с вредителями и болезнями культурных растений, сохранится надолго, – они являются основой для применения безгербицидных технологий.

Высокая энергоёмкость применяемых в настоящее время почвообрабатывающих машин объясняется тем, что почва разрушается ими преимущественно за счет деформации сжатия, при которой предельные усилия разрушения в 10–20 раз больше, чем при деформации растяжения или сдвига. Однако все попытки создания рабочих органов, разрушающих почву деформацией растяжения, не увенчались успехом [1].

Методы отвальной вспашки непрерывно совершенствуются, но неизменным остается принцип работы плужного корпуса – отрезание и оборот пласта в открытую соседнюю борозду. С агрономической точки зрения перемещение верхнего, более плодородного, но обесструктуренного слоя почвы на место нижнего создает благоприятные условия для развития сельскохозяйственных культур. Важно отметить, что отвальная вспашка наиболее полно проявляет свои положительные свойства в тех зонах, где выпадает не менее 300–500 мм осадков в год. Однако даже в том случае, если используют преимущественно безотвальную обработку почвы, периодически – один раз в 3–4 года – применяют отвальную вспашку для радикальной борьбы с сорняками, запашки пласта многолетних трав и органических удобрений.

Совершенствование конструкций рабочих органов почвообрабатывающих машин осуществляется по следующим направлениям: повышение КПД машин; снижение износов на основных и вспомогательных рабочих поверхностях; применение приводных рабочих органов и новых способов воздействия на почву.

Повышение КПД машин достигается подбором рабочих органов, параметры которых в наибольшей степени отвечают зональным агротехническим требованиям. Для этого почвообрабатывающие машины должны оснащаться их широкой номенклатурой. Так, применение винтовых отвалов взамен корпусов культурного типа на вспашке травяного пласта даст снижение тягового сопротивления на 18–25 %. Использование ромбовидных корпусов снижает расход топлива на 21–29 % вследствие меньшей металлоемкости плугов, а также сокращения энергии на оборот пластов почвы, потерь на трение колес трактора о стенку борозды и меньшего их буксования благодаря широкой открытой борозде.

На преодоление сил трения, возникающих на поверхностях рабочих органов и опорах почвообрабатывающих машин, расходует-

ся 20–40 % общей потребляемой энергии. Поэтому снижение потерь на трение весьма важно для повышения КПД машин. В этих целях прибегают к уменьшению площади поверхности рабочих органов, например, заменяют сплошные отвалы пластинчатыми, используют антифрикционные покрытия, пневмо- и гидросмазку. В последние годы широкое применение получило упругое крепление рабочих органов к раме почвообрабатывающих машин – плугов, культиваторов, дисковых борон, катков, что позволяет снизить тяговое сопротивление до 10 %, а также обеспечить самоочистку от сорняков и повысить качество обработки почвы.

Дальнейшее повышение эффективности работы почвообрабатывающих машин связано с их широкой автоматизацией. Применение автоматизированных систем управления позволяет повысить производительность за счет повышения тягово-сцепных свойств тракторов, снижения буксования движителей трактора, своевременной диагностики неисправностей, а также автоматизации управления технологическими операциями, требующими высокой точности, например, вождением при междурядной обработке почвы.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы.

1. В ближайшие 15–20 лет преобладающим способом обработки почвы останется механический с применением тракторов в качестве энергосредства. Развитие почвообрабатывающей техники будет направлено на защиту почвы от эрозии и переуплотнения.

2. Для основной обработки почвы будут применяться отвальный и безотвальный способы примерно в равном соотношении. Еще надолго сохранится значение отвальной вспашки как основы для борьбы с сорняками и вредителями сельскохозяйственных растений и базы безгербицидных технологий.

3. Безотвальная обработка почвы в почвозащитных технологиях будет производиться плугами и культиваторами с чизельными рабочими органами и щелевателями. Новое поколение техники для почвозащитных технологий должно быть рассчитано на особенности обработки почвы при совместном проявлении ветровой и водной эрозии, на сохранение и накопление в ней влаги, разуплотнение верхнего и нижнего горизонтов.

4. В целях сокращения энергетических и трудовых затрат почвообрабатывающие машины должны иметь широкий набор сменных рабочих органов, максимально отвечающих зональным агротехническим требованиям, регулирующую ширину захвата, модульный



принцип компоновки конструкции из типизированных блоков с широкой унификацией узлов и деталей, бортовые компьютеры и микропроцессоры для диагностики технологического процесса и автоматического поддержания оптимальных режимов работы.

5. Необходимо отказаться от интуитивного конструирования новых машин и агрегатов и переходить к современным методам проектирования, что позволит сократить сроки разработки и повысить технический уровень и конкурентоспособность техники.

6. Создание нового поколения почвообрабатывающей техники, способно дать многократное повышение производительности и сокращение энергозатрат. Эта задача требует проведения фундаментальных работ по изысканию принципиально новых рабочих органов и машин, основанных на новых физических процессах их взаимодействия с почвой.

7. Особое значение приобретает внедрение в производство современных технологий производства и восстановления рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин. Применение технологий поверхностного упрочнения быстроизнашивающихся деталей позволит существенно повысить долговечность, износостойкость и снижение затрат на эксплуатацию в целом.

### 1.2.1. Машины для основной обработки почвы

Обработка почвы – самая энергоемкая операция сельскохозяйственного производства, на которую расходуется от 30 до 40 % всей потребляемой в сельском хозяйстве энергии. Поиск путей снижения энергозатрат на проведение этой операции оказывает существенное влияние на развитие конструкций почвообрабатывающей техники.

Широкую номенклатуру зарубежных навесных и полунавесных отвальных лемешных плугов (ОЛП) для отвальной и гладкой вспашки к тракторам сельскохозяйственного назначения мощностью от 10 до 200 кВт выпускают в основном фирмы: в США и Канаде – *John Deere, Case International, Harvester, Ford, Massey-Ferguson*; в Западной Европе: *Eberhard, Rabewerk, Lemken* – Германия; *Huard, Ebra, Kuhn, G. Besson* – Франция; *Ramsons, McConnel, Howard* – Великобритания; *Vogel & Noot* – Австрия; в Скандинавии: *Overums Bruk* – Швеция; *Kverneland* – Норвегия; *Fiskars* – Финляндия.

Практически все фирмы отказались от прицепных плугов и перешли на навесные и полунавесные модели как более эконо-

мичные по материалоемкости и маневренности. Навесные плуги выпускаются с числом корпусов от 1 до 7, полунавесные – от 5 до 14. Средняя удельная масса на 1 м ширины захвата навесных и полунавесных оборотных плугов зависит от сложности конструкции, прямо пропорциональна числу корпусов и колеблется от 350 до 850 кг. Аналогичные параметры у оборотных плугов почти в два раза выше.

Фирмы США и Канады выпускают преимущественно навесные и полунавесные многокорпусные плуги для свально-развальной вспашки. Оборотные плуги в этих странах менее распространены из-за сравнительно больших размеров фермерских хозяйств, на которых эффективнее работают широкозахватные плуги общего назначения.

В Западной Европе производятся преимущественно оборотные навесные и полунавесные плуги с числом корпусов от 2 до 8, так как средний размер фермерских хозяйств не превышает 50–100 га. Наиболее распространены 3- и 4-корпусные орудия с шириной захвата 1,05–2,4 м – 80–90 % общего объема выпуска. В скандинавских странах используются преимущественно полунавесные оборотные модели с числом корпусов 4–8.

Навесные плуги для свально-развальной вспашки имеют, как правило, 3–5 корпусов. По экспертным оценкам, производится более 400 их моделей. Рама треугольной формы опирается на одно металлическое, реже пневматическое, колесо, устанавливаемое по высоте вручную винтовым механизмом или гидроцилиндром. Для изменения ширины захвата ось подвески плуга регулируется также вручную или гидроцилиндром из кабины.

Полунавесные плуги имеют, как правило, 5–10 корпусов, реже – 12–14, ширину захвата 1,75–5,5 м и среднюю удельную материалоемкость 800–1000 кг/м. Они присоединяются к трактору через стандартное навесное устройство и оснащаются передним и задним управляемым колесами. На некоторых моделях, помимо заднего, устанавливается дополнительное полевое колесо, положение которого по высоте определяет глубину вспашки. Ширина захвата регулируется трактористом при помощи механических приспособлений на плуге или гидромеханических устройств из кабины.

Многокорпусные (свыше 8) полунавесные плуги снабжают двухколесной тележкой, расположенной примерно посередине рамы. Такой плуг в транспортном положении превращается в одноосный прицеп, что обеспечивает ему хорошую маневренность. В рабочем положении

плуга правое колесо тележки перемещается по дну борозды, повышая поперечную устойчивость агрегата. Копирование рельефа местности в продольном и поперечном направлениях плугами с числом корпусов более 8-ми обеспечивается шарнирной рамой.

Оборотные плуги с числом корпусов 5–10 предназначены для гладкой вспашки. Несмотря на то, что их масса и цена в 1,5–2 раза выше, чем обычных, в Западной Европе они находят преимущественное применение, так как обеспечивают более высокое качество, особенно на небольших участках и на пересеченной местности. Обработка ведется челночным способом, что повышает производительность до 10 %. Для смены работающих корпусов (оборота плуга) предусмотрен поворотный механизм с одним гидроцилиндром двустороннего действия, который управляется автоматически при подъеме плуга в конце загона или трактористом из кабины.

Совершенствование конструкций отвально-лемешных плугов (ОЛП) ведется по следующим направлениям [1]:

1) применение оборотных и фронтальных плугов для гладкой вспашки и плугов с частично или полностью приводными рабочими органами;

2) использование модульной конструкции плугов, при которой каждый корпус крепится к отдельной части рамы, образуя секцию (модуль), из которых собираются плуги различной ширины захвата;

3) создание плугов с регулируемой шириной захвата, что позволяет, в зависимости от условий эксплуатации, рационально загрузить тракторы, снизить расход топлива и повысить производительность;

4) применение пневмогидромеханических устройств независимо от числа корпусов, предохраняющих рабочие органы плугов;

5) улучшение конструкций основных и вспомогательных рабочих органов – плужных отвалов, предплужников, лемехов, дисковых ножей и др.

Ведущие специалисты считают перспективным модульный принцип построения несущих систем, обеспечивающий высокий, до 90 %, уровень унификации семейства навесных и полунавесных плугов к тракторам класса 1, 4, 5 [2]. Модульный принцип компоновки сочетается с широчайшим ассортиментом сменных взаимозаменимых рабочих органов, комплектующих узлов и деталей и используется многими европейскими фирмами. Уровень их унификации достигает 95–98 %.

Наряду с модернизацией компоновочных схем и конструкций отвальных плугов, активно совершенствуются плужные рабочие органы,

идет поиск новых направленный на улучшение качества и снижение энергоёмкости вспашки, повышение надёжности агрегатов. Качество и энергоёмкость вспашки определяется, прежде всего, правильным выбором рабочих органов, максимально соответствующих конкретным почвенно-климатическим и производственным условиям: глубина и скорость вспашки, тип трактора и т. д. В связи с этим фирмы предлагают потребителю широкий ассортимент плужных корпусов и их сменных составляющих: лемехов, долот, предплужников, углоснимов, удлинителей отвалов, дисковых и консольных ножей, почвоуглубителей, рыхлителей и т. п.

В последние годы фирмы *Kuhn* и *Huard*, Франция, активно поставляют на рынок так называемые «ромбические» корпуса типа «Losange» нескольких типоразмеров. Они имеют выпуклый криволинейный полевой обрез, что обеспечивает увеличение на 60 % поперечного сечения открытой борозды. Широкая борозда позволяет сократить потери на самоперекапывание и буксование трактора в том случае, когда тот правыми колесами перемещается в борозде. Кроме того, перераспределение сил и моментов, действующих на ромбический корпус со стороны почвы, снижает давление на полевые доски, что способствует уменьшению потерь на трение плуга о стенки борозды. В результате этого тяговое сопротивление плуга снижается, по данным фирмы, на 20–25 %.

Для использования в тяжелых почвенных условиях разработаны специальные отвалы плужных корпусов. Крылья отвалов изготавливаются из отдельных пластин. Кроме того, при снижении общей площади отвала уменьшаются силы сопротивления скольжению пласта. Тяговое сопротивление корпуса при этом уменьшается на 10–15 %.

Общий принцип изготовления плужных корпусов различных фирм – наличие грудинки и крыльев удлинителя отвала. Некоторые фирмы изготавливают грудинку из стали повышенной износостойкости или же упрочняют ее специальной наплавкой. Лемех также состоит из двух деталей – собственно лемеха и долота, которое принимает на себя основную нагрузку при отделении пласта от почвенного массива. Применяются также и цельные долотообразные и трапециевидные лемеха: первые – на твердых почвах, вторые – на легких и песчаных. Для очень тяжелых твердых почв рекомендуется лемех с выдвижным долотом и крылья отвала – из отдельных пластин.

По-прежнему актуальны рабочие поверхности плужных корпусов из полимерных материалов, которые, по данным отечественных и зару-

бежных источников, позволяют снизить тяговое сопротивление на 15–25 %. Отвалы, изготовленные из полиэтилена низкого давления и имеющие меньшие коэффициенты трения, не залипают даже на тяжелых почвах, создают лучшие условия для скольжения пласта, однако подвержены повышенному изнашиванию по сравнению со стальными.

Результаты анализа свидетельствуют о непрерывном совершенствовании конструкции и качества изготовления зарубежных ОЛП. Их характерные особенности:

1. Большинство фирм выпускает однотипные семейства с широкой унификацией узлов и деталей. Модульная конструкция рамы позволяет собирать многокорпусные орудия из отдельных блоков или секций.

2. Рамы изготавливаются из холодногнутых замкнутых профилей высокой прочности квадратного или прямоугольного сечения. Башмаки и стойки корпусов имеют штампосварные конструкции.

3. Навесные и полунавесные модели агрегируются с тракторами, оснащенными САР. Поэтому часто навесные плуги не имеют опорных колес, а на полунавесных устанавливается только одно заднее бороздное (или полевое) колесо, что снижает массу плуга.

4. Значительные изменения внесены в конструкцию основных и вспомогательных рабочих органов: плужных корпусов, отвалов, лемехов, предплужников, дисковых ножей, почвоуглубителей и др.

5. Все фирмы предлагают потребителю широкую номенклатуру плужных корпусов, не менее 5–7 типоразмеров, отличающихся шириной захвата, формой и типом лемешно-отвальной поверхности. Широкий выбор плужных корпусов позволяет потребителю подобрать наиболее подходящие для своих почвенных и хозяйственных условий, что обеспечивает высокое качество вспашки и снижение энергозатрат.

6. Для повышения долговечности плужные корпуса изготавливают составными со сменными быстроизнашивающимися частями: грудь, крыло, долото, а отвалы – из трехслойной стали с мягкой сердцевиной и твердыми наружными слоями.

7. Повышение долговечности и износостойкости лемеха достигается наплавкой его носка твердым сплавом, а также установкой сменного накладного или выдвижного долота.

8. Взамен предплужников и дисковых ножей большинство фирм устанавливают на корпусах так называемые угловыми и пластинчатый нож – «акулий плавник», который разрезает пласт и обеспечивает ровную стенку борозды.

9. Для снижения трудозатрат и повышения безопасности навешивания плуги оснащаются автоматическими и полуавтомати-

ческими сцепками. Крепеж изготавливается из конструкционных и легированных сталей и, как правило, имеет металлическое антикоррозионное покрытие.

10. Высокое качество обработки почвы достигается применением дополнительных приспособлений в виде катков, борон, выравнивателей и т. п.

Многочисленные сравнительные испытания показали, что отечественные конструкции плугов не уступают зарубежным по основным агротехническим показателям: крошению почвы, заделке растительных остатков, устойчивости хода по глубине обработки и ширине захвата. Однако они уступают по материалосмкости, энергозатратам, надежности и соответствию зональным требованиям. Сравнение технического уровня отечественных и зарубежных плугов позволяет сделать следующие выводы:

1. Совершенно недостаточна номенклатура отечественных навесных и полунавесных ОЛП как для тракторов малой мощности, так и энергонасыщенных.

2. Практически не выпускаются многокорпусные оборотные плуги для гладкой вспашки, за исключением двух- и трехкорпусных навесных.

3. Многокорпусные плуги не оснащаются предохранителями корпусов даже для работы на каменистых почвах, что резко снижает их надежность.

4. Номенклатура сменных плужных корпусов ограничена. Имеются плуги лишь с культурными и полувинтовыми отвалами, что не обеспечивает универсальности их применения в различных почвенно-климатических зонах.

5. По удельному сопротивлению и расходу топлива отечественные плуги на 10–15 % уступают зарубежным аналогам.

Анализ уровня надежности отечественных плугов показывает, что общее число отказов, в том числе и дефектов производственного характера, остается высоким. Главная причина дефектов – неудовлетворительное качество изготовления, почти 70 % общего числа отказов. Характерные причины отказов: некачественная сварка, дефекты термообработки, отклонения от чертежных размеров деталей и марок материалов, низкое качество изготовления.

Серьезный недостаток отечественных плугов – высокая трудоемкость ежедневного технического обслуживания, вызванная в основном проверкой и подтяжкой болтовых креплений, которые из-за низкого качества материалов тянутся, а из-за отсутствия анти-

коррозионного покрытия ржавеют и трудно отверстаются. Кроме того, приходится периодически смазывать подшипники опорных колес и дисковых ножей. Все это приводит к значительному снижению сменной эксплуатационной производительности.

Для повышения технического уровня и конкурентоспособности отечественных ОЛП необходимо:

1. Увеличить номенклатуру производств сменных плужных корпусов: цилиндрических, полувинтовых и винтовых, что позволит повысить качество обработки почвы и снизить расход топлива в различных условиях эксплуатации.

2. Увеличить номенклатуру навесных и полунавесных плугов для отвальной и, особенно, гладкой вспашки.

3. Ввести системы регулирования ширины захвата с целью расширения эксплуатационных возможностей многокорпусных ОЛП.

4. Конструкции плугов, предназначенных для работы на почвах, засоренных камнями, оборудовать механическими предохранителями рабочих органов.

5. Значительно повысить производительность и надежность.

6. Снизить затраты времени на ЕТО.

7. Повысить износостойкость и долговечность рабочих органов – лемехов, отвалов, полевых досок, дисковых ножей.

### **1.2.2. Машины для предпосевной подготовки почвы и посева**

Предпосевная подготовка почвы определяет в значительной степени получение стабильных и высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Наиболее обширную и представительную часть этой группы машин занимают культиваторы – орудия для рыхления верхнего слоя почвы с одновременным подрезанием сорняков и выравниванием поверхности поля. Применение комбинированных агрегатов позволяет все в большей степени совмещать предпосевную обработку почвы и посев в соответствии с требованиями энергосберегающих технологий.

За последние 10–15 лет зарубежные фирмы перешли на производство чизельных культиваторов. На их базе создаются разнообразные комбинированные машины, совмещающие несколько операций: рыхление, выравнивание и прикатывание почвы, внесение удобрений, гербицидов, посев и т. п.

Особенность зарубежных чизельных культиваторов – оснащение их широким набором рабочих органов. В стандартный набор обычно входят: различного типа оборотные наральники шириной 35–80 мм; стрельчатые лапы шириной 100–270 мм; узкие (10–

15 мм) ножи для разделки дернины; винтообразные наральники для оборота пласта с целью заделки растительных остатков при мульчировании; комбинированные рабочие органы, состоящие из винтового или простого наральника и стрельчатой лапы. Кроме того, чизельные культиваторы используются в комбинации с дисковыми батареями, зубовыми боронами, катками, сеялками и др.

Отечественные культиваторы оснащаются ограниченным набором рабочих органов, что снижает универсальность их применения. Незначительна также номенклатура комбинированных машин на базе чизельных культиваторов. По основным показателям работы – тяговое сопротивление, равномерность глубины обработки, степень крошения почвы и подрезания сорняков – наши культиваторы находятся на уровне зарубежных аналогов, уступая им по надежности, ресурсу рабочих органов, качеству изготовления: сварка, окраска, крепеж, гидроарматура и грузоподъемность опорных пневматических колес.

Серьезный недостаток – низкая надежность несущих систем (рам) культиваторов, а также пружинных зубьев и упругих стоек из-за некачественных сварных конструкций и отсутствия высокотехнологичных автоматических линий для изготовления упругих стоек. Следует также отметить высокую трудоемкость составления и переналаживания культиваторов из рабочего положения в транспортное и отсутствие быстросоединяемых сцепных устройств.

Для повышения технического уровня и работоспособности отечественных культиваторов для сплошной обработки почвы и комбинированных машин на их базе необходимо:

1. Разработать и освоить высокоунифицированное семейство бесцепочных культиваторов блочно-модульной конструкции с широким набором сменных максимально районированных рабочих органов и приспособлений для дополнительной обработки почвы: крошения, выравнивания, прикатывания, мульчирования и т. п.

2. Организовать централизованное изготовление рабочих органов высокого качества: рыхлительных и стрельчатых лап различных типоразмеров; спиральных стоек, S- и С-образных рыхлительных зубьев повышенной надежности с высоким ресурсом, культиваторных лап, плакированных твердым сплавом с повышенной износостойкостью и ударной вязкостью.

3. Освоить производство надежного гидрооборудования и гидроарматуры повышенного давления (не ниже 20 МПа):

гидроцилиндров, шлангов, соединительных муфт и штуцеров, пневматических шин высокой грузоподъемности и малых габаритов, высокопрочного самоконтращегося крепежа с металлическим антикоррозионным покрытием.

Посев зерновых культур рядовым, ленточным или разбросным способами в большинстве стран осуществляется разнообразными по номенклатуре посевными машинами. В основном это зерновые сеялки с механическими высевальными аппаратами как наиболее простые по конструкции и надежные в эксплуатации.

Для работы в тяжелых условиях чаще всего применяются одно- и двухдисковые сошники, на старопахотных землях – анкерные или килевидные одно- и двухстрочные сошники, а для полосного посева – стрельчатые лапы.

Значительно возрос интерес к пневматическим зерновым сеялкам, и их выпуск увеличивается. Благодаря своей универсальности, простоте обслуживания и переоборудованию на посев различных культур, компактности конструкции и малой материалоемкости зерновые пневматические сеялки получают все большее распространение в США, Канаде, Австралии, в странах Западной Европы и Скандинавии. Ширина их захвата колеблется от 3 до 12 м, что позволяет работать как на малых фермерских участках, так и на больших площадях. На их базе создаются компактные комбинированные агрегаты с разнообразными почвообрабатывающими машинами.

В последние годы появились сеялки с пневмомеханическим высевальным аппаратом. Первичное дозирование осуществляется, как и в сеялках с механическим высевом, желобчатой катушкой. Далее семена подаются в сошники воздушным потоком, что обеспечивает равномерность посева при большой ширине захвата.

В западноевропейских странах большое распространение получили сеялки-культиваторы для работы по стерне, а также комбинированные почвообрабатывающие посевные агрегаты. Положительная особенность зарубежных зерновых сеялок всех типов – оснащение их системами электронного контроля и управления технологическим процессом. Системы контроля показывают скорость движения, засеянную площадь, контролируют уровень семян и удобрений в бункерах, вращение вала высевального аппарата, работу каждого сошника, управляют маркерами и т. п.

Отечественные зерновые сеялки весьма ограничены по номенклатуре и не способны удовлетворить спрос многоукладных хозяйств.

Отсутствует выпуск современных пневматических сеялок, а сеялки с механическим высевальным аппаратом морально устарели.

Технический уровень и конкурентоспособность зерновых сеялок необходимо повышать по следующим направлениям:

1. Совершенствование конструкций с целью улучшения качества посева (равномерность и точность высева при снижении травмирования семян), повышения производительности за смену, надежности и наработки на отказ. Разработка электронных приборов дистанционного управления и контроля качества посева.

2. Увеличение номенклатуры выпускаемых сеялок по назначению и типоразмерам. Повышение универсальности применения сеялок за счет расширения номенклатуры смесных районированных сошников и приспособлений для дополнительной обработки почвы.

3. Проведение работ по созданию сеялки, обеспечивающей одозерновой точный посев зерновых культур, что резко сократит расход семенного материала.

Приведенные данные технического уровня плугов, культиваторов и сеялок свидетельствуют об острой необходимости координации разрозненных научно-исследовательских и конструкторских работ по созданию современных сельхозмашин и централизованного изготовления их комплектующих, особенно лемехов плугов. Плужной лемех относится к числу наиболее массовых, ответственных и металлоемких рабочих органов, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М. : Машиностроение, 2002. Т.IV–16.
2. Панов И. М., Черепяхин А. Н. Технический уровень почвообрабатывающих и посевных машин. 2000, № 8, 9 // Тракторы и сельскохозяйственные машины.
3. Бетенья Г. Ф. Повышение долговечности почворезущих элементов сельскохозяйственной техники наплавкой наморачиванием. Минск : БелНИИНТИ, 1986.
4. Сидоров С. А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин. 1998, № 3 // Тракторы и сельскохозяйственные машины.

5. Ткачев В. Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М. : Машиностроение, 1995.

6. Севернов М. М. [и др.]. Износ деталей сельскохозяйственных машин. Л. : Колос, 1972.

7. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. М. : Машиностроение, 1976.

8. Хрушов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М. : Наука, 1970.

9. Крагельский И. В. Трение и износ. М. : Машиностроение, 1968.

10. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности сельскохозяйственных машин: эксперименты, практика, рекомендации. М. : ЦОПКБ ВИМ, 1993.

11. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин. М. : Машиностроение, 1971.

12. Львов П. Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. М. : Машгиз, 1962.

13. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. Киев : ГНТИМЛ, 1959.

14. Костецкий Б. И. [и др.]. Поверхностная прочность материалов при трении. Киев : Техника, 1976.

15. Тененбаум М. М. [и др.]. Перспективы использования передовых методов снижения износа в сельскохозяйственном машиностроении: обзорная информ. // Технология и автоматизация производства; сер. 3, вып. 8. М. : ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш, 1988.

16. Лившиц Л. С., Гринберг Н. А., Куркумели Э. Г. Основы легирования наплавленного металла. Абразивный износ. М. : Машиностроение, 1969.

17. Рабинович А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машин. М. : ГОСНИТИ, 1962.

18. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. Киев : Наукова думка, 1983.

19. Кашеев В. Н. Абразивное разрушение твердых тел. М. : Наука, 1970.

20. Икрамов У. А. Механизм и природа абразивного изнашивания. Ташкент : Фан, 1979.

21. Лоренц В. Ф. Износ деталей сельскохозяйственных машин. М. : Машгиз, 1948.

22. Суслов В. П. [и др.]. Устойчивость к износу биметаллических ковшовых зубьев дренажных экскаваторов. 1975, № 6 // Мелиорация и водное хозяйство.

23. Бернштейн Д. Б., Лискин И. В. Лемехи плугов. Анализ конструкций, условий изнашивания и применяемых материалов: обзорная информ. // Сельскохозяйственные машины и орудия; сер. 2, вып. 3. М. : ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш, 1992.

24. Разработать и освоить технологии изготовления износостойких деталей рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин. Научный отчет БГАТУ по теме № 06.84. № ГР 20066341. Минск : БГАТУ, 2006.

25. Лемехи ППН.8.30/50-301П, ППН.8.30/50-301П-01 корпусов плугов. Технические условия ТУ ВУ 100185315/006-2010.

## РАЗДЕЛ 2

### ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СРЕД

#### 2.1. Агротехнические основы обработки почвы

*Характеристика почвы.* По данным [1], под почвой понимают окультуренные поверхностные слои земной коры, подвергающиеся обработке земледельческими орудиями и машинами. Почву рассматривают с двух позиций – агрономической и механической. С агрономической точки зрения, почва обладает плодородием, то есть обеспечивает произрастание сельскохозяйственных растений. С механической точки зрения, почва, как всякое физическое тело, обладает прочностью, связностью и другими механическими свойствами. По предложению Г. Н. Синсокова [2], введено понятие о технологических свойствах почвы, к важнейшим из которых относятся показатель трудности обработки почвы, или удельное сопротивление почвы различным видам обработки (пахоте, культивации и др.), абразивность, каменистость и липкость.

Почва состоит из твердых частиц, почвенной влаги, почвенного воздуха, микрофлоры и микрофауны. Все физические, механические, химические и биологические свойства почвы непрерывно изменяются в зависимости от соотношения составляющих ее элементов.

*Механическая обработка почвы.* Обработка почвы относится к наиболее трудоемким и энергоемким операциям сельскохозяйственного производства: на нее расходуется от 30 до 40 % всех энергозатрат в сельском хозяйстве. В то же время от качества обработки почвы почти на 25 % зависит урожайность сельскохозяйственных культур.

Механическая обработка почвы – пока единственный способ создания и поддержания в ней условий, благоприятных для выращивания сельскохозяйственных растений. Качество выполнения механизированных операций обработки почвы во многом зависит от физико-механических и технологических свойств почвы, ее влажности, предшествующей культуры, рельефа местности и т. д. Важным показателем качества обработки почвы является ее грану-

лометрический состав, так как степень дисперсности определяет удельную поверхность почвенных частиц, с которой связан весь комплекс физико-химических и микробиологических процессов, способствующих получению высоких урожаев. Кроме того, необходимо, чтобы вся дисперсионно-коллоидная часть почвы находилась в виде водоустойчивых микро- и макроагрегатов, образующих ее структуру.

Современные технологии обработки почвы характеризуются многообразными приемами и способами в зависимости от зональных почвенно-климатических особенностей, возделываемой культуры и сложившихся традиций. В зависимости от глубины обработки и характера воздействия на почву различают следующие виды обработки почвы: основную (вспашка, чизелевание, глубокое рыхление), поверхностную (лушение, культивация, боронование, дискование, шлейфование, прикатывание) и специальную (обработка солонцовых почв, плантаж и т. п.).

Виды обработки почвы, выполняемые последовательно, образуют систему. Различают системы обработки почвы под яровые и озимые с.-х. культуры. Своя система обработки почвы сложилась для орошаемых и вновь осваиваемых земель, а также для лугов и пастбищ, для земель, подверженных водной и ветровой эрозии, солонцовых и торфяных почв.

Комплексы почвообрабатывающих машин для выполнения систем обработки почвы включают лемшные плуги, дисковые орудия, ротационные машины, культиваторы, бороны, катки, рыхлители и другие машины и орудия.

Современные технологии возделывания с.-х. культур, основанные на многократных проходах тяжелых машинно-тракторных агрегатов, пришли в противоречие с естественными природоохранными процессами: наблюдаются все большее распыление верхнего и уплотнение нижнего слоев почвы. Вследствие чего расширяются зоны ветровой и водной эрозии, снижаются эффективность вносимых удобрений и урожайность с.-х. культур. Эти негативные явления обуславливают интенсивный поиск новых технологий возделывания с.-х. культур, направленных на оптимизацию системы машина–почва–растения. К ним относятся почвозащитная, минимальная, безгербицидная, нулевая, гребневая и др. Новые технологии направлены на предотвращение эрозии почвы, на сохранение и повышение ее плодородия. Одновременно решается проблема сокращения энергозатрат.

Для реализации новых технологий предназначены новые почвообрабатывающие машины: чизельные плуги и культиваторы, а также комбинированные машины.

*Механический состав и каменность почвы.* Физико-механические свойства и плодородие почвы в значительной степени зависят от размеров и количества твердых частиц, входящих в ее состав. В зависимости от размеров твердые частицы подразделяют на каменные включения (частицы больше 1 мм) и мелкозем (частицы меньше 1 мм) [3].

Для классификации почв по механическому составу твердые частицы мелкозема условно разделяют на две размерные фракции: физический песок (частицы диаметром более 0,01 мм) и физическую глину (частицы диаметром менее 0,01 мм).

В основу классификации почв по механическому составу положено соотношение физических песка и глины (табл. 2.1).

Таблица 2.1

*Соотношение физических песка и глины в различных почвах, %*

Тип почвы по механическому составу	Глина	Песок
Глинистая	Более 50	Менее 50
Суглинок	50–20	50–80
Супесчаная	20–10	80–90
Песчаная	Менее 10	Более 90

Почвы с высоким содержанием глинистых частиц при обработке требуют больших энергетических затрат, поэтому их называют тяжелыми. Почвы с высоким содержанием песчаных частиц относятся к легким. Лучшими по механическому составу считаются суглинистые и супесчаные почвы с содержанием илтистых частиц (частицы размером менее 0,001 мм) от 10 до 40 %.

Каменные включения различают в зависимости от диаметра камней (табл. 2.2), а почвы – по степени содержания камней в почве (табл. 2.3).

Таблица 2.2

*Классификация каменных включений в зависимости от их диаметра*

Вид каменного включения	Диаметр включения, мм
Крупный песок	1–3
Хрящ:	
мелкий	3–5
крупный	5–10
Щебень:	
мелкий	10–30
средний	30–50
крупный	50–100
Камни	100 и более

Таблица 2.3

*Классификация почв по степени содержания в них камней*

Тип почвы	Содержание камней, %
Некаменистая	0,5
Слабокаменистая	0,5–5,0
Среднекаменистая	5–10
Сильнокаменистая	Более 10

*Структура и сложение почвы.* Пахотный слой почвы может находиться в структурном и бесструктурном состояниях. При структурном состоянии твердые частицы соединяются в водопрочные агрегаты (комочки) различного размера: микроагрегаты (частицы меньше 0,25 мм) и макроагрегаты (частицы больше 0,25 мм). В бесструктурной почве отсутствуют водопрочные агрегаты, а отдельные твердые частицы располагаются сплошной массой.

Механическая обработка почвы, проводимая в оптимальные сроки с соблюдением технологии, обеспечивает высокий структурообразующий эффект. Однако частые обработки, особенно если они выполняются при пониженной или повышенной влажности, а также уплотнение почвы движителями тракторов и мобильных с.-х. машин приводят к распылению и обесструктуриванию почвы.

Структурной считается почва, содержащая более 55 % водопрочных агрегатов размером 0,25–10,0 мм, что обеспечивает высокое плодородие и меньшее сопротивление почвы при ее обработке.



Оптимальные значения влажности почв для обработки

Тип почвы	Влажность, %
Дерново-подзолистый суглинок	15–22
Чернозем	17–30
Солонцовая	20
Темно-каштановая	19
Подзолистая песчаная	12

Большое значение в создании благоприятных условий роста с.-х. растений имеет не только структура почвы, но и ее сложение, то есть определенное расположение почвенных агрегатов в пахотном слое. Характеристикой сложения почвы может служить ее плотность и общая пористость. Например, при посеве зерновых культур семена должны укладываться на уплотненное ложе и прикрываться рыхлым слоем почвы.

Плотность почвы  $\rho$  – это отношение массы  $m$  сухой почвы к объему  $V$  пробы, взятой без нарушения ее естественного сложения ( $\text{кг/м}^3$ ,  $\text{г/м}^3$ ):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Плотность зависит от механического состава структуры почвы и содержания органического вещества (гумуса). Большое влияние на плотность оказывает обработка почвы и уплотнение ее опорными поверхностями машин.

Оптимальная плотность пахотного горизонта для большинства с.-х. растений  $\rho = 1,0 + 1,2 \text{ г/см}^3$  [2].

Скважность или пористость – это суммарный объем всех пустот в почве, заполненных водой и воздухом. Общая скважность  $P_c$  равна отношению объема пустот  $V_{\text{п}}$  к единице объема почвы  $V$  (%):

$$P_c = \frac{V_{\text{п}}}{V} 100. \quad (2.2)$$

Скважность зависит от механического состава, структуры и степени уплотнения почвы. У суглинков и глин общая скважность составляет 50–60 %, у торфяных почв – 80–90 %, у песчаных – 40–45 %.

Влажность почвы характеризует содержание влаги в почве. При испытаниях машин определяют абсолютную влажность почвы, %:

$$W_{\text{а}} = \frac{m_{\text{в}} - m_{\text{с}}}{m_{\text{с}}} 100, \quad (2.3)$$

где  $m_{\text{в}}$  и  $m_{\text{с}}$  – масса соответственно влажной и сухой почвы.

Содержание влаги в почве существенным образом сказывается на ее механических и технологических свойствах, а также на расходе энергии при обработке почвы и качестве работы. Оптимальные значения влажности для обработки почв приведены в табл. 2.4.

Липкость почвы – свойство влажной почвы прилипать к другим телам. Она проявляется двояко: при отрыве от почвы соприкасающихся с ней поверхностей и при скольжении почвы по рабочим органам почвообрабатывающих машин.

Липкость количественно характеризуется величиной усилия (Па), требуемого для отрыва от почвы стальной пластины. Наиболее эффективным способом устранения залипания является замена стальных отвалов плугов пластмассовыми (из фторопласта или полиэтилена).

*Механические характеристики почвы.* Трение почвы внешнее или трение скольжения возникают при перемещении тел по поверхности почвы. Сила трения  $T$  пропорциональна нормальному давлению  $N$ :

$$T = fN = N \text{ tg } \varphi, \quad (2.4)$$

где  $f$  и  $\varphi$  – соответственно, коэффициент и угол трения.

*Коэффициент трения* зависит от механического состава, плотности и влажности почвы, шероховатости рабочей поверхности материала и других факторов. В расчетах, когда не указывается тип почвы, принимают  $f = 0,5$  ( $\varphi = 26^\circ 30'$ ). Значения коэффициента  $f$  и угла трения  $\varphi$ , полученные при давлении 20–100 Па и скорости скольжения почвы примерно 0,4 м/с по шлифованной стальной поверхности, для некоторых типов почв даны в табл. 2.5 [2].

Таблица 2.5

Коэффициент  $f$  и угол трения  $\varphi$  почвы о сталь

Тип почвы по механическому составу	$f$	$\varphi$
Песчаная и супесчаная: рыхлая (сыпучая)	0,25–0,35	14°–19°30'
	связная	0,50–0,70
Легко- и среднесуглинистая	0,35–0,50	19°30'–26°30'
Тяжелая суглинистая и глинистая	0,40–0,90	22°–42°

Твердость почвы – способность почвы сопротивляться вдавливанию любого деформатора – одна из ее важных механических характеристик. Твердость почвы определяют твердомерами (неправильно – плотномеры). Твердомеры измеряют силу сопротивления почвы  $p$  вертикальному внедрению в нее наконечника прибора различной формы (конуса, шара, цилиндра). Наибольшее распространение получили твердомеры конструкции Горячкина и Высоцкого.

Твердость (МПа)

$$p = h \frac{C_{\text{п}}}{S}, \quad (2.5)$$

где  $h$  – средняя ордината диаграммы твердости, м;

$C_{\text{п}}$  – жесткость пружины, Н/м;

$S$  – площадь основания наконечника, м<sup>2</sup>.

При внедрении наконечника твердомера в почву на ленте пишущего устройства фиксируется диаграмма  $P = f(h)$ , на которой видны три характерных участка, соответствующих различным фазам деформации почвы (рис. 2.1):  $OA$  – упругая деформация почвы;  $AB$  – образование уплотненного ядра под наконечником;  $BC$  – пластическая деформация почвы (фаза течения);  $CD$  – подпахотный горизонт с повышенной твердостью (при погружении наконечника на глубину пахотного горизонта  $h_c$ ).

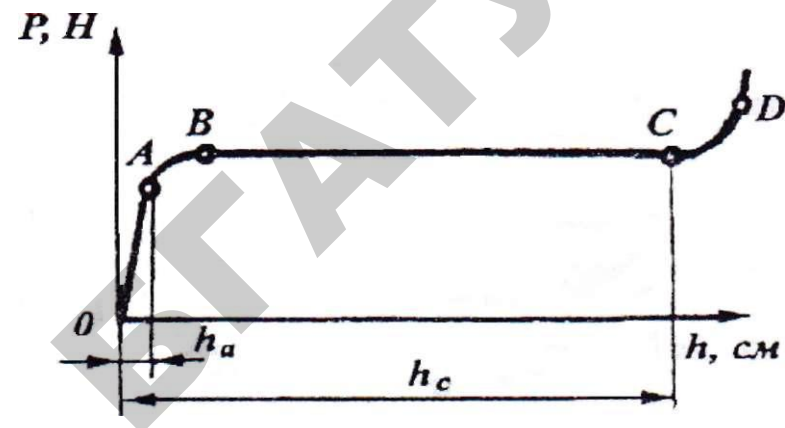


Рис. 2.1. Идеализированная диаграмма зависимости силы вдавливания  $P$  наконечника твердомера в почву от глубины погружения  $h$

По диаграммам твердости почвы можно определить коэффициент объемного смятия  $q$  (Н/м<sup>3</sup>) и предельное давление  $p_{\text{п}}$  (несущей способности почвы), соответствующего пределу текучести (точка  $B$ ):

$$q = \frac{P}{S} h_a; \quad p_{\text{п}} = \frac{P_{\text{т}}}{S}, \quad (2.6)$$

где  $h_a$  – глубина вдавливания наконечника, соответствующая пределу пропорциональности;

$P_{\text{т}}$  – сила вдавливания наконечника, соответствующая пределу текучести.

Сопротивление почвы различным деформациям мало изучено, что объясняется трудностью получения достоверных результатов опытов из-за разнообразия и изменчивости физико-механических свойств почвы: одни и те же почвы в различном состоянии (содержание влаги, степень задренелости, каменистости и т. д.) по-разному деформируются и разрушаются. При обработке почвы рабочими органами различных типов она испытывает деформации сжатия, растяжения, сдвига, изгиба, кручения и их комбинации.

Данные по сопротивлению глинистого чернозема различным деформациям при различной абсолютной влажности приведены в табл. 2.6 [2]. Как следует из таблицы, сопротивление почвы растяжению и сдвигу почти в 10–20 раз меньше, чем сжатию.

Таблица 2.6

Величина временного сопротивления растяжению, сжатию и сдвигу глинистого чернозема при различной абсолютной влажности  $W_a$

Растяжение		Сдвиг		Сжатие	
$W_a$	$\sigma_b$ , кПа	$W_a$	$T$ , кПа	$W_a$	$\sigma_{сж}$ , кПа
21–23	6,18	15–17	12,21	12–16	108
23–25	5,25	20–24	9,86	19–22	98
26–28	5,0	–	–	22–24	65

Классификация почв по трудности обработки. В качестве показателя трудности обработки почвы принимают удельное сопротивление почвы при вспашке (коэффициент)  $K$  (Па). Коэффициент  $K$  зависит от физико-механических свойств почвы, формы и размеров плужного корпуса и предплужника, наличия дисковых ножей и других факторов. По результатам динамометрирования плуга, коэффициент

$$K = \frac{P - f_n G}{a B}, \quad (2.7)$$

где  $P$  – общее тяговое сопротивление плуга;

$f_n$  – коэффициент «протаскивания» плуга в открытой борозде, составляет  $\frac{1}{2}$  коэффициента трения почвы по стали;

$G$  – вес плуга;

$a$  – глубина вспашки;

$B$  – ширина захвата плуга.

Для определения удельного сопротивления почвы без учета сил трения полевых досок о стенку борозды ВИСХОМом предложен специальный динамометрический плуг (рис. 2.2). Удельное сопротивление почвы при вспашке

$$K_0 = \frac{P_x}{a B}, \quad (2.8)$$

где  $P_x$  – горизонтальная составляющая тягового сопротивления динамометрического корпуса;

$B$  – ширина захвата корпуса плуга.

Для определения удельного сопротивления почвы при вспашке по результатам динамометрирования обычных плугов находят коэффициент:

$$K' = \frac{P}{a B}. \quad (2.9)$$

Коэффициенты  $K'$  и  $K_0$  связаны зависимостью

$$K_0 = \eta_{\text{п}} K', \quad (2.10)$$

где  $\eta_{\text{п}}$  – КПД плуга, в среднем  $\eta_{\text{п}} = 0,7$ .

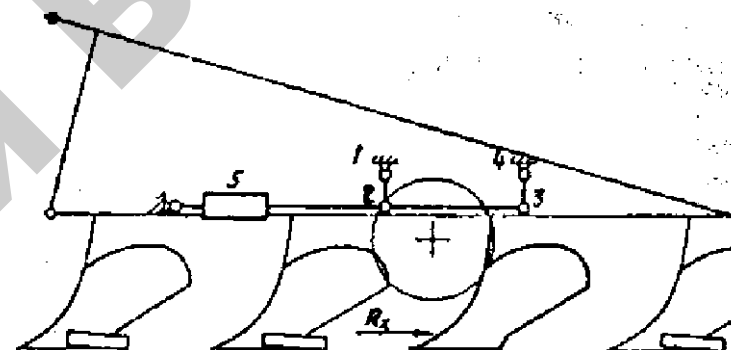


Рис. 2.2. Динамометрический плуг

для определения удельного сопротивления почвы при вспашке

В табл. 2.7 приведены коэффициенты удельного сопротивления  $K'$  в зависимости от механического состава и степени освоенности почвы [2].

Таблица 2.7

Коэффициент удельного сопротивления  $K'^{\cdot} 10$ , МПа

Тип почвы	Степень освоенности почвы	Тип почвы по механическому составу			
		глинистая	тяжело-суглинистая	средне-суглинистая	легко-суглинистая супесчаная
Дерново-подзолистая	Целина и залежь	0,994	0,717	0,507	0,408
	Травяной пласт	0,748	0,567	0,438	0,308
	Жнивье	0,669	0,478	0,354	0,259

Окончание таблицы 2.7

Тип почвы	Степень освоённости почвы	Тип почвы по механическому составу			
		глинистая	тяжелотуглинистая	среднетуглинистая	легкотуглинистая супесчаная
Черноземная	Целина и залежь	0,923	0,721	0,531	0,403
	Травяной пласт	0,884	0,582	0,456	0,323
	Жнивье	0,639	0,499	0,361	0,252
Каштановая	Целина и залежь	1,000	0,690	0,556	0,384
	Жнивье	0,696	0,480	0,370	0,217

В основу деления почв по трудности обработки положено удельное сопротивление при вспашке [2] (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Разделение почв по трудности обработки

Показатель трудности обработки	Почвы				
	легкие	средние	средне-тяжелые	тяжелые	очень тяжелые
Коэффициент удельного сопротивления при вспашке, кПа	До 30	30–50	50–70	70–120	120 и выше
Примерное содержание физической глины (частицы менее 0,01 мм), %	До 20	20–30	20–50	50–70	Свыше 70

*Абразивные свойства почвы.* Абразивный износ рабочих органов почвообрабатывающих машин зависит не только от свойств материала, из которого они изготовлены, но и от механического состава почвы, главным образом, от содержания физического песка [2].

По критерию абразивного износа почвы делятся на три группы:

1) с малой изнашивающей способностью, содержащие до 80 % физического песка (глинистые и суглинистые почвы);

2) супесчаные, со средним абразивным износом, содержащие от 80 до 95 % физического песка и незначительное количество каменных включений;

3) песчаные, содержащие от 95 до 100 % физического песка с большим количеством каменных включений и обладающие значительным абразивным износом.

Максимальный абразивный износ лемехов при вспашке 1 га на почвах первой группы составляет 2–30 г, на почвах второй – 30–100 г и на почвах третьей – 100–450 г.

## 2.2. Механика взаимодействия рабочих органов с почвой

*Классификация механических процессов.* С инженерных позиций, обработка почвы сопровождается ее деформацией, разрушением и перемещением. Для выполнения этих операций применяют рабочие органы различных типов, от характера взаимодействия которых с почвой зависит эффективность выполнения заданных показателей, предусмотренных агротребованиями. Различают следующие виды воздействия рабочих органов на почву.

Резание производят с отделением и без отделения стружки. Резание без отделения стружки (блокированное резание) происходит при вертикальном разрезании почвы дисковыми и черенковыми ножами плугов, а также стойками рыхлителей, шелевателей и др. Горизонтальное резание слоя почвы всегда сопровождается отделением стружки и осуществляется лемехами плугов, стрельчатыми лапами культиваторов, ножами фрез и пр.

Рыхление – изменение взаимного расположения почвенных слоев и приведение слежавшейся почвы в рыхлое состояние.

Крошение – дробление крупных комков и глыб на мелкие, осуществляется одновременно с резанием и рыхлением, перемещением и оборачиванием.

Уплотнение – процесс изменения расположения почвенных частиц и агрегатов относительно друг друга, сопровождается образованием мелких пор и восстановлением капилляров; выполняется катками различного рода.

Перемещение производят для оборота пласта при вспашке, для образования борозд (поливных, посадочных, маркерных), гребней и гряд, для выравнивания поверхности поля планировщиком, шлейф-бороной и т. д.

Общие закономерности взаимодействия клина с почвой. Основоположником земледельческой механики В. П. Горячкиным [4] установлено, что теория взаимодействия рабочих органов с почвой должна основываться на теории клина, теории разрушения материалов и на их физико-механических свойствах. Следует отметить, что до настоящего времени отсутствует научно обоснованная теория деформации почвы с учетом ее физико-механических свойств. Трудности создания теории прочности почвы связаны с многообразием и непостоянством ее физико-механических свойств. Одни и те же типы почв в зависимости от влажности и предшествующей культуры могут проявлять свойства хрупкого или пластичного тела.

Все типы рабочих органов почвообрабатывающих машин являются разновидностями клина. По геометрической форме рабочей поверхности клинья подразделяются на плоские и криволинейные, симметричные (лапа) и односторонние (лемех); по способу их установки к направлению движения – прямые (лобовое резание) и косые (скользящее резание).

При исследовании процессов взаимодействия рабочих органов с почвой (рис. 2.3) все многообразие ее типов сводят к двум основным моделям: дискретной и сплошной средам. Свойства дискретных сред, состоящих из отдельных частиц, связанных силами сцепления, изучает статистическая механика, опираясь на законы теории вероятностей и математической статистики. Это направление не получило достаточного развития в механике почв.

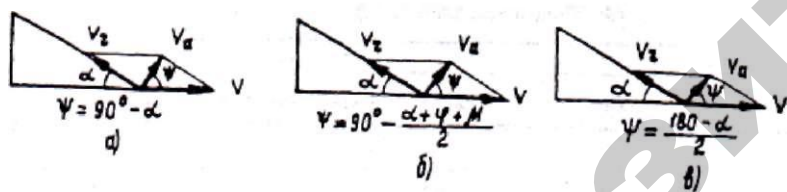


Рис.2.3. Взаимодействие клина с различной почвой и направление абсолютной скорости движения пласта:

*a* – сухая почва; *б* – среднеувлажненная почва; *в* – задернелая почва

Большинство исследователей принимают для почвы модель сплошной среды, что позволяет рассматривать напряжения и деформации бесконечно малых объемов, переходя от них к напря-

женно-деформированному состоянию всего пласта с использованием методов математического анализа.

В теории разрушения почвы наиболее важный вопрос – установление зависимости напряжения от деформации. Поскольку почва – полидисперсная, гетерогенная и анизотропная среда, состоящая из твердой, жидкой и газообразной фаз, то зависимость напряжения от деформации имеет нелинейный характер. Поэтому почву рассматривают как упругопластическое или упруговязкопластическое тело.

В общем виде процесс первичной деформации и разрушения почвы клином протекает следующим образом. Клин, внедряясь в почву, своей рабочей поверхностью производит сжатие пласта, которое продолжается до тех пор, пока напряжения в пласте не достигнут предельного значения, необходимого для образования поверхностей отрыва или сдвига.

Направление абсолютной скорости  $V_a$  движения пласта определяется видом деформации и геометрией клина. В момент уплотнения сухой почвы ее частицы перемещаются перпендикулярно к передней грани клина под углом  $\psi = \pi/2 - \alpha$  (рис. 2.3а). При обработке связных среднеувлажненных почв абсолютная скорость частиц направлена под углом  $\psi = \pi/2 - (\alpha + \varphi + \mu)/2$  (рис.2.3б). При обработке связных задернелых почв пласт отрезается сплошной лентой. В этом случае абсолютная скорость стружки имеет направление, совпадающее с биссектрисой угла, образованного передней гранью клина и дном борозды,  $\psi = \pi/2 - \alpha/2$  (рис. 2.3в):

$$V_a = 2 V \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2.11)$$

где  $V$  – поступательная скорость клина.

Твердая сухая почва скалывается глыбами неправильной формы под неопределенным переменным углом. Сыпучая несвязанная почва под действием клина сгруживается, образуя призму волочения. В приведенных схемах В. П. Горячкин по существу предсказал случайный характер вида деформации почвы и зависимость ее от свойств почвы и геометрии клина.

Взаимосвязь между разрушением твердых тел и их напряженно-деформированным состоянием устанавливается различными теориями прочности. Применительно к почвогрунтам наибольшее

распространение получила теория разрушения Кулона–Мора [4]. По этой теории, разрушение наступает, когда касательное напряжение  $\tau$  в плоскостях сдвига достигает предельного значения, которое, в свою очередь, зависит от нормальных напряжений  $\sigma$  в плоскости сдвига:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \mu, \quad (2.12)$$

где  $\mu$  – угол наклона прямой  $\tau = f(\sigma)$  к оси абсцисс, называемой углом внутреннего трения среды;

$c$  – составляющая сопротивления сдвига, не зависящая от нормальных напряжений и называемая сцеплением почвогрунтов.

При деформации пласта шириной  $b$  и толщиной  $a$  он разрушается сдвигом вдоль плоскости  $AB$ , наклоненной к горизонту под углом  $\psi$  (рис. 2.4).

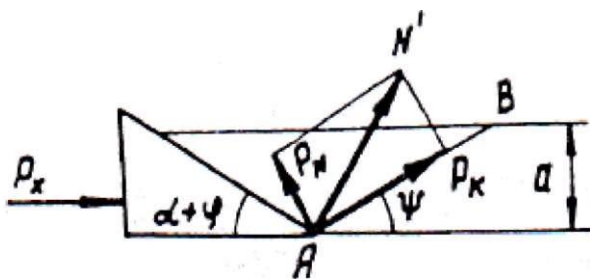


Рис. 2.4. Схема сил, действующих на пласт в момент разрушения сдвигом

Максимальное значение силы  $P_k$  имеет место при угле  $\psi = \pi/2 - (\alpha + \phi + \mu)/2$ . Тогда тяговое сопротивление клина

$$P_k = \frac{N' \sin(\alpha + 2\phi)}{\cos^2 \phi} = \tau_{\max} a b \frac{\cos \mu \sin(\alpha + 2\phi)}{\cos \phi \cos^2 \left( \frac{\alpha + \phi + \mu}{2} \right)}. \quad (2.13)$$

Уравнение (2.13) получено для условий разрушения почвы сдвигом. Реально на плотной сухой почве под воздействием клина может наблюдаться и стружка отрыва. Для решения вопроса о характере разрушения почвенной стружки Ю. Ф. Новиковым определена сила  $N'$  из условия разрушения за счет нормальных напряжений, равномерно распределенных по плоскости  $AB$ :

$$N' = \frac{a b \sigma_{\text{пр}} \cos \phi}{1 - \sin(\alpha + \phi)}, \quad (2.14)$$

где  $\sigma_{\text{пр}}$  – предельное сопротивление почвы отрыву.

Построением функции  $\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\text{пр}}} = \frac{1 - \sin(\alpha + \phi) \cos \phi}{\cos^2 \left( \frac{\alpha + \phi + \mu}{2} \right)}$ , установлено, что

при небольших значениях  $\alpha + \phi = 30-50^\circ$  почва разрушается за счет отрыва, а при  $\alpha + \phi > 50^\circ$  – за счет сдвига. Однако возможны случаи, когда сдвиг и отрыв равновероятны, например, при влажности почвы 17 % и  $\alpha + \phi = 53-72^\circ$ .

Сила  $P$  сдвига элемента стружки по уравнению (2.13) является одним из компонентов общей силы резания и составляет 16,5–36,0 % (А. Н. Зеленин). Основная часть общей силы резания затрачивается на вдавливание режущей кромки клинообразного рабочего органа, то есть

$$P_{\text{общ}} = \tau_{\max} a b \frac{\cos \mu \sin(\alpha + 2\phi)}{\cos \phi \cos^2 \left( \frac{\alpha + \phi + \mu}{2} \right)} + \sigma_{\text{сж}} b \delta, \quad (2.15)$$

где  $\sigma_{\text{сж}}$  – напряжение сжатия почвы при вдавливании в нее штампа в виде режущей кромки рабочего органа;

$\delta$  – толщина режущей кромки.

В. В. Кацыгиным [5] установлена функциональная зависимость между напряжением сжатия  $\sigma_{\text{сж}}$  и деформацией сжатия  $h$ , которая подчиняется закону гиперболического тангенса:

$$\sigma_{\text{сж}} = p_0 \operatorname{th} \frac{q}{p_0} h, \quad (2.16)$$

где  $p_0$  – предел несущей способности почвы, Па;

$q$  – коэффициент объемного сжатия почвы, Н/см<sup>3</sup>.

Значения коэффициентов  $p_0$  и  $q$  для почв и фонов различных типов приведены в табл. 2.9 [5].

Таблица 2.9

Коэффициенты  $p_0$  и  $q$ 

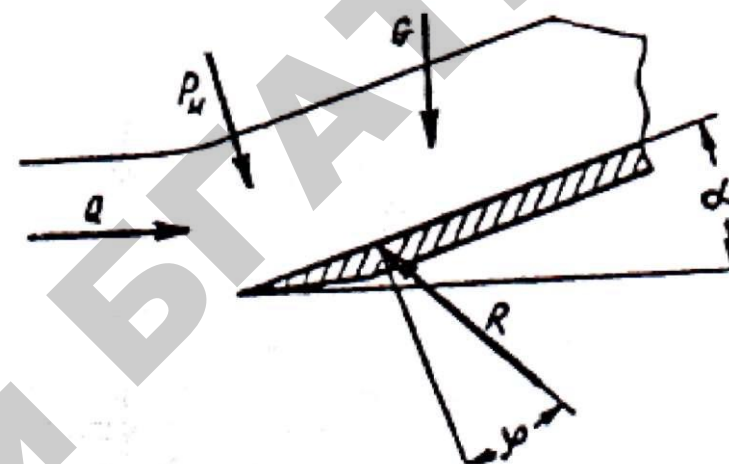
Тип почвы по механическому составу	Фон	Влажность $W$ , %	Несущая способность $p_0$ , МПа	Коэффициент объемного смятия $q$ , Н/см <sup>3</sup>
Супесная	Целина	14–16	1,29–1,43	83–100
	Стерня зерновых	11–13	0,81–0,90	68–82
	Слежавшаяся пахота	12–14	0,45–0,60	41–65
Суглинистая: легкая	Целина	13–14	2,42–2,58	136–166
	Стерня зерновых	12–13	1,43–2,09	109–174
	Слежавшаяся пахота	12–13	0,96–1,16	73–97
средняя	Целина	10–11	2,74–3,10	111–199
	Стерня зерновых	12–14	1,68–2,27	107–174
	Слежавшаяся пахота	16–17	0,68–1,09	61–108
тяжелая	Целина	19–20	2,49–2,85	116–182
	Стерня зерновых	13–16	1,88–2,47	98–174
Глинистая	Целина	12–15	3,23–4,62	127–207
	Стерня зерновых	10–13	1,29–1,91	83–147

Процесс разрушения почвы на основе теории Кулона-Мора не учитывает силы динамического давления  $P_{и}$  пласта почвы на рабочую поверхность клина, обусловленного инерцией пласта, то есть эта теория статическая, она не учитывает скорость деформирования среды. Используя теорему изменения количества движения, силу динамического давления, найдем из уравнения [2]:

$$P_{и} = 2 a b \rho V^2 \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (2.17)$$

Сила  $P_{и}$  уравновешивается реакцией  $R$ , отклоненной на угол  $\varphi$  от нормали к поверхности клина, и подпором  $Q$  недеформированной почвы, находящейся впереди клина (рис. 2.5). Для определения  $Q$  может быть использована зависимость:

$$Q = a b \rho V^2 \left[ \sin \alpha \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right]. \quad (2.18)$$

Рис. 2.5. Схема к определению силы  $Q$ 

Сила  $Q$  способствует увеличению сжатия почвы впереди клина, поэтому при прочих равных условиях опасность возникновения сгуживания почвы впереди клина возрастает с ростом скорости его поступательного движения. При малой связности почвы и большой длине рабочей поверхности клина подпор пласта может оказаться недостаточным для преодоления сопротивлений, препятствующих движению пласта по поверхности клина (составляющей силы тяжести пласта и силы трения на рабочей поверхности клина). Из условия  $Q_{\max} \leq ab\sigma_b$ , (где  $\sigma_b$  – временное сопротивление почвы сжатию) максимальная длина клина, при которой еще не возникает сгуживание почвы,

$$l \leq \operatorname{ctg}(\alpha + \varphi) \left\{ \frac{\sigma_b}{\rho g} - 2 \frac{2}{g} \left[ \sin \alpha \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right] \right\}. \quad (2.19)$$

Общее тяговое сопротивление двугранного клина

$$P_x = R_{sx} + R_{gx} + R_{qx} + R_{px}, \quad (2.20)$$

где  $R_{sx} = 0,5qh^2_3 - b(\operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \varepsilon_3 + 1)$  – горизонтальная составляющая силы давления почвы на затылочную фаску лезвия клина (рис. 2.6);

$R_{GX}$  – горизонтальная составляющая равнодействующей элементарных нормальных и касательных сил сопротивления почвы на рабочей поверхности клина (см. уравнение (2.13));

$R_{QX}$  – горизонтальная составляющая динамического давления пласта почвы;

$R_{FX}$  – горизонтальная составляющая сил трения на рабочей поверхности клина:

$$R_{FX} = a b h \rho g \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha}, \quad (2.21)$$

где  $h$  – высота клина.

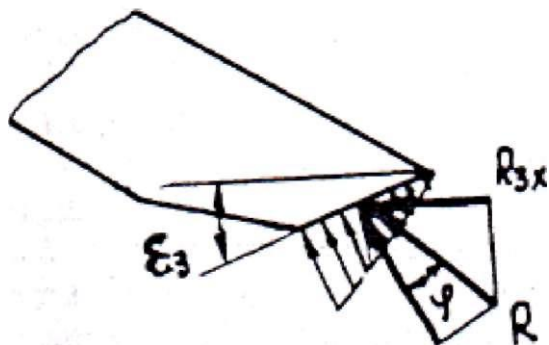


Рис.2.6. Схема к определению давления почвы на затылочную часть лезвия

В общем случае сопротивление разрушению пласта зависит от размеров отрезаемой стружки ( $a$ ,  $b$ ), геометрии рабочего органа и скорости  $V$  обработки почвы.

Аналогичным образом определяются составляющие тягового сопротивления для трехгранного клина [2].

Влияние поступательной скорости клина на напряженно-деформированное состояние почвы. Представление почвы в виде фазовых моделей, в которых поры между структурными частицами (твердым скелетом) заполнены водой и воздухом, объясняет наличие у нее упругих, пластичных и вязких свойств. Реальные тела при различном сочетании всех трех указанных свойств представляют реологическими моделями, а их поведение – реологическими уравнениями, содержащими напряжения, деформации и их производные по времени:

$$\Phi \left( \sigma, \varepsilon, \frac{d\sigma}{dt}, \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (2.22)$$

Для описания различных видов напряженно-деформированных состояний тел применяют большое число реологических моделей. Поведение трехфазного тела может быть описано реологической моделью Фойгта:

$$\sigma = \varepsilon E + \eta_v \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (2.23)$$

где  $\varepsilon$  – деформация;

$E$  – модуль упругости;

$\eta_v$  – коэффициент вязкости.

Решение последнего уравнения при  $\sigma = \text{const} = \sigma_0$  дает

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \left( \varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E} \right) \exp \left( - \frac{E}{\eta_v} t \right), \quad (2.24)$$

При условии  $\varepsilon_0 = 0$ , имеем скорость деформации:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_v} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{E}{\eta_v} t \right) \right]. \quad (2.25)$$

Из этого выражения следует, что при приложении к телу мгновенной нагрузки его деформация будет значительно меньше, чем при продолжительном нагружении. Причем в этом случае увеличивается доля упругой деформации. Поэтому разрушение почвы под действием мгновенных (ударных) нагрузок происходит при малых деформациях и имеет хрупкий характер.

Реологическую модель двухфазного тела (почва, перенасыщенная водой) можно составить из последовательного соединения упругого тела (модель Гука) и вязкого – модель Ньютона. Деформация такого тела равна сумме удлинений упругого  $\varepsilon_v$  и вязкого  $\varepsilon_n$  тел:

$$\varepsilon = \varepsilon_v + \varepsilon_n = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\eta_k}, \quad (2.26)$$



а скорость деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta_b} \quad (2.27)$$

или

$$E \varepsilon = \dot{\sigma} + \frac{E}{\eta_b} \sigma. \quad (2.28)$$

При постоянной скорости деформации

$$\sigma = \eta_b \dot{\varepsilon} + (\sigma_0 - \eta_b \dot{\varepsilon}) \exp\left(-\frac{E}{\eta_b} t\right), \quad (2.29)$$

обозначив время релаксации  $\eta_b/E = T$ , получим

$$\sigma = \dot{\varepsilon} E T + (\sigma_0 - \dot{\varepsilon} E T) \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (2.30)$$

Из уравнения (2.30) следует, что с увеличением скорости нагружения растет напряжение, а с уменьшением времени релаксации слабее проявляются свойства твердого тела. Кроме того, для любого тела существует определенная скорость деформации  $\dot{\varepsilon}_{пр}$ , при которой внешние силы уравновешиваются внутренним сопротивлением. При превышении скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_{пр}$  внутренние силы станут больше внешних и разрушение примет вид хрупкого с соответствующим ростом энергозатрат.

В. В. Кацыгин [5] установил, что предельная скорость распространения напряжений для почв средней плотности (супесчаная, суглинистая) равна 4–12 м/с. Рабочие скорости «пассивных рабочих органов», находящиеся в пределах 1–3 м/с, не превышают предельно допустимых, но у «активных» рабочих органов ротационных почвообрабатывающих машин (фрез, ротационных плугов) скорости резания могут быть соизмеримы с предельными скоростями деформации почвы. Это значит, что если  $\varepsilon_{пр}$  больше скорости рабочего органа, то между фронтом волны деформации и передней кромкой рабочего органа образуется разрушенная зона, и он в этом случае движется в почве, у которой нарушены внутренние связи между частицами. Если скорость  $\varepsilon_{пр}$  равна или меньше скорости рабочего органа, то он движется в почве с ненарушенными связями, преодолевая значительно большее сопротивление, чем в первом случае.

Установленные закономерности позволяют сделать ряд практических выводов и рекомендаций. Так, сухие твердые почвы следует разрушать ударными нагрузками. Переувлажненные пластичные почвы начинают деформироваться при малых силах и статических нагрузках, но обладают высокой ударной прочностью. При обработке монолитных твердых почв активными рабочими органами для снижения энергоёмкости необходимо изменить состояние почвы – применить предварительное ее рыхление пассивными рабочими органами.

### 2.3. Влияние физико-механических свойств почвы на изнашивание деталей

*Давление почвы на рабочие органы.* Определение удельных давлений, возникающих при взаимодействии рабочих органов с.-х. машин с обрабатываемой средой, связано, прежде всего, с изучением процесса изнашивания и разработкой основ расчета их на долговечность. Кроме того, характер распределения давлений на детали рабочих органов позволяет судить о конструктивном их совершенстве, что особенно важно при создании новых машин. Величина нормального давления почвы на рабочие органы с.-х. машин определяется методом электротензометрических измерений с помощью промежуточного тензометрического элемента.

Практика показывает, что характер изнашивания деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин зависит от почвенных условий. Вследствие разной нагрузки и пути относительного перемещения частиц рабочая поверхность детали изнашивается неравномерно. Так, при вспашке песчаных и супесчаных почв насквозь протирается грудь отвалов тракторных плугов и изнашивается нижняя часть крыла отвала. Диски борон на глинистых почвах сильно затупляются, на песчаных почвах они изнашиваются и по толщине. Казалось бы, что местам наибольшего износа должно соответствовать и наибольшее давление, однако существенным фактором является также скорость скольжения частиц в этих зонах.

Это предположение вполне согласуется с основными закономерностями упругопластических деформаций твердых тел и общей теорией клина. Действительно, если линейная деформация пропорциональна нагрузке, а скальвание клином отдельных элементов пласта происходит при напряжениях, превышающих предел

прочности почвы, то максимальное давление будет в точках, несколько удаленных от режущей кромки клина. Для твердых почв это удаление будет меньшим, для пластичных – большим.

Давление грунта на лемехи и отвал тракторного плуга определялись на глинистой, суглинистой, песчаной и торфяной почвах. На рис. 2.7 представлены эпюры удельных давлений для глинистой почвы и минерализованного торфяника. Установлено, что на всех почвах наибольшее давление испытывает носок лемеха, давление грунта у пятки на 40–50 % меньше.

Объясняется это тем, что пятка лемеха находится у открытой стенки борозды, где усилие деформации почвы значительно меньше. На носке лемеха, кроме усилия деформации, возникают нагрузки, связанные с отрывом пласта как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Действительно, при образовании первой борозды, когда отсутствует открытая стенка, давление как на носке, так и на пятке лемеха первого корпуса одинаково. Более всего грунт воздействует на крыло отвала у нижней части бороздного обреза.

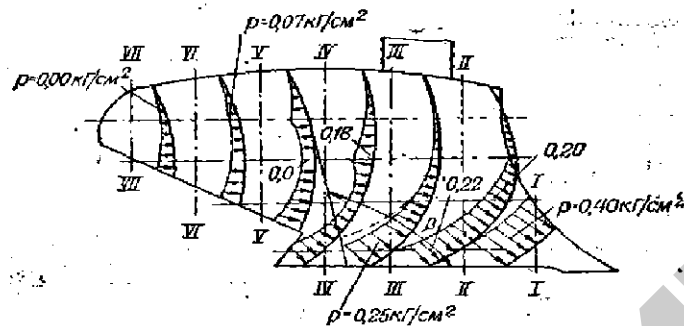


Рис. 2.7. Распределение давлений по вертикальным образующим рабочей поверхности плуга на минеральной почве

Рассматривая давление грунта по вертикальным образующим, можно заключить, что по мере увеличения подъема пласта давление уменьшается. Однако на связных задренных почвах при глубине вспашки 20–25 см давление на среднюю часть отвала (сечение IV–IV и V–V) несколько увеличивается, здесь происходит крошение пласта. Угол  $\beta$  в этих точках больше  $90^\circ$ . На минеральной почве увеличения давлений у верхней части отвала не наблюдалось. Не повышается давление также у нижней части отвала на высоте 10–12 см. Это объясняется тем, что угол между горизонтальной образующей отвала на этой высоте и стенкой борозды имеет минимальное значение.

На глинистой, а также на твердой суглинистой почве, где пласт движется в виде отдельных скалывающихся кусков, давление на носок лемеха (см. рис. 2.7, сечение I–I), среднего его часть (сечение III–III) имеет максимальное значение, в то время как на пятку (сечение IV–IV) и вблизи носка давление значительно меньше. Очевидно, линии скалывания совпадают или находятся вблизи точек, у которых давление наименьшее. Зависимость удельного давления от глубины пахоты может использоваться в общей формуле для определения долговечности лемеха и отвала плуга, а также лемехов предплужника.

Характерной особенностью осциллограмм, полученных при замере давлений на песчаной почве, является очень быстрое возникновение и исчезновение пиковых нагрузок (30–40 колебаний в секунду). Это объясняется тем, что отдельные крупные частицы песчинок передают сравнительно большие нагрузки.

Сравнивая относительную величину износа в отдельных точках лемеха и отвала с давлением, можно заметить отсутствие прямой пропорциональности между ними. Так, в носовой части давление в 1,5, а износы в 4–5 раз больше, чем на пятке лемеха. На отвале эта разница еще более заметна. Это объясняется тем, что в точках максимального давления и сравнительно небольшого износа скорость скольжения почвы невелика. Здесь происходит деформационное скольжение, при котором скорость относительного перемещения частиц почвы гораздо меньше, чем при кинематическом.

Таким образом, нельзя судить о давлении почвы на детали рабочих органов почвообрабатывающих машин по величине износа без учета пути трения. Несовпадение мест наибольшего износа с максимальным давлением вызвано разностью в пути трения абразивных частиц.

Опыты по определению давления на рабочую поверхность диска дисковой бороны проводились на стерне из-под кукурузы. Увеличение давления во всех замеряемых точках находится в прямой зависимости от угла установки диска, а также в степенной зависимости от глубины дискования при неизменном угле:

$$P = c a^n; \quad (2.31)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств почвы и углов установки диска;

$n$  – показатель степени, равный 1,32.

Давление на рабочую поверхность лап культиваторов определялось на песчаной и глинистой почвах. Установлено, что давление на правое и левое лезвия в симметрично расположенных точках одинаково.

Давление на носок и пятку лезвия при обработке глинистой почвы примерно на 8–12 % больше, чем на среднюю часть. Это объясняется характером деформаций верхнего слоя почвы при междурядной обработке стрельчатой лапой культиватора. У носка лапы происходит разделение подрезаемой стружки, а у пятки – отрыв ее от основной массы почвы в вертикальной плоскости.

Глинистая почва при высыхании образует прочную корку, для разрушения которой необходимо большое усилие. На песчаной почве разница в распределении давлений почти незаметна. С увеличением твердости почвы давление на рабочий орган возрастает прямо пропорционально.

*Влияние влажности почвы на изнашивание.* Интенсивность изнашивания деталей рабочих органов с.-х. машин зависит от физико-механических свойств почв – липкости, твердости, сопротивления сдвигу, разрыву, коэффициентов трения и влажности. Так, при пахоте супесчаных почв влажностью 2,8–4,0 % лемехи в основном изнашиваются по ширине, а влажностью 9,4–12,0 % – по толщине в носовой части. Вода оказывает существенное влияние как на состояние почвенных частиц, так и на свойство поверхностных слоев металла. Кроме того, адсорбция ее молекул в зоне контакта изменяет картину взаимодействия частиц почвы с металлом.

Экспериментальные данные показывают, что с изменением влажности интенсивность изнашивания деталей рабочих органов с.-х. машин для различных почв изменяется в широких пределах. При отсутствии влаги почвенные частицы непосредственно соприкасаются как с изнашиваемой поверхностью, так и между собой. В этом случае взаимосвязь между частицами незначительна и скорость относительного скольжения их невелика.

Для крупных песчаных частиц почвы при небольшой влажности интенсивность изнашивания, очевидно, уменьшается вследствие раздвигающего усилия адсорбционного слоя вокруг площадки контакта, и прочность абразивных частиц понижается, что способствует излому и крошению острых граней абразива. При влажности 6–12 % понижение твердости и прочности металла сказывается в большей степени, чем понижение прочности абразивных частиц.

В глинистых почвах влага играет роль смазки на поверхности трения. Если учесть, что изнашивание здесь представляет процесс, при котором разрушение и унос материала, образующего фрикционную связь, происходят вследствие многократного ее нарушения, то станет очевидным, что с увеличением влажности силы фрикционных связей

уменьшаются, следовательно, уменьшается унос мельчайших объемов металла с поверхности трения. Этим можно объяснить постепенно меняющийся характер кривых зависимости изнашивания от влажности с изменением их механического состава (рис. 2.8).

Если же учитывать путь трения  $L$  (с изменением влажности), то характер кривых изнашивания будет иметь совершенно иной вид (рис. 2.9). В этом случае интенсивность изнашивания будет функцией двух переменных величин: влажности и меняющейся при этом скорости относительного перемещения частиц почвы.

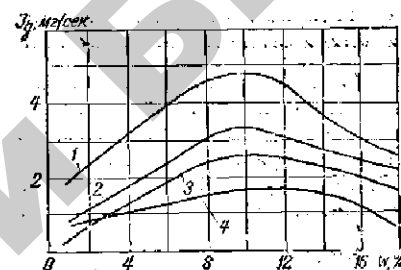


Рис. 2.8. Зависимость интенсивности изнашивания от влажности почв при  $Jg = f(W)$ :  
1 – песчаная, 2 – супесчаная, 3 – суглинок легкий, 4 – глинистая

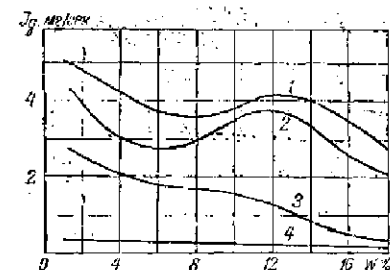


Рис. 2.9. Зависимость интенсивности изнашивания от влажности почв при  $Jg = f(W, L)$ :  
1 – песчаная, 2 – супесчаная, 3 – суглинок легкий, 4 – глинистая

Сравнивая ее с зависимостью  $Jg = f(W)$  на рис. 2.8, заключаем, что с изменением влажности изменяется скорость относительного перемещения частиц почвы на поверхности трения. С увеличением влаги увеличивается сцепление частиц почвы, что приводит к повышению скорости относительного скольжения и интенсивности изнашивания. Дальнейшее увеличение влаги уменьшает силы сцепления частиц вследствие уменьшения поверхностного натяжения и прекращения влияния коллоидов.

Таким образом, изнашивание образцов влажной абразивной массой существенно меняет процесс изнашивания, так как влага и растворенные в ней вещества представляют активную адсорбционную среду. Последняя в процессе изнашивания влияет на прочность как абразивных частиц, так и металла.

При контакте мелких почвенных частиц с металлом под действием молекулярных сил сцепления  $S_m$  имеющаяся свободная поверхно-

стная энергия адсорбирует молекулы воды (рис. 2.10). В узкий зазор по периметру площадки фактического контакта последние не могут попасть, потому что их размеры больше размеров зазора. Вокруг площадки контакта давление адсорбционного слоя создает раздвигающее усилие  $R$ .

Для весьма малых частиц оно может оказаться достаточным для нарушения непосредственного контакта. Все это вполне приемлемо и к деформируемой внешними силами большой частице твердого тела.

Известно, что в твердом теле при его деформации образуются клиновидной формы микрощели вследствие дефектов в кристаллической решетке и ряда других неоднородностей. Академик П. А. Ребиндер доказал [6], что развитие таких микрощелей под действием внешних деформирующих сил может быть ускорено адсорбцией из внешней среды. Давление адсорбционных слоев, проникающих в микрощели, расширяет их, содействуя внешним формирующим силам (рис. 2.11).

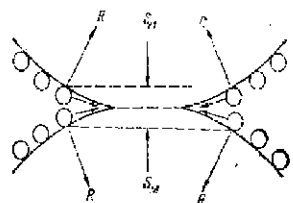


Рис. 2.10. Схема контакта почвенных частиц под действием молекулярных сил сцепления

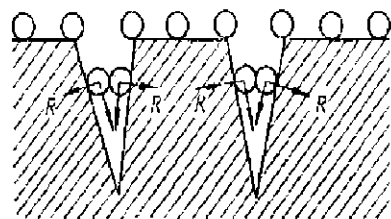


Рис. 2.11. Схема развития микротрещин по П. А. Ребиндеру

При отсутствии внешних сил микрощели стремятся сомкнуться. Однако этому препятствует адсорбционный слой. При периодическом деформировании и наличии адсорбционно-активной среды процесс разрушения поверхности твердого тела значительно ускоряется. Явление понижения прочности присуще как частицам абразива, так и изнашиваемому металлу. Наличие адсорбционной среды на песчаных частицах понижает их режущее действие, так как при взаимодействии с металлом острые углы и грани легко разрушаются, а образующаяся молекулярная пленка предохраняет их от непосредственного контакта с металлом.

Адсорбционно-активная среда на поверхности металла при многократном воздействии внешних сил облегчает процесс поверхностного

разрушения, следовательно, и интенсивность изнашивания при прочих постоянных условиях должна увеличиваться. Однако понижение абразивной способности почвенных частиц и ускорение процесса диспергирования изнашиваемого образца происходят одновременно. Конечный эффект этих изменений зависит от адсорбционной среды.

Расклинивающее действие адсорбционного слоя в микрощелях при многократном воздействии играет решающую роль в процессе поверхностного разрушения изнашиваемого тела. В почве всегда содержится небольшой процент кислот и солей (поваренная соль, хлористые соли кальция, магния, фосфаты и др.), которые, растворяясь в воде, значительно повышают активность адсорбционной среды и облегчают процесс диспергирования материала. Этим объясняется повышение интенсивности изнашивания (при влажности 10–12 %) песчаной и супесчаной почв.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М. : Машиностроение, 2002. Т. IV–16.
2. Синсоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977.
3. Бахтин П. У. Физико-механические и технологические свойства почв: справочник конструктора сельскохозяйственных машин. М. : Машиностроение, 1967. Т.1.
4. Горячкин В. П. Теория разрушения материалов. М. : Колос, 1968.
5. Кацыгин В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий. 1964. Т. 13 // Вопросы сельскохозяйственной механики.
6. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М. : Наука, 1979.

## РАЗДЕЛ 3

### ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

#### 3.1. Материалы и новые технические решения конструкций деталей

Анализ конструкционных материалов, используемых в последние 15 лет предприятиями Республики Беларусь и других государств СНГ, свидетельствует о применении недорогих марок сталей, а также об использовании традиционных методов термообработки – закалки и отпуска. Твердость изделий составляет 35–48 HRC, прочность не превышает 900–1200 МПа, ударная вязкость находится в пределах 0,2–0,6 МДж/м<sup>2</sup> (табл. 3.1).

Таблица 3.1

*Материалы, применяемые для изготовления  
рабочих органов почвообрабатывающих машин*

Марка стали	Вид термообработки	Массовая доля элементов, %						Механические свойства		
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Твердость, HRC	Прочность, σ <sub>в</sub> , МПа	Вязкость, МДж/м <sup>2</sup>
35	Закалка	0,36	0,22	0,65	0,04	0,035	0,25	39,5	735	0,29
50	лезвия ТВЧ	0,51	0,22	0,65	0,04	0,035	0,25	39,5	830	0,64
45	Закалка	0,46	0,22	0,65	0,04	0,035	0,25	45,5	750	0,60
40X	лезвия	0,40	0,22	0,65	0,035	0,035	0,95	45,5	1200	0,49
Л53	ТВЧ	0,52	0,35	1,45	0,04	0,035	–	48,5	800	0,60
65Г	или объемная термообработка	0,66	1,05	0,22	0,035	0,035	0,25	49,5	800	0,55
40Г2	Объемная	0,40	0,22	1,60	0,035	0,035	0,30	45,5	1040	0,29
60С2	термообработка	0,61	0,75	1,75	0,035	0,035	0,30	49,5	1100	0,23

Применяемые в настоящее время отечественными производителями стали марок 35; 45; 40X; Л53; 65Г; 55С2; 60С2 и др. не удовлетворяют требованиям изделий нового поколения из-за низкого уровня твердости и прочности. Такие изделия не могут полноценно конкурировать с изделиями ведущих западноевропейских фирм.

За рубежом детали рабочих органов преимущественно изготавливают из более прочных борсодержащих (с добавками молибдена, титана) мало- и среднесуглеродистых сталей (табл. 3.2). Аналогами их в СНГ являлись стали 30ГР, 40ГР, 30Г2Р и др. Применение таких сталей и специальных способов термической обработки позволило достичь повышенных эксплуатационных свойств. Детали упрочнялись до твердости 48–52 HRC, прочность превышала 1200 МПа.

В ходе исследований были изучены и проанализированы химический состав и структурное строение лемехов, долот и других почворезущих элементов зарубежного производства, поставляемых нашим сельхозпроизводителям. К числу таких изделий относятся лемехи (*Rabe*), лемехи-копачи (*Holmer*), лемехи и долота (*Vogel & Noot*), долото (*Kverneland*), долото (*Kuhn*), зубья культиваторов с активными рабочими органами (*Rabe*), долота (*Gregoire Besson*) и др.

В табл. 3.3 и 3.4 приведены результаты исследования химического состава и физико-механических свойств материалов деталей корпусов плугов на примерах изделий зарубежных и отечественных изготовителей. Из приведенных результатов исследований видно, что для обеспечения конкурентоспособности лемехов и долот в отечественном производстве следует применять стали пониженной прокаливаемости.

Химический состав сталей, применяемых зарубежными производителями для изготовления деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин

Наименование детали	Фирма, страна	Химический состав, %							Марка стали (отечественный аналог)
		C	Si	Mn	Cr	S	P	V	
1. Лемех долообразный	<i>Rabewerk</i> , Германия	0,39	0,24	1,36	0,13	0,026	0,018	0,0040	40ГР (ГОСТ 4543-71)
2. Лемех с накладным долотом	<i>Huard</i> , Франция	0,28	0,30	1,16	0,42	0,009	0,009	–	Типа 30ГР
3. Лемех с накладным долотом	То же	0,31	0,31	1,48	0,48	0,021	0,011	0,0060	Типа 30Г2Р
4. Лемех с накладным долотом	<i>Kverneland</i> , Норвегия	0,25	0,29	1,18	0,16	0,010	0,031	0,0008	Типа 30Г2Р
5. Лемех трапециевидный	<i>Morris</i> , Канада	0,90	0,29	0,76	0,12	0,035	–	–	Типа У9 с повышенным содержанием Mn

Окончание табл. 3.2

Наименование детали	Фирма, страна	Химический состав, %							Марка стали (отечественный аналог)
		C	Si	Mn	Cr	S	P	V	
6. Лемех долообразный	<i>BBC</i> , Германия	0,45	1,06	1,52	0,19	0,035	0,029	–	Типа 45Г2С
7. Лемех долообразный с наплавкой	<i>Raba</i> , Венгрия	0,30	0,30	1,46	0,05	0,020	0,013	–	30Г2 (ГОСТ 4543-71)
8. Долото	<i>Case</i> , США	0,44	0,24	1,46	0,14	0,023	0,012	0,041	45Г2 легированная В
9. Долото	<i>Paraplaw</i> , Англия	0,41	0,32	0,68	0,11	0,022	0,017	–	40 (ГОСТ 1050-88)

- Примечания: 1. Никель и медь присутствуют в качестве примеси в пределах 0,05–0,16 % и 0,03–0,20 % соответственно.  
 2. В отдельных образцах обнаружены следы молибдена (0,02–0,03 % в дет. 2, 5, 6).  
 3. Все борсодержащие стали содержат алюминий (0,028–0,08 %) и титан (0,012).

Химический состав и физико-механические свойства материалов деталей корпусов плугов

Детали ЛПЗ	Применение или марка материала	Массовая доля элемента, %														Твердость, НРС		Микроструктура		Прим.
		C	Mn	Si	V	P	Ti	Co/Nb	Al	B	Cr	Ni	Mo	Cu	S	поверх.	ср-ца.	поверхности	сердцевинны	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Отвал ЛПН 8.30.50-311	Отвал фирмы <i>Kverneland</i>	0,20	0,86	Следы	-	-	0,01	-	0,02	-	0,03	-	-	-	-	60...61	22	мартенсит, остаточный аустенит	перлит, феррит	Закупленные опытные образцы
	Лист В-ПО-0-8,0 ТУ 19903-74 65Г-ТВ1-М1-ТО-УО ТУ1577-93	0,62-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37		0,035					0,25	0,25		0,2	0,035	40...50		мартенсит		Серийно изготавливается
	Лист В-ПН-8,0х ГОСТ19903-74 20Г-ТВ1-М1-ТО-УО ТУ1577-93	0,17-0,24	0,70-1,00	0,17-0,37		0,035					0,30	0,30		0,30	0,035	57-65	более 20	мартенсит		Изготавливается
	Лист -8,0 60П11 ТУ 14-1-1926-76	0,57-0,65	0,20	0,10-0,30		0,035	0,1				0,30	0,30		0,20	0,04	50-60	30-40	мартенсит		Изготавливается
Дюло ЛПН 8.30.50-313	Дюло фирмы <i>Kverneland</i>	0,35	1,27	0,23	-	-	0,04	-	-	-	0,14	-	-	-	0,02	49-54	45-50	троостомартенсит		Закуплены опытные образцы

Продолжение табл. 3.3

		0,35	1,23	0,24	0,003	0,0159	0,043	0,004	0,031	0,0042	0,14	0,022	0,004	0,018	0,001-2	-	-	-		
		0,36	1,17	0,22	-	0,017	0,02	-	-	-	0,14	0,02	0,02	0,01	0,003	51-54		троостомартенсит крупнозернистого строения		
	Круг В-40 ГОСТ 2590-88 65Г-2П11-4А ГОСТ 14959-79	0,62-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37		0,035					0,25	0,25		0,2	0,035	40-50		мартенсит		Серийно изготавливается
	60П11 ТУ 14-1-1926-76	0,57-0,65	0,20	0,10-0,30		0,035	0,1				0,30	0,30		0,20	0,04	50-60	30-40	мартенсит		Изготовлен
	Круг В-40-В ГОСТ 2590-88 35Х1СА ГОСТ 4543-71	0,32-0,39	0,80-1,10	1,10-1,40		0,025					1,10-1,40	0,30		0,30	0,025	45-55	40-50	мартенсит		Изготовлен
	Круг В-40-В ГОСТ 2590-88 45Г ГОСТ 4543-71	0,42-0,50	0,70-1,00	0,17-0,37		0,035					0,30	0,30		0,30	0,035	45-55	40-50	мартенсит		Изготовлен
	20Х1П	0,16-0,23	0,60-0,90	0,17-0,37		0,035	0,06			0,001-0,005	0,70-1,10	0,80-1,10		0,30	0,035	45-55	40-50	мартенсит		Изготовлен
	Круг С1343М143	0,40-0,46	1,30-1,50	0,15-0,35		0,035					0,40-0,60				0,035			-		Изготовлен
	Дюло фирмы <i>Gregoire Besson</i>	0,31	1,27	0,26	-	0,007	0,03	-	0,03	0,004	0,53	0,10	0,05	0,19	0,007	51-52	-	троостомартенсит	-	Образцы импортные
	Дюло фирмы <i>Gregoire Besson</i>	0,23	1,22	0,26	-	0,010	0,03	-	0,05	-	0,50	0,10	0,05	0,11	0,007	48-49	-	троостит	-	Образцы импортные

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	Дюлово конструкци БГАТУ (сталь 80ПП)	0,84	0,07	0,04	-	0,004	0,12	-	0,07	-	0,04	0,06	-	-	0,011	67 68	42-49	мартенсит	троостомартенсит	Экспериментальные образцы
	Дюлово конструкци БГАТУ (сталь 60ПП)	0,57	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-	0,05	0,05	-	-	-	55 58	30 42	мартенсит	троостомартенсит	экспериментальные образцы
	Сталь бористая SB27M12CB	0,25 0,30	1,0 1,4	0,15 0,35	-	0,035	-	-	-	0,001 0,006	0,30 0,60	-	-	-	0,035	45 50	-	троостомартенсит	-	Заключенная среда: вода или масло
Грудь отвала ПШ 8.30.0.31.2	Грудь отвала фирмы Kverneland	0,22	0,89	Следы	-	-	-	-	0,04	-	0,03	-	-	-	-	59 61	<20	мартенсит, глина, мартенсит, остаточного	Сорбитообразный перлит, феррит	Закупленные образцы
		1,14	0,87	0,012	0,004	0,0108	0,001	0,016	0,033	-	0,03	0,035	0,003	0,007	0,0045	-	-	-	-	-

63

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
		-	0,85	0,01	-	0,012	-	-	-	-	0,13	0,04	-	-	0,008	63-65	<20	мартенсит, незначительного строения, остаточный	Сорбит, феррит		
	Лист 15-110-0-8,0 ГОСТ 19903-74 651-П31-М1-ГОУО ТУ 1577-93	0,62-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37		0,035					0,25	0,25		0,2	0,035	40-50		мартенсит		Серийно производится	
	Челюсть 250x8 SB21M10B	0,18-0,23	0,90-1,10	0,15-0,35		0,035					0,10, 30				0,035			-	-		Изготавливается
	Лист -8,0-60ПП ТУ 14-1-1926-76	0,57-0,65	0,20	0,10-0,30		0,035	0,1					0,30	0,30		0,20	0,04	50-60	30-40	мартенсит		Изготавливается
Лемех ПШ 8.30.0.301	Лемех фирмы Kverneland	0,46	1,27	0,20	-	-	0,04	-	-	-	0,34	-	-	-	-	47 48	47	троостит		Закуплены опытные образцы	
	Крыл 13-53 ГОСТ 12590-88 651-2П11-4А ГОСТ 14959-79	0,62-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37		0,035					0,25	0,25		0,2	0,035	40-50		мартенсит		Серийно производится	
	60ПП ТУ 14-1-1926-76	0,57-0,65	0,20	0,10-0,30		0,035	0,1				0,30	0,30		0,20	0,04	50-60	30-40	мартенсит		Изготовлен	
	Крыл 53-13 ГОСТ 12590-88 35ХГСА ГОСТ 4543-71	0,32-0,39	0,80-1,10	1,10-1,40		0,025						1,10-1,40	0,30		0,30	0,025			мартенсит		Изготовлен

64



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	20X11P	0,16-0,23	0,60-0,90	0,17-0,37		0,035	0,06			0,001-0,005	0,70-1,10	0,80-1,10		0,30	0,035	45-55	40-50	мартенсит		Изготовлен
	Круг Ø53 SB43M14B	0,40-0,46	1,30-1,50	0,15-0,35		0,035					0,40-0,60				0,035				-	Изготовлен
	Лемех фирмы <i>Robe</i> (основа/наплавка)	0,30	1,18	0,27	-	0,007	0,04	-	-	-	0,60	0,10	0,05	0,20	0,03	48-49	-	троостит		образцы импортные «Plas-tabido»
Доска половая ППП 8,30-802	Доска половая фирма <i>Kverneland</i>	0,24	1,17	0,25	-	-	0,04	-	-	-	0,20	-	0,02	-	-	42-46	43	троостит		Закупленные образцы
	<u>Лист 151Ю-О-12_0</u> <u>ГОСТ 19903-74</u> <u>65Г-ТВ1-М1-ТО-</u> <u>УО ТУ1577-93</u>	0,62-0,7	0,9-1,2	0,17-0,37			0,035				0,25	0,25		0,2	0,035	40-50				мартенсит

## Химический состав и физико-механические свойства материалов

Наименование детали (материала)	Индекс	Массовая доля элемента, %													
		C	Mn	Si	V	P	Ti	Nb	Al	B	Cr	Ni	Mo	Cu	S
Долото фирмы <i>Gregoire Besson</i>	173331 L	0,31	1,27	0,26	-	0,007	0,03	-	0,03	0,04	0,53	0,10	0,05	0,19	0,007
Долото фирмы <i>Gregoire Besson</i>	173332 R	0,23	1,22	0,26	-	0,010	0,03	-	0,03	-	0,50	0,10	0,05	0,11	0,007
Долото конструкции БГАТУ (сталь 80ПШ)	Оборотное	0,84	0,07	0,04	-	0,004	0,12	-	0,07	-	0,04	0,06	-	-	0,011
Долото конструкции БГАТУ (сталь 60ПП)	Оборотное	0,57	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-	0,05	0,05	-	-	-
Лемех фирмы <i>Rabe</i>	Основа	0,30	1,18	0,27	-	0,007	0,04	-	-	-	0,60	0,10	0,05	0,20	0,03
	Наплавка	4,0	0,43	0,95	0,40	-	0,04	4,9	-	0,56	12,5	0,17	3,50	0,08	-
Сталь бористая SB27M12CB	Металлургическая компания «Ovako» Швеция	0,25	1,0	0,15	-	-	-	-	-	0,01	0,30	-	-	-	0,03
		0,30	1,4	0,35	-	0,035	-	-	-	0,06	0,60	-	-	-	0,05

## деталей корпусов плугов

Твердость, HRC		Микроструктура		Примечание
поверхности	сердцевины	поверхности	сердцевины	
51–52	-	троосто-мартенсит	-	Образцы импортные
48–49	-	троостит	-	Образцы импортные
67–68	42–49	мартенсит	троосто-мартенсит	Экспериментальные образцы сталь 80ПШ
55–58	30–42	мартенсит	троосто-мартенсит	Экспериментальные образцы сталь 60ПШ
48–49	-	троостит	-	Образцы импортные «Plasmabid»
67	-	интермет + аустенит	-	
45–50	-	троосто-мартенсит	-	Закалочная среда: вода или масло

Из данных, приведенных в табл. 3.2–3.4, следует, что зарубежными фирмами-производителями преимущественно используются для деталей рабочих органов машин низкоуглеродистые, низколегированные стали с микролегированием бором (с добавками молибдена, титана, ванадия). После термической обработки такие изделия обладают повышенной прочностью и ударной вязкостью.

Микроструктурные исследования образцов ДРОМ зарубежных фирм-производителей свидетельствуют о мелкозернистой структуре мартенсита отпуска (рис. 3.1).

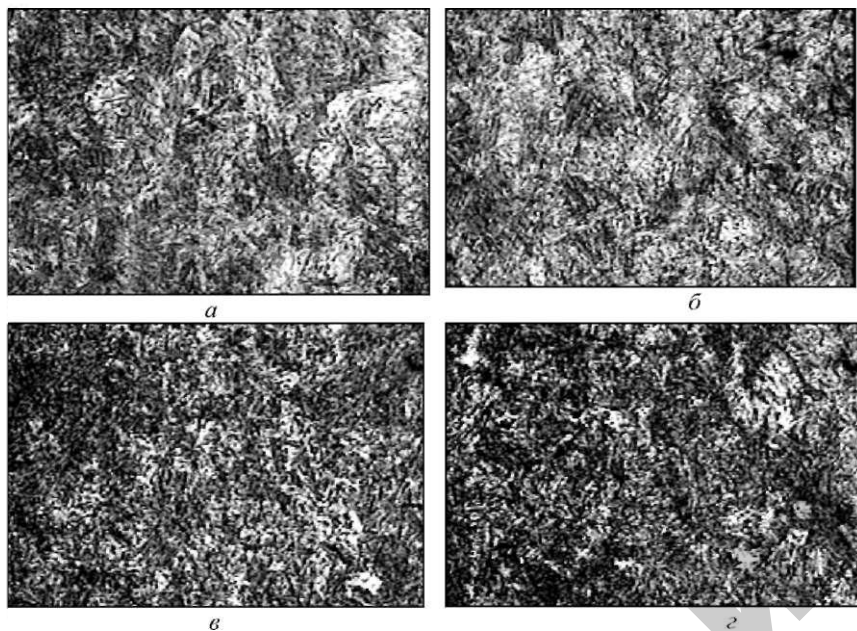


Рис. 3.1. Микроструктуры образцов ДРОМ зарубежных фирм-производителей ( $\times 500$ ):  
а, б – сердцевина; в, г – наружная поверхность

В отдельных случаях при изготовлении ДРОМ зарубежные фирмы-производители используют для повышения износостойкости наплавку твердыми сплавами или защиту рабочих поверхностей износостойкими пластинами. Варианты зон упрочнения сменных деталей рабочих органов с.-х. машин западноевропейских фирм-производителей представлены на рис. 3.2 и 3.3.

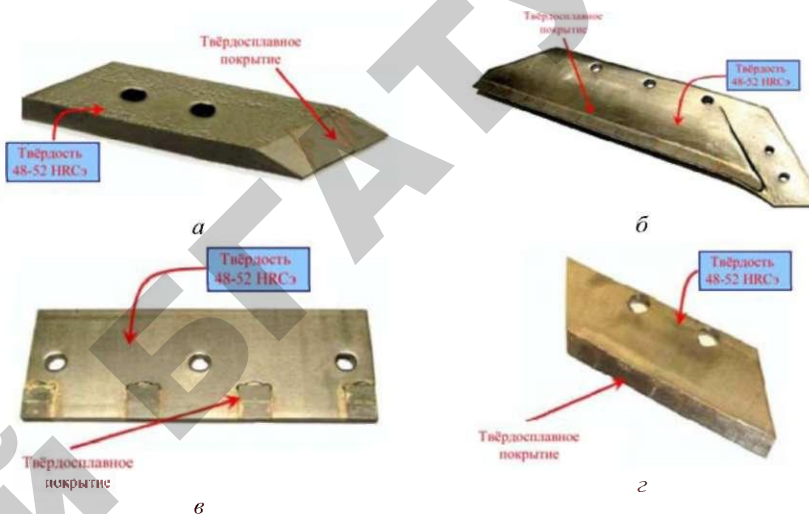
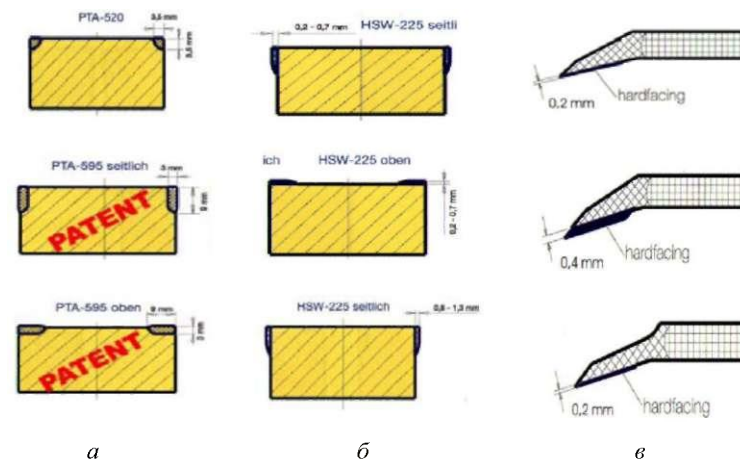


Рис. 3.2. Характерные упрочненные зоны сменных деталей корпуса плуга западноевропейских фирм-производителей:  
а – долото; б – лемех; в – полевая доска; г – лемех предплужника



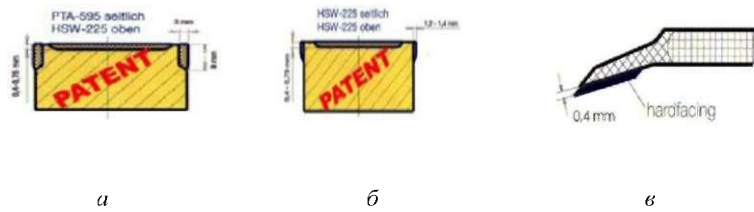


Рис. 3.3. Варианты упрочнения деталей  
измельчающих аппаратов кормоуборочных машин:  
а, б – противорежущие брусья; в – ножи



Рис. 3.5. Образцы упрочненных ДРОМ

В последние годы на выставках с.-х. техники рекламировались экспонаты долот и лемехов корпусов плугов с наплавленными почворезущими профилями как новое направление в решении проблемы повышения надежности (конструкционной износостойкости) сменных деталей. На рабочей поверхности почворезущих профилей содержатся твердосплавные пластины (рис. 3.4 и 3.5) или твердосплавные покрытия (рис. 3.6). К числу упрочняемых поверхностей относится также периферия крепежных отверстий. Можно предполагать, что твердосплавные покрытия, выполняемые с применением вольфрамсодержащих сплавов, наносятся наплавочными методами.

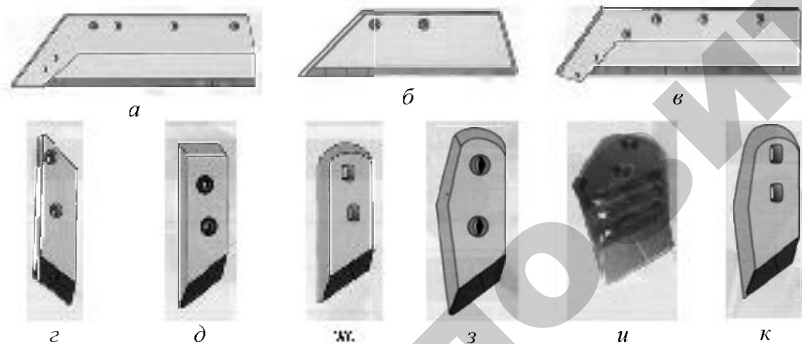


Рис. 3.4. Образцы лемехов (а, б, в) и долот (г, д, ж, з, и, к) с упрочненными почворезущими профилями



Рис. 3.6. Образцы долот с почворезущими профилями, упрочненными твердосплавными покрытиями

### 3.2. Современные технологии изготовления деталей

Ведущие фирмы – производители деталей рабочих органов с.-х. машин – выпускают широкий набор сменных деталей нового поколения: лемех, отвал, долото, полевая доска, диски борон, ножи измельчающих аппаратов кормоуборочных машин, ножи косилок, сегментные ножи кукурузных жаток, копачи и одрезающие ножи ботвы свеклоуборочных комбайнов, оборотные лапы и зубья культиваторов с активными рабочими органами, стрелчатые лапы, лапы глубоких рыхлителей и др. Все они характеризуются высокими физико-механическими свойствами и показателями работоспособности. Конкуренентоспособность изделий обеспечивается наукоемкими технологиями обработки соответствующего стального проката.

Высокие показатели надежности деталей достигаются разработкой и реализацией западноевропейскими фирмами наукоемких технологий: «Conit» – *Kverneland*, Норвегия; «Triplex» и «Dreilagenmaterial» – *Huard*, Франция; «Rabid» – *Rabewerk*, Германия; *Rabe*, Венгрия (рис. 3.7). Применяются лазерные и плазменные способы упрочнения деталей в сочетании со специальными процессами термической обработки, а также новые материалы, например, «Permanit» – *Vogel & Noot*, Австрия.

Изделия, полученные с применением технологий «Conit» и «Triplex», обладают высокой конкурентоспособностью и наиболее соответствуют ударно-абразивным условиям эксплуатации. Отличительной особенностью этих изделий является 3-слойное поперечное сечение, так называемое диссипативное (градиентное) структурное строение. Поверхностные слои изделий имеют твердость до 67 HRC и высокую прочность – 1200–1800 МПа. При этом сравнительно пластичная сердцевина обеспечивает повышенную ударную вязкость изделий. Названные технологии являются интеллектуальной собственностью разработчиков [9, 10].

На рис. 3.8 представлена схема распределения твердости в поперечном сечении изделия на примере отвала в зависимости от выбранного материала. Такие изделия характеризуются высокой работоспособностью в эксплуатационных условиях.

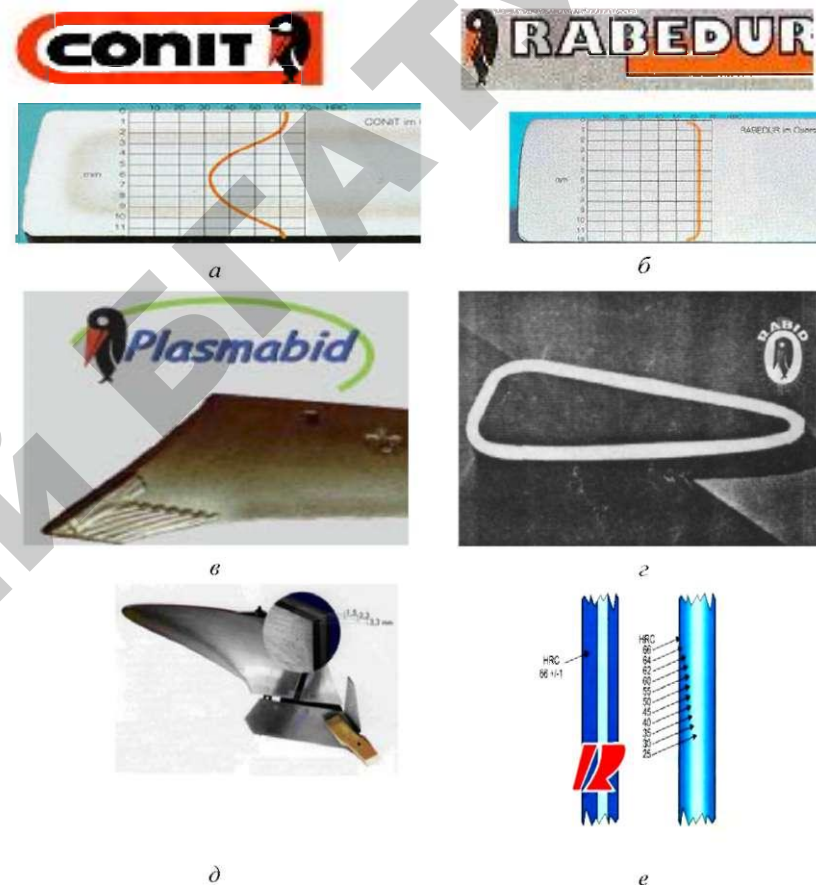


Рис. 3.7. Характерные признаки образцов ДРОМ, изготовленных западноевропейскими фирмами по технологиям: а – «Conit»; б – «Rabedur»; в – «Plasmabid»; г – «Rabid»; д, е – «Triplex» (Dreilagenmaterial)

Преимуществами используемых технологий и материалов для производства деталей являются: низкое содержание дорогостоящих легирующих элементов, хорошая закаливаемость, детали обладают

достаточной ударной вязкостью, простая и недорогая термообработка, малая чувствительность к появлению закалочных трещин и короблению, хорошая комбинация ударной вязкости и прочности.

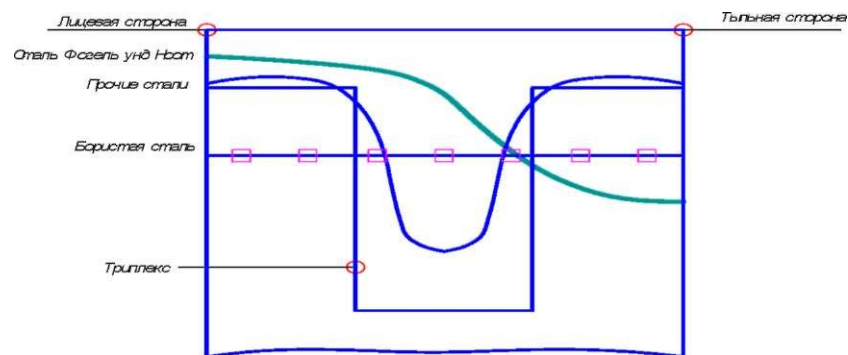


Рис. 3.8. Схема распределения твердости в поперечном сечении отвала в зависимости от выбранного материала.

Заслуживают внимания для ДРОМ новые перспективные материалы, имеющиеся на рынке СНГ, – стали пониженной прокаливаемости (ПП). Они имеют следующие модификации: сталь 58 (55ПП) – ГОСТ 1050-88, сталь 60ПП – ТУ завода изготовителя. Эти материалы характеризуются следующим химическим составом: углерод – 0,5–0,65 %; марганец – 0,1–0,3 %; кремний – 0,1–0,3 %; хром, никель и медь – не более 0,25 % каждого.

При производстве деталей из этих материалов находят применение новые перспективные методы упрочнения. При этом детали из стали ПП имеют диссипативное строение. Твердость поверхностного слоя составляет 58–64 HRC при относительно мягкой сердцевине – 28–42 HRC. Они имеют высокий комплекс механических свойств: прочность 2100–2300 МПа, ударная вязкость 0,6–1,25 МДж/м<sup>2</sup>. Микроструктура закаленного промежуточного слоя и сердцевины представлена на рис. 3.9. По основным технико-экономическим показателям они превосходят материалы, используемые западноевропейскими производителями.

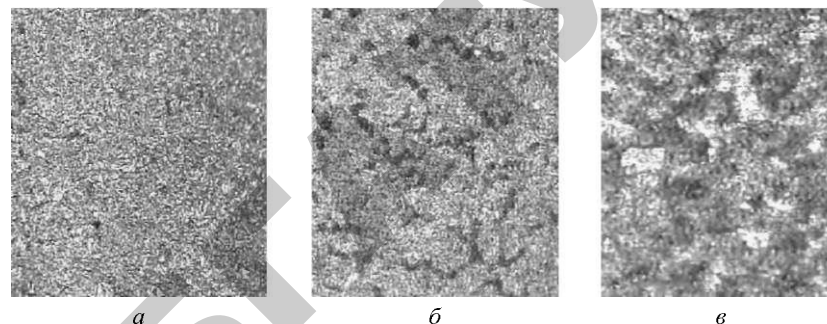


Рис. 3.9. Микроструктура в поперечном сечении плоского образца: а – поверхностный слой, б – промежуточный слой, в – сердцевина

Таким образом, производство рабочих органов сельскохозяйственных машин предполагает использование современных наукоемких ресурсосберегающих технологий и материалов, обеспечивающих высокое качество продукции [1–8]. В основу получения заготовок деталей рабочих органов должны быть положены методы плазменной и лазерной резки – раскройки листового проката, штамповки,ковки, поперечной и продольной клиновой прокатки. Особое внимание должно быть уделено технологии формообразования режущей части деталей. Обработку резанием при заточке лицевой части изделия должны заменить высокопроизводительные технологии с применением поперечной и продольной клиновой прокатки.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Машиностроение : энциклопедия в 40 т. М. : Машиностроение, 2002. Т. IV–16.
2. Бернштейн Д. Б., Лискин И. В. Лемехи плугов. Анализ конструкций, условий изнашивания и применяемых материалов : обзорн. информ., сер. 2., вып. 3. М. : ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш, 1992.
3. Ткачев В. Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М. : Машиностроение, 1995.
4. Бетенья Г. Ф. Восстановление и упрочнение почворезущих элементов диффузионным намораживанием износостойкими сплавами. Минск : БГАТУ, 2003.

5. Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль процессов нагрева и упрочнения деталей на машиностроительных предприятиях : сб. науч. трудов. Минск : Технопринт, 2002.

6. Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль термических процессов на машиностроительных предприятиях : сб. науч. трудов. Минск, 2005.

7. Патент на изобретение № 223370. РФ. Рабочий орган почвообрабатывающих машин (варианты) / Бстенья Г. Ф., Лобозов В. П. [и др.]. М. : ФИПС, 2004.

8. Патент на полезную модель. № 1590. РБ. Изделие с самозатачивающимся биметаллическим почворезущим профилем / Бстенья Г. Ф., Ивашко В. С. [и др.]. Минск : НЦИС, 2004.

9. Conit, Rabid and Rabedur Rabewerk. Entwicklungen mit Höchster Materialqualität. 1994, № 7 // Anbau – Drehpflüge.

10. Landmaschinenwelt «97/98». Technische Anbeminngen, Vorbehalten, 1997.

## РАЗДЕЛ 4

### ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

#### 4.1. Типовые представители деталей

Типовые представители деталей рабочих органов машин для основной обработки почвы. Типовыми представителями сменных ДРОМ, используемых на почвообрабатывающих и посевных агрегатах, являются: лемехи, долота, крылья отвала, полевые доски, оборотные лапы, стрельчатые лапы, зубья борон, диски и клинья сошников. Они определяют технический уровень машин. Выход из строя этих деталей происходит по причине деформации, поломок и изнашивания.

Критериями предельного состояния лемехов является износ носка на величину более 75 мм, износ лезвия по ширине более 90 мм до обнажения башмака. Для отвалов критериями предельного состояния является сквозное протирание в зоне стыка с лемехом. Критериями предельного износа груди отвала являются износ полевой обреза по ширине более 15 мм либо сквозное протирание. Для стрельчатых лап критериями предельного состояния является износ по ширине захвата более 50 мм и износ носка более 30 мм, оборотных лап – более 40 мм с каждой стороны, зубьев роторных борон – износ по длине более 80 мм.

Сменные ДРОМ для почвообрабатывающей, посевной и кормоуборочной техники не являются унифицированными изделиями. Производители машин (плугов, дисковых борон, почвообрабатывающе-посевных агрегатов, косилок, свеклоуборочных и кормоуборочных комбайнов) разрабатывают и поставляют сменные детали, отличающиеся преимущественно крепежной частью, что исключает их применение на аналогичных рабочих органах. Следует отметить, что в практике использования сменных ДРОМ находит предложение поставщиков о снабжении потребителей изделиями т. н. оригинального и неоригинального исполнения. На рис. 4.1 иллюстрируются основные типовые представители сменных ДРОМ для почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

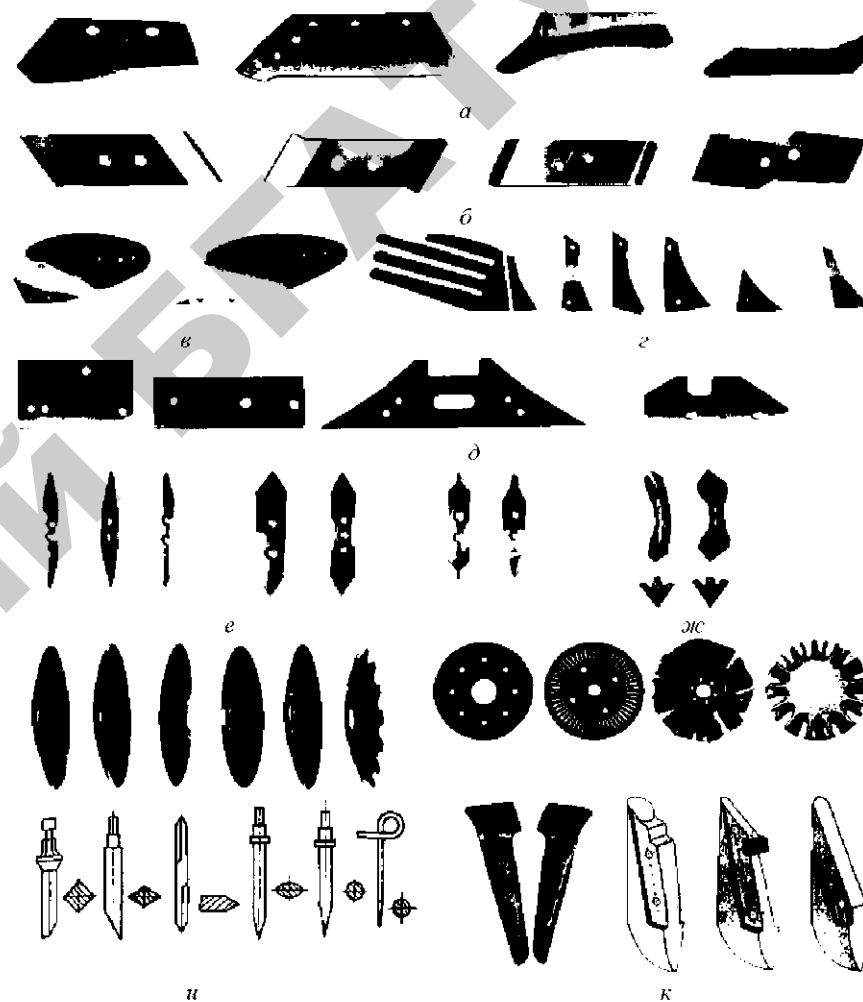


Рис. 4.1. Типовые представители сменных ДРОМ почвообрабатывающих и посевных агрегатов:

а – лемехи; б – долота; в – крылья отвалов; г – груди отвалов; д – полевые доски; е – оборотные лапы; ж – стрельчатые лапы; з – диски; и – зубья борон; к – сошники сеялок

Такие изделия являются взаимозаменяемыми. Отличительными характеристиками при этом являются материалы и технологии изготовле-



ния сменных ДРОМ. Детали оригинального исполнения поставляются от разработчика-изготовителя изделий. При этом гарантируются их потребительские свойства. Детали потребительского исполнения, как правило, имеют на 20–30 % меньший ресурс по отношению к оригинальным изделиям. Это связано с тем, что технологии упрочнения деталей являются интеллектуальной собственностью разработчиков и не передаются конкурентам.

*Типовые представители деталей рабочих органов кормоуборочных машин.* Типовыми представителями сменных ДРОМ кормоуборочных машин являются ножи косилочные, ножи измельчающих аппаратов, противорезущие брусья, ножи измельчителей рулонов (рис. 4.2.)

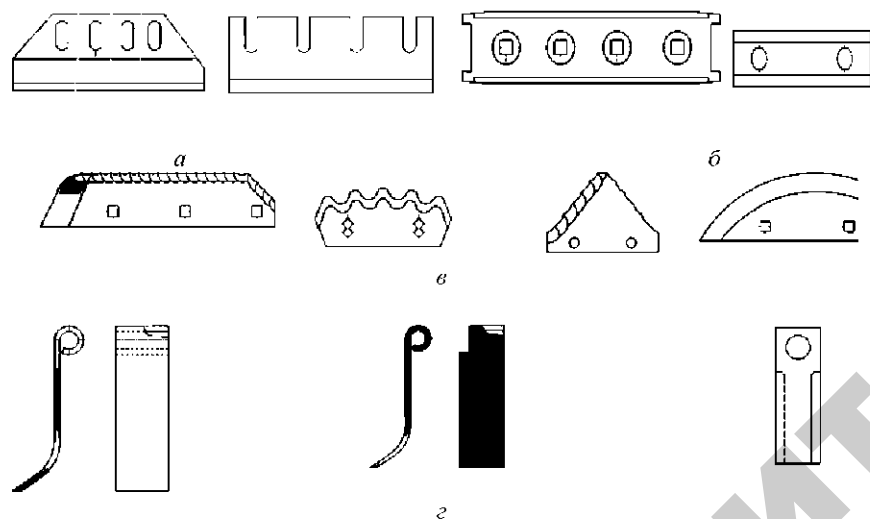


Рис. 4.2. Типовые представители сложных ДРОМ кормоуборочных машин:

*а* – ножи измельчающих аппаратов; *б* – противорезущие брусья;

*в* – ножи измельчителей рулонов; *г* – косилочные ножи

Отечественное производство сменных деталей (ножи косилочные, ножи измельчающих аппаратов и рулонов) кормоуборочных машин базируется на использовании стали 65Т. Заготовки подвергаются термической обработке (закалка + отпуск). Ножи измельчающих аппаратов дополнительно упрочняют нанесением на режущую часть

изделия износостойкого сплава (высокохромистого чугуна С-27). Для нанесения износостойкого покрытия использовалась индукционная наплавка. Критериями предельного состояния деталей является износ по ширине упрочненной режущей части.

Многолетние наблюдения за использованием сменных ДРОМ, поставляемых западноевропейскими фирмами-производителями изделий оригинального исполнения, свидетельствуют о сравнительно высоком качестве продукции. Эти обстоятельства являются определяющими в устойчивом сохранении рынка сбыта.

Зарубежные фирмы-производители изготавливают сменные детали кормоуборочных машин с использованием низколегированных среднеуглеродистых сталей (аналог в СНГ – сталь 38ХМ). Для упрочнения деталей используются: лазерная наплавка, плазменная наплавка, высокочастотная закалка. Эти изделия характеризуются высокой работоспособностью и обладают коммерческой перспективой. Технологии изготовления являются интеллектуальной собственностью фирм-производителей.

#### 4.2. Методика сравнительной оценки технического уровня деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники

При разработке деталей рабочих органов отечественной сельскохозяйственной техники необходимо учитывать влияние материаловедческих, триботехнических, конструкторских, технологических, эксплуатационных и экономических факторов, что позволит повысить конкурентоспособность изделий на мировом рынке [1]. В этой связи требуется развитие методов оценки и сопоставительного анализа технического уровня отечественной и зарубежной техники.

Привлечение информационных ресурсов при разработке новых машин или усовершенствовании деталей их рабочих органов (ДРОМ) способствует своевременному исправлению ошибок и обходится значительно дешевле, чем при испытаниях и эксплуатации.

Известен ряд методических подходов к оценке технического уровня машин [2–6]. Большинство из них основаны на сопоставлении единичных показателей разрабатываемого образца и лучших аналогов.

Технический уровень (ДРОМ) зависит от ряда факторов, к числу которых относятся: материаловедческий, конструкторский, технологический, триботехнический, эксплуатационный

и экономический. Чтобы совместно рассматривать указанные факторы, характеризующиеся определенными показателями, имеющими различную размерность и диапазон измерения, численные значения последних необходимо преобразовать в безразмерные величины. С той целью каждый натуральный показатель  $y_i$  приводится в соответствие с относительным показателем  $d_i$ :

$$y_{i \min} \leq y_i \leq y_{i \max}, \quad (4.1)$$

$$d_{i \min} \leq d_i \leq d_{i \max}, \quad (4.2)$$

где  $y_{i \min}, y_{i \max}$  – предельные значения показателя;  
 $d_{i \min}, d_{i \max}$  – безразмерные оценки.

Тогда

$$d_i = \begin{cases} d_{i \max} + (d_{i \min} - d_{i \max}) \frac{y_i - y_{i \max}}{y_{i \min} - y_{i \max}}, & y_{i \max} \leftrightarrow d_{i \max} \\ d_{i \max} + (d_{i \min} - d_{i \max}) \frac{y_i - y_{i \min}}{y_{i \max} - y_{i \min}}, & y_{i \max} \leftrightarrow d_{i \min} \end{cases} \quad (4.3)$$

Таким образом, лучшему техническому средству (рабочему органу) соответствует самая высокая оценка, худшему – самая низкая, среднему – средняя. В качестве эталона по каждому из показателей принимается значение, соответствующее (в зависимости от решаемой задачи) лучшему мировому или отечественному уровню. Если принять  $d_{i \max} = 1,0$ , а  $d_{i \min} = 0,1$  то формула для определения  $d_i$  запишется в виде:

$$d_i = \begin{cases} 1 - 0,9 \frac{y_i - y_{i \max}}{y_{i \min} - y_{i \max}}, & y_{i \max} \leftrightarrow d_{i \max} \\ 1 - 0,9 \frac{y_i - y_{i \min}}{y_{i \max} - y_{i \min}}, & y_{i \max} \leftrightarrow d_{i \min} \end{cases} \quad (4.4)$$

В практике квалиметрии для сверки отдельных показателей в интегральную форму используют различные средние (арифметическую, геометрическую и др.). Предпочтительнее применять среднюю геометрическую:

$$D_j = \sum_{i=1}^{n_j} \beta_{ij} \sqrt[n_j]{\prod_{i=1}^{n_j} d_{ij}^{\beta_{ij}}}, \quad (4.5)$$

где  $D_j$  – интегральный показатель влияния  $j$ -го фактора;  
 $d_{ij}$  – оценка  $i$ -го показателя в  $j$ -ом факторе;  
 $n_{ij}$  – количество показателей в  $j$ -ом факторе;  
 $\beta_{ij}$  – весовость  $i$ -го показателя в  $j$ -ом факторе.

Весовость оцениваемых показателей определится по формуле:

$$\beta_{ij} = \frac{K_{ojj}}{K_{ij}}, \quad (4.6)$$

где  $K_{ojj}$  и  $K_{ij}$  – численное значение планируемого (нормативного) и среднестатистического (достигнутого)  $i$ -го показателя в  $j$ -ом факторе.

Интегральный показатель по всем факторам определяется по формуле:

$$D = \sum_{r=1}^m \beta_r \sqrt[m]{\prod_{r=1}^m D_j^{\beta_r}}, \quad (4.7)$$

где  $\beta_r$  – весовость  $r$ -го фактора.

При равенстве весовостей факторов интегральный показатель  $D$  рассчитывают по формуле:

$$D = m \sqrt[m]{\prod_{r=1}^m D_j}. \quad (4.8)$$

Важной задачей при анализе и оценке технического уровня изделия является выбор как факторов, так и их показателей. Как показывает практика, при разработке нового изделия конструктор первоначально обосновывает выбор материала для его изготовления.

Таблица 4.1

Проведение сравнительной оценки технического уровня проектируемого изделия обратного долота можно проиллюстрировать на основе материаловедческого фактора и его показателей. Применительно к долоту, выбор материала должен сопровождаться сопоставлением следующих показателей: марка стали, химический состав, прочность, твердость, ударная вязкость, комплексная характеристика (произведение ударной вязкости на твердость) и др.

Марка или химический состав (высоколегированная, среднелегированная, низколегированная, улучшаемая экономнолегированная, улучшаемая пониженной прокаливаемости) содержат сведения о получении, по возможности, самых высоких значений механических свойств (прочности, твердости, ударной вязкости).

Прочность дает представление о возможности эксплуатации изделия в конкретных эксплуатационных условиях с учетом нагрузки и ударных воздействий.

Твердость материала изделия характеризует износостойчивость в условиях ударно-абразивного изнашивания. Известно, что материал изделий, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, должен обеспечивать твердость поверхности не менее 50 HRC [1, 7– 9].

Ударная вязкость характеризует материал изделий на возможность выдерживать ударные нагрузки. Установлено, что для лемехов (долот), с учетом возросших скоростей почвообработки, необходимо обеспечивать ударную вязкость не менее 40–120 Дж/см<sup>2</sup> [10].

Комплексный показатель (произведение прочности на ударную вязкость, либо на относительное сужение, либо относительное удлинение [11]) дает интегрированное представление о возможности применения выбранного материала для данной детали, ее способности противостоять механическому ударному разрушению, пластическому деформированию рабочих поверхностей и абразивному изнашиванию.

В [10] содержится информационный банк данных о перечисленных показателях для целого ряда марок сталей, которые в последнее время используются для производства долот. Сведения по указанным маркам сталей приведены в табл. 4.1 и 4.2.

Свойства применяемых для изготовления долот сталей после улучшения

Марка стали	Цилиндр легированных элементов, %	Значения твердости $y_1$ , HRC	Значения прочности $y_2$ , МПа	Значения ударной вязкости $y_3$ , МДж/м <sup>2</sup>	Значения комплексного показателя $y_4 \cdot 10^{12}$ Н <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>
65Г	1,0–1,5	40–45	800–1200	0,4–0,6	320–720
40Х	1,0–1,5	45–50	800–1200	0,2–0,4	160–480
55ПП	0,5–1,0	55–60	2000–2400	0,8–1,0	1600–2400
Х6Ф	5–10	50–55	1200–1600	0,4–0,6	480–960
Х12	10–15	55–60	1600–2000	0,6–0,8	960–2500
SB43	1,5–2,5	50–55	1600–2000	0,6–0,8	960–2500

Таблица 4.2

Результаты перевода численных значений показателей в безразмерные величины

Марка стали	$d_1$	$\beta_1$	$d_2$	$\beta_2$	$d_3$	$\beta_3$	$d_4$	$\beta_4$	$d_5$	$\beta_5$	$D$
65Г	0,95	0,40	0,125	1,41	0,125	2,40	0,375	2,00	0,15	48,02	0,16
40Х	0,95	0,40	0,375	1,26	0,125	2,40	0,125	3,33	0,06	80,03	0,07
55ПП	0,98	0,67	0,875	1,04	0,875	1,09	0,875	1,11	0,81	12,13	0,83
Х6Ф	0,52	0,07	0,625	1,14	0,375	1,71	0,375	2,00	0,24	34,30	0,26
Х12	0,17	0,04	0,875	1,04	0,625	1,33	0,625	1,43	0,50	18,76	0,53
SB43	0,90	0,25	0,625	1,14	0,625	1,33	0,625	1,43	0,50	18,76	0,52

Для наглядности построена радарная диаграмма (рис. 4.3) материаловедческого фактора, на осях которой отложены показатели (в баллах).

Интегральный показатель  $D$  определяется на основании данных, приведенных в табл. 4.1 и 4.2. Для долот из стали 65Г он составил 0,16, а для долот из бористой стали – 0,52.

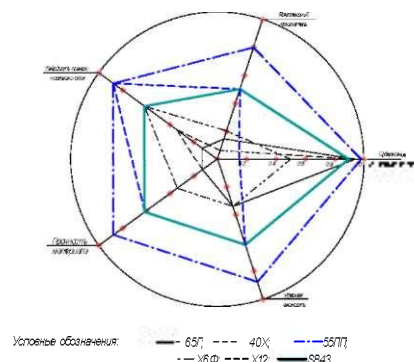


Рис. 4.3. Радарная диаграмма показателей материаловедческого фактора

С помощью такого подхода можно определить степень влияния каждого фактора на ресурс данной конструкции долота, построить радарные диаграммы по основным факторам, сравнить между собой различные конструкции и технологии изготовления долот. К примеру, из приведенных результатов можно заключить, что долота, которые имеют высокую прочность и износостойкость, уступают схожим деталям по ряду эксплуатационных и экономических показателей.

#### 4.3. Обоснование критериев работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники

Детали рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин (ДРОМ) характеризуются большим разнообразием по форме, размерам и условиям эксплуатации [1]. Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, в контакте с различными рабочими средами (почвой, растительной массой, влагой и др.). Эти экстремальные условия эксплуатации определяют требования при обосновании критериев работоспособности ДРОМ. Исходя из современных представлений по материаловедению [12–17], к числу основных критериев работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин следует отнести: конструкционную прочность, твердость, ударную вязкость, пластичность и конструкционную износостойкость.

При термической обработке (закалке) стали, в зависимости от скорости охлаждения или достижения разной степени переохлаждения аустенита, изменяется динамика его структурных превращений.

Упрочнение закаленного изделия во многом определяется механическими и физическими свойствами мартенсита. Для сталей мартенситного класса после закалки твердость может достигать 67 HRC. Она примерно в 6 раз превышает твердость феррита. Для других структур твердость по мере убывания составляет: нижний бейнит – 46–57 HRC; верхний бейнит – 41–46 HRC; троостит – 300–400 HB; сорбит – 190–300 HB. По своему значению твердость мартенсита приближается к твердости цементита, равной 69–71 HRC [15]. Такое ее высокое значение объясняется как повышенным содержанием в мартенсите углерода, так и фазовым наклепом от аустенитно-мартенситного превращения и образованием в зерне большого количества микронеоднородностей в виде мелких пластин мартенсита. В свою очередь, это может приводить к значительному понижению пластичности стали. На рис. 4.4 представлена зависимость твердости мартенсита от содержания в нем углерода.

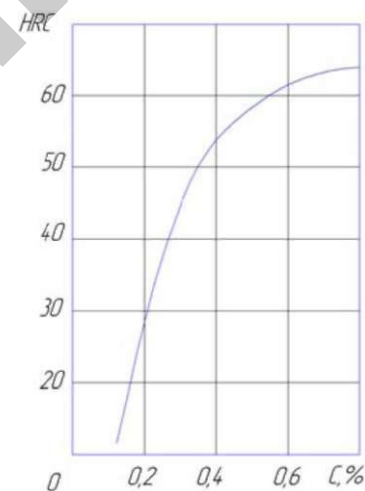


Рис. 4.4. Влияние содержания углерода на твердость

Углерод, концентрация которого в конструкционных сталях достигает 0,8 %, оказывает определяющее влияние на их свойства. Степень его влияния зависит от структурного состояния стали, ее термической обработки. Временное сопротивление для стали, содержащей 0,6–0,8 % C, достигает 2600–2700 МПа.

Следует учитывать, что стали являются сложными по составу железо-углеродистыми сплавами. Стали конструкционные всегда содержат некоторое количество постоянных и случайных примесей. Они также влияют на механические свойства стали [15, 16].

Значительное определяющее влияние на механические свойства конструкционных сталей (до 0,8 % C) оказывают углерод, марганец, кремний, сера, фосфор, азот, ниобий, ванадий, титан, алюминий.

Неметаллические примеси (сера, фосфор, азот) относятся к вредным примесям. В зависимости от качества стали, содержания серы не должно превышать 0,035–0,06 %. Допустимое содержание фосфора в стали не должно превышать 0,025–0,045 %. Примеси азота внедрения, образуя по границам зерен выделения оксидов и нитридов, повышают порог хладноломкости и снижают ударную вязкость стали.

Марганец вводится в сталь для раскисления. Он остается в стали в количестве 0,3–0,8 %. Марганец уменьшает вредное воздействие серы и кислорода. Кремний также вводится в сталь в качестве активного раскислителя и остается в ней в количестве до 0,4 %. Он оказывает упрочняющее действие.

Измельчению зерна в стали способствуют ниобий (0,05 %), алюминий (0,05 %), ванадий (0,1 %).

Конструкционная прочность [16], как комплекс механических, технологических и эксплуатационных свойств, выступает гарантией надежной и длительной работы материала в условиях эксплуатации. Механические свойства и их характеристики, определяющие КП и выбор конструкционного материала, зависят от силовых факторов (нагрузок), сопровождающих процесс работы, а также от силовых воздействий абразивной среды, в которой совершаются технологические операции.

Известно [18], что для экстремальных условий эксплуатации деталей традиционные методы их упрочнения малоэффективны. Проблема повышения конструкционной прочности по традиционной технологии состоит в том, что при высокой прочности углеродистой стали после закалки на мартенсит и низкого отпуска она охрупчивается и становится ненадежной в эксплуатационных условиях.

Научные разработки последних лет [19–21] показывают, что высокая прочность, твердость, износостойкость, при достаточно высокой вязкости и пластичности, достигаются целенаправленным формированием субмикро- и наноразмерной структуры металла изделия (рис. 4.5). Увеличение доли фрагментированной структуры, измельчение фрагментов и выделения дисперсных частиц наноразмера в низколегированных сталях вызывает повышение прочности на 20–30 % при одновременном обеспечении высоких значений вязкости и пластичности. Считается, что для мартенситных сталей упрочнение дисперсными частицами является одним из основных механизмов дополнительного повышения прочности и трещиностойкости.

Из [22–26] видно, что высокие механические свойства (прочность, вязкость, пластичность, трещиностойкость) и их сочетание связано с объемным наноструктурированием стального изделия.

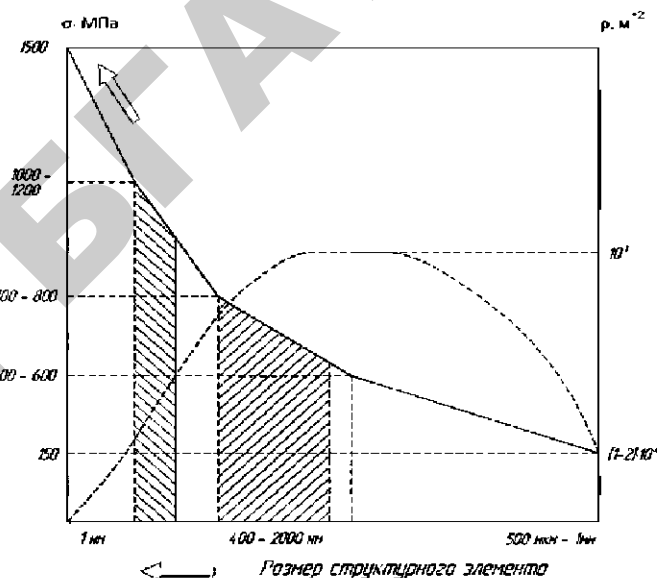


Рис. 4.5. Изменение предела текучести при измельчении структуры конструкционной низкоуглеродистой низколегированной стали

Крупнозернистые материалы с размером зерен более 10 мкм не проявляют признаков сверхпластичности. Это наглядно подтверждается сравнением поверхностей (фасеток) изломов образцов. Вязкий (транскристаллитный) излом, которому присущ ямочный характер рельефа, наблюдается у сплавов с ультрамелкозернистой структурой. Более мелкой структуре соответствует и меньший размер ямок разрушения. Для наноструктурного состояния размер ямок не превышает 1 мкм.

В целом из [8–29] можно заключить, что решение проблемы повышения работоспособности ДРОМ должно осуществляться путем получения дисперсной структуры стального изделия.

При выборе марки стали этот постулат должен быть основным. В свою очередь, сталь выбранной марки должна быть доступной на рынке и конкурентоспособной. Прогнозный анализ показывает [27],

что стальной прокат и в обозримом будущем останется материалом для изготовления деталей рабочих органов сельхозмашин. Потенциал стали как материала для с.-х. машиностроения совершенно не исчерпан. Сталь является и будет являться в будущем потенциальным материалом для производства сменных деталей рабочих органов с.-х. техники, относящихся к изделиям, работающим в экстремальных условиях эксплуатации. Следует также учитывать, что современные информационные среды [20] (базы данных, программные комплексы выбора марки стали, марочники сталей, электронные таблицы и др. разработки по выбору марки стали, построенные на компьютерных технологиях) позволяют исключить рутинные ошибки, получать достоверную информацию о сталях и высокого качества результат. Однако единого показателя свойств стали, по которому возможно выбрать ее марку, до настоящего времени нет.

Стальное изделие с микрокристаллическим строением одного и того же химического состава по комплексу свойств существенно отличается от изделия с нанокристаллической структурой. Причем это отличие распространяется на изделия с мелкозернистой структурой, с размером зерен в поперечном направлении не более 5–10 мкм. ТМО позволяет на образцах небольшого размера из среднеуглеродистых легированных сталей 30ХГСА, 40ХН, 38ХНЗМА и др. обеспечить высокую прочность ( $\sigma_b = 2000\text{--}2800$  МПа) при достаточном запасе пластичности и вязкости [16]. Однако для осуществления ТМО требуются мощные деформационные средства, что затрудняет широкое практическое ее использование.

Разработка технических решений упрочнения деталей рабочих органов, позволяющих на наномасштабном уровне управлять созданием структуры и уникальным сочетанием свойств конструкционных сталей, является одним из самых сложных и перспективных направлений создания изделий нового поколения. Такое направление научного поиска является пионерным.

До последнего времени отсутствовали промышленные технологии получения ДРОМ, соответствующих экстремальным условиям эксплуатации. Применялись детали, изготовленные преимущественно из стального проката марки 65Г, либо закупались импортные изделия.

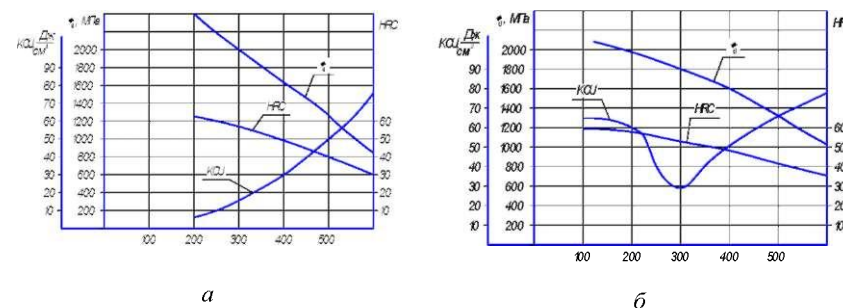
Исходя из обозначенных основных критериев работоспособности ДРОМ и их численных значений, а также учитывая накопленные научные разработки в данной области знаний, путем применения сталей пониженной прокаливаемости и импульсного закалочного охлаждения жидкостью, решение данной проблемы повышения работоспособности изделия нового поколения следует считать актуальным и научно обоснованным.

#### 4.4. Обоснование выбора материала ДРОМ

Условия работы и изнашивание ДРОМ подробно освещены в энциклопедическом издании [1]. Ежегодные прямые расходы сельхозпроизводителей, связанные с заменой деталей, вышедших из строя, составляют десятки миллиардов рублей. Снижение расходов на замену ДРОМ – одна из ключевых задач экономики АПК. До последнего времени отсутствовали промышленные технологии получения сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники для экстремальных условий эксплуатации. Применялись детали, изготовленные преимущественно из стали 65Г, либо закупались по импорту.

Материал и свойства ДРОМ должны быть адекватны условиям эксплуатации. ДРОМ работают при статических, циклических и ударных нагрузках, в контакте с различными рабочими средами.

Эти факторы определяют требования к критериям их работоспособности. К числу критериев работоспособности ДРОМ относятся конструкционная прочность, твердость, ударная вязкость (рис. 4.6), пластичность и конструкционная износостойкость.



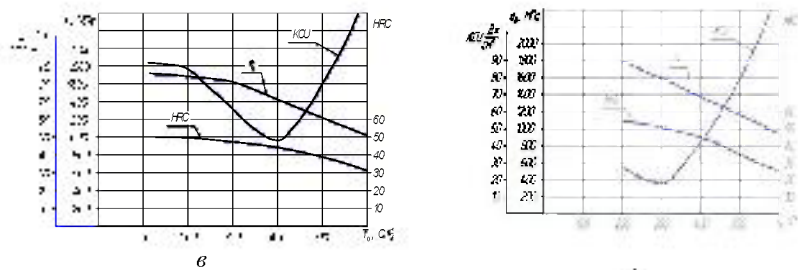


Рис. 4.6. Изменение физико-механических свойств стали в зависимости от температуры отпуска [10]:

*a* – сталь 65Г; *б* – сталь 40ХС; *в* – сталь 30ХГСА; *г* – сталь 40Х

Среди сталей зарубежного производства практический интерес представляют, по данным справочника проектировщика [30], бористые стали. Раахеский металлургический завод (Финляндия) производит бористые стали RAEX В. Они обладают высокой прокаливаемостью. За счет легирования бором эти стали прокаливаются уже с малым содержанием углерода. Это придает стали высокую прочность и хорошую ударную вязкость (рис. 4.7*a, б, в*). Бористые стали RAEX В производятся в виде листов толщиной 6–40 мм и полос толщиной 2–8 мм. Стали применяются для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин.

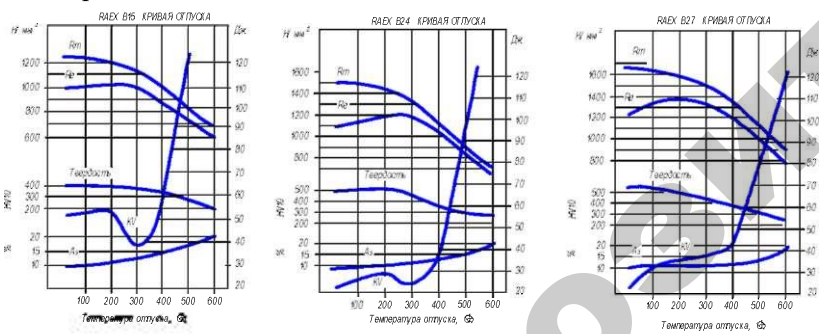


Рис. 4.7. Изменение механических свойств бористых сталей от температуры отпуска:

*a* – сталь RAEX B15; *б* – сталь RAEX B24; *в* – сталь RAEX B27

В настоящее время известны два основных пути упрочнения:

- традиционная система легирования;
- упрочнение при наномодифицировании.

В формировании важнейших механических свойств главенствующая роль принадлежит структуре. Она должна быть дисперсной (субмикро- и нанокристаллической).

Условия формирования субмикроструктуры и наноструктуры – измельчение структуры при фазовом превращении ( $\gamma-\alpha$ ) в ходе интенсивного охлаждения заготовки. Выбор исходного материала для ДРОМ нового поколения является исключительно важной задачей.

Техническая и экономическая целесообразность материала деталей в машиностроении преимущественно определяются, исходя из групп их свойств: эксплуатационные и технологические. При этом эксплуатационные свойства должны иметь первостепенное значение в определении работоспособности деталей.

Для ДРОМ, как работающих в экстремальных условиях эксплуатации, работоспособность оценивается комплексом механических свойств и сопротивляемостью абразивному изнашиванию. Качественный конструкционный материал для ДРОМ, с учетом условий их эксплуатации, должен удовлетворять комплексу требований и иметь высокую конструкционную прочность и износостойкость.

Под конструкционной прочностью в данном случае понимается комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, надежности и долговечности.

Конструкционная износостойкость характеризует соответствие формы режущей части ДРОМ условиям эксплуатации.

Прочность материала ДРОМ должна быть достаточна для ограничения упругой и пластической деформации при гарантированной надежности и долговечности. Известно [15, 16], что конструкционные стали по прочности, оцениваемой временным сопротивлением, условно подразделяются на стали нормальной (средней) прочности ( $\sigma_B < 1000$  МПа), повышенной прочности ( $\sigma_B < 1500$  МПа) и высокой прочности ( $\sigma_B > 1500$  МПа). Материал ДРОМ должен удовлетворять условиям высокой прочности.

Надежность ДРОМ характеризует свойства материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает

внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным из-за протекания с большой скоростью при напряжениях, ниже расчетных. По данным [16], для предупреждения хрупкого разрушения конструкционный материал должен обладать достаточной пластичностью ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и ударной вязкостью (КСУ). Наряду с этим, чтобы избежать внезапных поломок в условиях эксплуатации, необходимо учитывать трещиностойкость материала. В данном случае трещиностойкость – группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины. Количественная оценка трещиностойкости основывается на линейной механике разрушения. В соответствии с линейной механикой разрушения следует, что очагами разрушения высокопрочных материалов служат небольшие трещины технологического происхождения (прошивка крепежных отверстий затупленным пуансоном или недостаточный нагрев заготовки), а также трещиноподобные дефекты (неметаллического включения, скопления дислокаций и т. п.). Высокопрочные материалы, как и хрупкие, чрезвычайно чувствительны к таким дефектам. Высокопрочные материалы хотя и обладают определенной пластичностью, однако для них реальную опасность представляют трещины критической длины [16]. Оценку надежности высокопрочных материалов по размеру допустимого дефекта (меньше критического) проводят по критериям Ж. Ирвина [16].

Ударную вязкость материалов оценивают критериями КСУ, КСТ, КСВ [16]. Основным критерием ударной вязкости является КСУ, который складывается из двух составляющих:

$$КСУ = КС_3 + КС_p, \quad (4.9)$$

где  $КС_3$  – работа зарождения трещины;

$КС_p$  – работа распространения трещины ( $КС_p \approx КСТ$ ).

Критерий КСТ является критерием трещиностойкости, оценивающим сопротивление материала распространению трещины. Параметр КСТ, определяемый на образцах с трещиной усталости у основания надреза, характеризует работу развития трещины при ударном изгибе. Он оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Считается [16], что если материал имеет  $КСТ = 0$ , то процесс его разрушения идет без затраты работы. Такой материал является хрупким и эксплуатационно ненадежным.

Следует учитывать, что если ударная вязкость двух сталей при одинаковой температуре одинакова, то переход в хрупкое состояние зависит от их зернистости. Для мелкозернистой стали температурный порог хладноломкости значительно превышает этот показатель по сравнению с крупнозернистым строением [16].

Решение проблемы создания конкурентоспособной металлопродукции на данном этапе заключается в освоении нанотехнологии. Технологии производства, в том числе и технологии изготовления сменных деталей рабочих органов с.-х. техники, должны обеспечивать формирование мелкозернистой структуры.

Получение такой структуры всегда представляло собой сложную научно-техническую задачу. В наши дни решение такой проблемы просматривается в развивающейся индустрии наносистем, обеспечивающих приоритетные преимущества производимой продукции: качество, низкая себестоимость, высокая производительность труда.

Такой качественный прорыв в области производства конкурентоспособных сменных деталей рабочих органов с.-х. машин обеспечит опыт применения сталей пониженной прокаливаемости.

К настоящему времени созданы и проверены в производственных условиях отечественные материалы и технологии упрочнения различных по конструкции быстроизнашивающихся сменных деталей рабочих органов с.-х. техники. Изготовленные с их применением изделия имеют высокий технический уровень, сопоставимый с лучшими зарубежными аналогами [18].

Выполненные в последние годы комплексные НИОКР с участием ученых и специалистов ГНУ «ИПМ», УО «БГАТУ» и ГНУ «ФТИ» и разработанные ими технологические основы получения нанокomпозиционного строения поперечного сечения изделий, послужили получению субмикро- и нанокристаллической структуры деталей. Это позволило придать им целый ряд свойств, которые невозможно получить в материалах с традиционной поликристаллической структурой. Внешние поверхности трения таких изделий имеют фрагментированную дисперсную структуру мартенсита, обладающую комплексом высоких механических свойств: твердость около 60 HRC; прочность не менее 2000 МПа;



ударная вязкость свыше 1 МДж/м<sup>2</sup>; коэффициент относительной абразивной износостойкости не менее 3,0–3,5. Эти показатели являются основными критериями, характеризующими работоспособность деталей рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин, что подтверждено в ходе присочных испытаний изделий. В настоящее время имеется реальная возможность осуществления отечественного производства деталей рабочих органов машин, конкурентоспособных на внутреннем и внешнем рынках, через его технологическую модернизацию.

На основании научных публикаций последнего десятилетия по проблемам нанотрибологии [31] и материаловедения [32, 33, 34], можно заключить, что для повышения работоспособности металлических материалов, обеспечения достаточной надежности и долговечности сменных деталей машин необходимы следующие шаги:

1. Взять за основу в разработке новых упрочняющих технологий структурную теорию конструкционной прочности материалов и ее главный вывод об эффективных дислокационных моделях упрочнения.

2. Активизировать дислокационную модель упрочнения, создавая дисперсные избыточные фазы нанометрового размера с равномерным распределением в объеме ультрамелких (~1 мкм) зерен матрицы сплава.

3. При разработке новых упрочняющих технологий стремиться получать ультрамелкое зерно (~1 мкм) матрицы сплава, реализуя дислокационную модель упрочнения, но не переходить при этом опасную зону снижения вязкости.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Машиностроение : энциклопедия: в 40 т. М. : Машиностроение, 2002. Т. IV–16.
2. Андрияков Ю. М., Лопатин М. В. Квалиметрические аспекты управления качеством новой техники. Л. : ЛГУ, 1983.
3. Кочетов В. В. Оценка технического уровня машин и оборудования. 1981, № 3 // Стандарты и качество.
4. Фомин В. М. Автоматизация и система оценки технического уровня продукции. 1991, № 2 // Стандарты и качество.

5. Буклягин Д. С. Технический уровень сельскохозяйственной техники. М., 1993.

6. Шило И. Н., Дашков В. Н. Ресурсосберегающие технологии сельскохозяйственного производства. Минск : БГАТУ, 2003.

7. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т. Т. 1. М. : Наука и технологии, 2004.

8. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т. Т. 2. М. : Наука и технологии, 2004.

9. Энциклопедический справочник термиста-технолога: в 3 т. Т. 3. М. : Наука и технологии, 2004.

10. Ерохин М. Н., Новиков В. С., Сабуркин Д. А. Выбор марки стали для лемеха плуга. 2008, № 1 // Тракторы и сельскохозяйственные машины.

11. Бескалсв С. А. Металловедческие аспекты в процессах разрушения металлических материалов при трении. 2009, т. 10 // Успехи физики металлов.

12. Рыбин В. В., Малышевский В. А., Хлусова Е. И. Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей. 2009, № 6 // Металловедение и термическая обработка металлов.

13. Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение. Минск : Беларуская навука, 2009.

14. Нанотехнологии. Азбука для всех. М. : Физматлит, 2009.

15. Волокушин В. Д. Металловедение и термическая обработка. Винница : Книга-Вега, 2005.

16. Металловедение. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

17. Герасимова Л. П., Ежов А. А., Марсеев М. И. Изломы конструкционных сталей : справочник. М. : Металлургия, 1987.

18. Бетень Г. Ф., Литовчик Д. П., Голубев В. С. Методы повышения конкурентоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники : сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2007.

19. Колпаков С. Е., Паршин В. А., Чеховой А. Н. Нанотехнологии в металлургии стали. 2007, № 8 // Сталь.

20. Мальцев И. М., Седунов А. Н. Программный комплекс выбора марки машиностроительной стали. 2010, № 2 // Металловедение и термическая обработка металлов.

21. Никитин М. В., Маслюк В. М., Лазько Н. В. Повышение износостойкости конструкционных сталей за счет металлургических факторов производства. 2010, № 1 // Металлургия.

22. Столяров В. В. Особенности механических свойств наноструктурных сплавов. 2010, № 3 // Вестник научно-технического развития.

23. Хлусова Е. И., Орлов В. В., Луценко А. Н. Новые высокопрочные стали. 2008, № 3 (5) // Стройматериалы.

24. Рыбин В. В. [и др.]. Формирование структуры и свойства низкоуглеродистой низколегированной стали при термомеханической обработке с ускоренным охлаждением. 2007, № 4 (52) // Вопросы материаловедения.

25. Никитин М. В., Маслюк В. М., Лазько Н. В. Повышение износостойкости конструкционных сталей за счет металлургических факторов производства. 2010, № 1 // Металлург.

26. Гузенков С. А. [и др.]. Повышение конструкционной прочности литой стали модифицированием дисперсными порошками. 2010, № 3 // Сталь.

27. Шамари У. Концепции инновационных материалов для транспортных средств будущего. 2009, № 8 // Черные металлы.

28. Лободюк В.А., Эстрин Э. И. Мартенситные превращения. М. : Физматлит, 2009.

29. Котречко С. А., Мешков Ю. А. Новые подходы к оценке комплекса механических свойств конструкционных сталей. 2009, № 3 // Металлофизика новейших технологий.

30. Справочник проектировщика. Металлопродукция. Otava, Кенуи, Rautaruuki, 1996.

31. Тушинский Л. И. Проблемы нанотрибологии // Технология машиностроения. № 6. 2010.

32. Кудря А. В. Роль разномасштабных структур в обеспечении пластичности и вязкости структурно-неоднородных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. № 5. 2005.

33. Тушинский Л. И. Структурная теория конструкционной прочности материалов. Новосибирск : НГТУ, 2004.

34. Тушинский Л. И. Механические свойства наноструктурных материалов // Технология металлов. № 2. 2009.

## РАЗДЕЛ 5

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

#### 5.1. Контроль качества на этапах производства деталей

Условия работы ДРОМ являются определяющими при выборе материала и технологии их изготовления. Абразивная среда (песок, глина, гравелистые частицы и камни), в которой эксплуатируются сменные ДРОМ, создаст экстремальные условия для их работы.

Для обеспечения длительной эксплуатации сменных ДРОМ, работающих в тяжелых условиях абразивного изнашивания, характерных для почв республики, необходимо при их производстве применять качественные конструкционные стали и соответствующие технологии их упрочнения. Здесь полезным является опыт западноевропейских производителей с.-х. машин. Фирмы-производители применяют определенную систему контроля качества изготовления сменных деталей рабочих органов машин на различных стадиях производственного процесса: входной контроль исходного материала; постоянный контроль при осуществлении технологических операций; испытания деталей на ресурс.

Западноевропейские фирмы-производители почвообрабатывающих и посевных машин используют более 30 марок стали с различными свойствами. В обязательном порядке поставляемый специализированными фирмами-поставщиками металлопрокат подвергается входному контролю его качества (соответствие химсоставу). Ключевое место при производстве ДРОМ специалисты фирм отводят целенаправленной термической обработке, обеспечивающей изделиям соответствующее структурное строение и твердость. Поэтому, после входного контроля качества стального проката, контроль осуществляется на всех последующих операциях технологического маршрута.

Весьма полезным является зарубежный опыт контроля размеров и формы сложных трехмерных (сферических дисков, отвалов и т.п.)

деталей. Такие детали после изготовления подвергают сканированию в лаборатории при помощи специального лазерного сканера, сравнивая измеренные величины с заданными в рабочем чертеже. Отклонения в пределах 0,1 мм отображаются на мониторе определенным цветом. Такая система контроля качества производства деталей позволяет оперативно реагировать на нарушения в технологической цепочке получения изделий и принимать своевременные меры по их устранению. Новые сконструированные детали, подвергающиеся высокой нагрузке и интенсивному изнашиванию в эксплуатационных условиях, проходят многостадийное испытание на специальных стендах и в полевых условиях.

Такой опыт производства ДРОМ должен осваиваться отечественными производителями.

Поэтому технические решения, направленные на освоение конкурентоспособной продукции (сменные детали) для комплектования рабочих органов машин, должны включать комплекс технологических операций на всех этапах производства изделий.

#### 5.2. Применение сталей пониженной прокаливаемости

Для изготовления опытных партий деталей корпусов плугов: лемехов, грудей отвалов, полевых досок – использовалась сталь 60ПП, которая обеспечивает пониженную прокаливаемость при термической обработке и содержит: углерода – 0,4–0,85 %, марганца – не более 0,2 %, кремния – не более 0,2 %, хрома – не более 0,1 %, никеля – не более 0,1 %, меди – не более 0,1 %, алюминия – 0,03–0,1 %, титана – 0,06–0,12 %, ванадия – не более 0,4 %, остальное – железо [2].

Основным преимуществом этой стали (в сравнении с другими, до настоящего времени используемыми для изготовления деталей корпусов плугов) является наличие в химическом составе меди, алюминия и ванадия. Это позволяет использовать сталь 60ПП в тяжело нагруженных деталях машин и успешно конкурировать со сталями 65Г, 60С2А и др.

После закалки достигается твердость поверхностного слоя более 58–60 HRC и сверхмалое зерно ( $\approx 11$ –12 балл). Закалочная температура находится в диапазоне от  $A_{c3}$  до  $A_{c3} + 100$  °С.

Использование стали 60ПП хорошо согласуется с методом объемно-поверхностной закалки (ОПЗ), который применяется для конструкций ответственных деталей [2]. Эффект достигается за счет быстрого охлаждения детали быстродвижущейся волной воды.

Этот метод имеет преимущество перед известными, применяемыми в практике термического упрочнения. Метод позволяет получить поверхностную контурную закалку и, одновременно, упрочненную сердцевину на деталях сложной формы с достижением высоких прочностных и служебных свойств в сравнении с другими способами упрочнения: цементацией, нитроцементацией, термическим упрочнением. При этом поверхностная твердость достигает величины HRC 58–65, а сердцевина – HRC 35–55 (рис. 5.1–5.3).

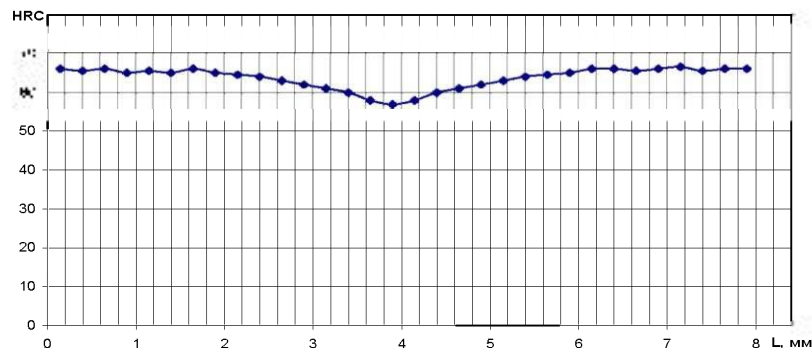


Рис. 5.1. Распределение твердости по толщине 8 мм опытных образцов из стали 60ПП

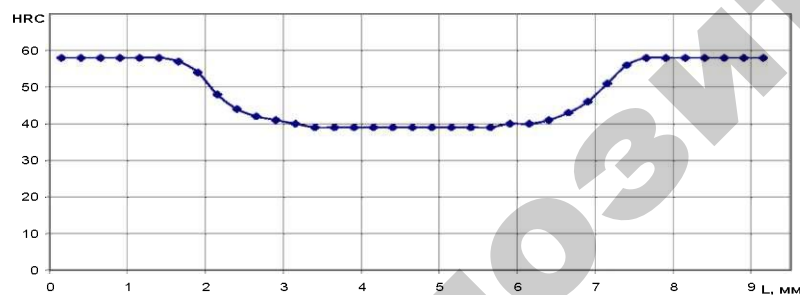


Рис. 5.2. Распределение твердости по толщине 9 мм опытных образцов из стали 60ПП

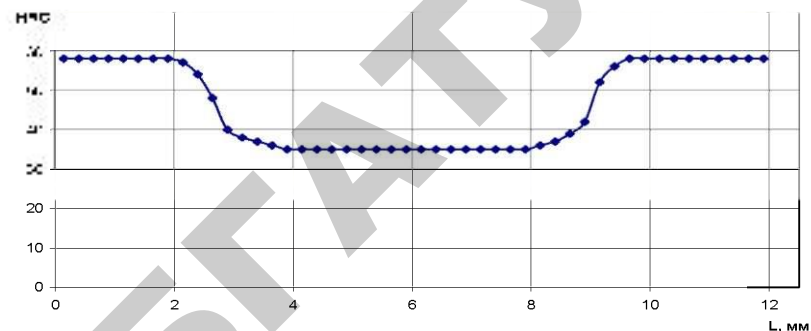


Рис. 5.3. Распределение твердости по толщине 12 мм опытных образцов из стали 60ПП

Сталь ПП 1-го поколения имеет следующие модификации: сталь 58ПП ГОСТ 1050–88, сталь 54ПП и сталь 60ПП по ТУ завода-изготовителя. Отличительной особенностью серийных сталей 1-го поколения является их химический состав, позволяющий получить зерна аустенита бальностью 10–12 по ГОСТ 639–89 и достаточно высокий комплекс механических свойств.

Опыт применения этих сталей показал, что в связи с повышенным содержанием марганца, хрома, никеля и меди (более 0,2 % каждого и в сумме – более 0,5 % идеальный критический диаметр закалки отличается большим разнообразием (10–15 мм), что зачастую приводит к нежелательному снижению глубины закалки.

Стали ПП 2-го поколения отличаются более узкими и стабильными интервалами прокаливаемости ( $D_{кр} = 8–10$  мм, 10–12 мм и 12–14 мм) с размером зерна аустенита – 11–12 балл (при индукционном нагреве) и 10–11 балл – при печном нагреве. Указанные преимущества достигаются за счет раскисления плавки алюминием, который, взаимодействуя с азотом, образует мелкодисперсные нитриды, препятствующие росту зерен аустенита при нагреве под закалку методом ОПЗ.

В сталях 2-го поколения примеси марганца, кремния, хрома, никеля и меди не превышают 0,1 % каждого в связи с тем, что они специально не вводятся в их состав. Промышленная выплавка таких сталей возможна только в случае использования чистой шихты. Марганец и кремний добавляют в количествах 0,1–0,2 % каждого в зависимости от толщины упрочняемого ОПЗ элемента детали.

Сталь ПП 2-го поколения позволяет применять печной нагрев без ущерба качеству. Источниками питания индукционных нагревателей рекомендуются тиристорные и транзисторные преобразователи частоты с обеспечением программного управления процессом ОПЗ с отечественными микропроцессорными системами автоматизации и регулирования.

### 5.3. Методы получения заготовок

При изготовлении сменных деталей рабочих органов машин, с учетом их конструктивных особенностей, преимущественно используется листовой металлопрокат. Из металлического листа путем его раскроя изготавливают заготовки определенной формы с целью их дальнейшей обработки и получения конечного продукта.

Существуют два основных способа получения заготовок из листового материала металлов:

1) механическое воздействие: разрезание ножницами, фрезерование, сверление, штампование, распиловка и т. д.

2) термическое воздействие (понятие «термическое резание» может быть представлено общим определением «резание струей»:

– лазерная резка металла: поток светящихся частиц (фотонов);  
– плазменная резка металла: плазменная струя (поток ионизированных частиц);

– резка металла водой: струя воды под высоким давлением (с добавлением абразива – гидроабразивная резка металла, без добавления абразива – гидрорезка металла);

– кислородная резка металла: струя кислорода (иногда с примесью порошка железа);

– резка металла методом электрической эрозии.

Фундаментальное различие этих двух способов резки заключается в том, что при термическом воздействии абсолютно исключен факт применения силы, независимо от толщины разрезаемого материала.

При выборе способа промышленного раскроя листового стального проката следует учитывать, что, в конечном итоге, является приоритетной целью:

- скорость резки;
- наибольшая универсальность установки;
- минимальный уровень вредных воздействий;

- простота в применении и хорошие качественные показатели резки;
- экономичность;
- возможность обеспечения расходными материалами и их низкая стоимость.

*Раскрой листа механическим воздействием (резка на ножницах, штампование, распиловка).* Достоинствами способов являются: высокая скорость резки и производительность в случае разрезания перфорированного материала, низкая себестоимость производимых работ, отсутствие зоны термического воздействия. Недостатки: возможны деформации и механические повреждения, высокий уровень шума, высокая стоимость инструмента, невозможность изготовления сложных форм, неровный срез.

*Резка лазером.* К положительным моментам можно отнести: высокую скорость резки тонколистового материала, экономию материала благодаря малой ширине разреза (рис. 5.4), незначительную зону термического воздействия, отсутствие деформации материала, возможность получения различных форм при резке.

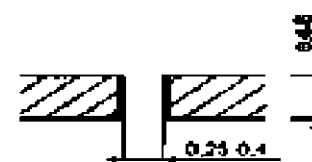


Рис. 5.4. Ширина разреза при лазерном раскрое листового материала

Недостатки: некоторые материалы не могут быть разрезаны лазером как по причине явления отражения (например, серебро), так и из-за прозрачности материала (стекло), высокая стоимость установки, высокая стоимость ремонта. Лазер не может использоваться для резки металлов толщиной более 2 см.

*Плазменная резка.* Достоинства: возможность получения различных форм при резке, отсутствие деформации материала, высокая скорость при малой толщине реза (рис. 5.5).

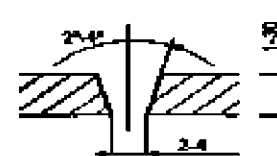


Рис. 5.5. Форма и ширина разреза при плазменном раскрое листового материала

Недостатки: резать можно только электропроводные материалы, разрезаемый материал требует надежного электроизоляции, высокая стоимость оборудования.

*Резка металла водой с абразивом (гидроабразивная резка)* – струя воды с абразивом под высоким давлением. К положительным сторонам такого способа можно отнести следующее: не выделяется тепло, не нагревается поверхность разрезаемого материала, отсутствует зона термического воздействия, нет выбросов газа и токсичных испарений, получение различных форм при резке, возможность резки несколькими резаками одновременно, отсутствие прожигания и окалины (рис. 5.6).

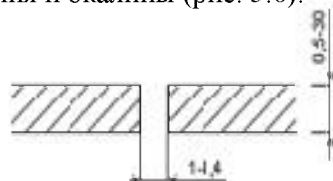


Рис. 5.6. Форма и ширина разреза при гидроабразивном раскрое листового материала

В качестве недостатков необходимо отметить низкую скорость реза тонколистовой стали, одноразовое использование абразивного материала, быстрый износ рабочих деталей установки, трудности с очисткой сточных вод, высокий уровень шума при работе и высокую стоимость установки.

*Кислородная резка.* Достоинства: широкий выбор толщины резки (до 1500 мм), низкая стоимость оборудования и незначительные расходы при обслуживании, различные положения резки.

Недостатками можно считать: резку только углеродистых сталей, низкую скорость резки небольших толщин (менее 30 мм), широкий разрез, значительную зону термического воздействия (рис. 5.7), зависимость качества резки от состояния поверхности материала.



Рис. 5.7. Форма и ширина разреза при кислородной резке материала

*Электроэрозия.* Достоинства: возможность резки толстолистового материала (до 400 мм), высокая точность резки (5 мкм), возможность резки сразу нескольких листов малой

толщины (уложенных в пакет), возможность резки гофрированного материала. Недостатком является низкая производительность.

С учетом достоинств и недостатков вышеприведенных способов наибольший интерес, применительно к технологиям изготовления заготовок деталей рабочих органов машин из листового материала, представляют лазерный и плазменный способы.

### 5.3.1. Лазерный раскрой листового материала

Лазерная резка листа – это один из самых эффективных способов раскроя металла и других материалов. Лазерная резка металла отличается рядом значительных преимуществ перед другими способами резки: обеспечивает высокое качество получаемых деталей и высокую производительность, позволяет существенно сократить сроки изготовления. Резка производится лазерным лучом большой мощности, который сфокусирован на разрезаемой поверхности.

В обычном состоянии лазерный луч имеет достаточно большую ширину – несколько миллиметров или сантиметров, и ничего не способен резать, а только разогревает заготовку. Чтобы лазерный луч мог резать металл, на его пути устанавливают оптическую линзу, которая фокусирует луч на месте реза (рис. 5.8).

После фокусировки ширина лазерного луча уменьшается до 0,2 мм – это позволяет создать отверстие такого же диаметра или больше.



Рис. 5.8. Фокусировка лазерного луча на месте реза

Лазерная резка отличается малым допуском реза и отсутствием механического давления на обрабатываемую деталь. Это позволяет получать изделия любой сложности, в том числе и из легкодеформируемых и хрупких материалов.

Есть и другие положительные особенности лазерной резки.

1. Поверхность реза листа получается наиболее гладкой из всех видов реза и не требует последующей обработки.
2. Высокая скорость лазерной резки. Большая мощность лазерного излучения позволяет выполнять рез с очень высокой скоростью.
3. Экономичность. Процесс резки не требует больших денежных затрат.
4. Легкость настройки программного обеспечения оборудования для лазерной резки.
5. Точность позиционирования лазерной головки составляет 0,08 мм, за счет чего достигается высокая точность взаимного расположения элементов заготовок.

Все это позволяет изготавливать изделия любой сложности, в любом количестве и практически из любого материала при минимальном количестве отходов.

Лазерная резка производится на современном оборудовании с ЧПУ (числовое программное управление). Лазерный технологический комплекс состоит из лазера, координатного стола и управляющего компьютера. Для резки металла толщиной до 3 мм в качестве режущего инструмента можно использовать твердотельный лазер. Наиболее универсальным считается оборудование с использованием лазера на углекислом газе, который имеет наиболее широкий диапазон применения.

Первоначально лазерным лучом прожигается отверстие в заготовке. Затем происходит собственно резка. В зависимости от режима резки через форсунку на обрабатываемый участок поверхности направляется струя технологического газа, в атмосфере которого и происходит процесс резки. Согласно программе ЧПУ лазерная головка перемещается по заданной траектории, при этом происходит резка материала в области воздействия излучения и его выдув струей газа (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Лазерная резка стального листа

Продукты горения удаляются при помощи дымоотсоса через каналы, расположенные в нижней части координатного стола. При этом обеспечивается отсутствие облоя на нижней кромке реза, высокая точность и малая зона теплового воздействия.

В результате нагрева разрезаемые материалы (особенно большой толщины) меняют свои свойства, причем по-разному. В зависимости от толщины и химического состава материала, а также размера и кривизны вырезаемого контура предусмотрены разные технологии резки и режимы работы лазерной установки.

*Технологии лазерной резки. Лазерная резка с использованием газа.* Разделяют две технологии лазерной резки: резка в среде кислорода низкого давления и резка в среде инертного газа (азот или аргон) высокого давления.

Большое значение для нормальной работы лазеров имеют чистота и состав примесей технологических газов. Содержание нежелательных примесей (например, углеводородов), приводящее к повреждению лазерной оптики, не должно превышать 0,005 %. Обычно для лазерной резки используют газы с чистотой 99,999 %.

*Лазерная резка в среде кислорода.* Кислород при лазерной резке используется для повышения температуры. В кислородной среде металл начинает гореть, и за счет этого происходит резкий скачок температуры в зоне реза. Такое повышение температуры важно при резке высокопрочных углеродистых сталей, а также для увеличения скорости резки.

Давление в струе кислорода от 3–4 атм при резке тонкого листа и до 0,5 атм при резке листа толщиной до 25 мм, причем оно тем меньше, чем больше толщина разрезаемого металла.

*Лазерная резка в инертном газе.* Применяется в тех случаях, когда нежелательно окисление кромок металла, например, при резке нержавеющей стали, титана, алюминиевых сплавов. Эффективность резки в инертном газе ниже, чем при лазерно-кислородной резке, за счет отсутствия дополнительного источника нагрева.

При резке металла нередко наблюдается потемнение по краям реза. Оно вызвано оксидами (окалиной), которые образуются при разогреве металла. Использование инертных газов при лазерной резке предотвращает образование оксидов и позволяет избежать потемнения среза.

Когда лазерное излучение нагревает металл до температуры плавления, расплав выдувается мощной струей инертного газа. Такой режим требует большой мощности лазера, высокого качества

излучения и высокого давления режущего газа, подаваемого в зону резки (до 16 атм). В качестве инертного газа обычно используется азот или аргон.

Выбор режима лазерной обработки зависит от разрезаемого материала и возможностей технологического оборудования. Существуют два основных режима резки: импульсный и непрерывный.

Самым простым режимом и исторически первым является непрерывный режим лазерной резки. В процессе резки луч лазера не меняет своей мощности. В этом режиме обычно режутся особо прочные и тугоплавкие материалы, требующие большого нагрева.

В импульсном режиме лазерный луч подается короткими импульсами. Этот режим используется для резки малых отверстий (менее толщины металла). Используя импульсный режим, можно снизить зону теплового воздействия. При резке высокоотражающих материалов этот режим позволяет достичь пороговой интенсивности при меньшей средней мощности.

На современном оборудовании резка металла осуществляется с использованием газа. Такой режим называется расплавным. При этом режиме резки металла лазерное излучение нагревает материал до температуры плавления и плавит его. Расплав выдувается мощной струей инертного газа.

Расплавной режим резки металла обеспечивает высокое качество торцевой поверхности реза, отсутствие облоя на нижней кромке реза, высокую точность и малую зону теплового воздействия.

### 5.3.2. Плазменный раскрой листового материала

При плазменной резке происходит локальное расплавление металла и выдувание жидкого металла потоком плазмообразующего газа. Металл плавится под совместным воздействием электрической дуги, горячей между плазмотроном и обрабатываемой деталью, и потока плазменного газа.

Электрическая дуга воздействует на газ под давлением. Происходит разьединение, ионизация и возбуждение молекул, и газ переходит в состояние плазмы. В таком виде он проходит через охлажденную форсунку. Высокотемпературный поток плазмы (от 10 000 до 25 000 °С) со скоростью от 500 до 1500 м/с вырывается из отверстия форсунки в форме цилиндрической колонны небольшого сечения, плавит металл и удаляет расплавленную массу, оставляя ровный и гладкий разрез (рис. 5.10).

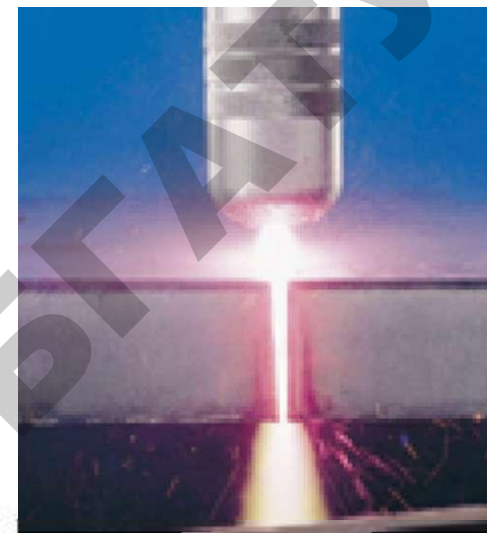


Рис. 5.10. Плазменная резка стального проката

Первоначально зажигание дуги происходит между электродом и форсункой с помощью источника высокочастотных импульсов или же в результате короткого замыкания между электродом и форсункой.

Для осуществления процесса резки дуга «переносится» на разрезаемый материал, поэтому способ плазменной резки применим только для электропроводных материалов.

Источником электроэнергии, необходимой для образования плазмы, является генератор постоянного тока.

Для охлаждения в установках малой мощности используется сжатый воздух, а в установках большой мощности – жидкость с высокой теплопроводностью и низкой электропроводностью, например, дистиллированная вода. Качественные показатели резки (скорость, толщина и т. д.) зависят от используемого плазменного газа.

Так, для уменьшения шероховатости реза в качестве плазмообразующего газа используют кислород или промышленный воздух, для резки металла большой толщины лучше использовать аргонводородную смесь. А смесь воздуха или азота с водой позволяет минимизировать количество вредных выбросов.

Плазменная резка имеет еще одну важную характеристику – скорость резки, которая оказывает существенное влияние на качество. При пониженной скорости плазмообразующий газ расходуется нерационально, что приводит к образованию шлака на нижней стороне обрабатываемого материала. При повышенной скорости плазменной



резки дуга осциллирует, из-за чего линия реза получается волнистой. При этом также образуется шлак, отделение которого затруднено.

Плазменная резка эффективна при выполнении следующих видов работ:

- плазменная резка нержавеющей стали и цветных металлов: классический способ кислородной резки в этом случае не может быть применен вообще, а лазерная резка ограничена возможностью резки только определенных толщин;

- плазменная резка углеродистых марок стали малой и средней толщины (< 30 мм);

- серийное производство металлических деталей;

- плазменная резка сложных геометрических форм, исключая деформацию разрезаемого материала.

Для плазменной резки листового проката, как правило, используются автоматические линии, в которых высота горелки для плазменной резки регулируется автоматически, имеется устройство, позволяющее осуществлять поиск начальной точки резки. Диаметр сопла, подающего плазму, колеблется обычно от 0,6 до 10,0 мм, точность реза составляет  $\pm 0,1$  мм, скорость резки стального листа толщиной 10 мм от 1,5 м/мин (в зависимости от мощности установки).

Габариты материала в случае плазменной резки могут быть от 4,5 м в длину и до 2 м в ширину. Обычно имеется возможность установки дополнительного оборудования:

- сменных столов для подачи разрезаемых листов;

- различных прижимных устройств;

- маркировочных устройств.

Но у плазменной резки есть один недостаток – оплавление края реза. При этом край термически упрочняется, и в изделиях возможно появление трещин при последующей гибке. Чтобы края металла не сильно оплавились, весь процесс можно вести в среде газа или жидкости (жидкость дает дополнительное охлаждение). Кроме того, до перехода к дальнейшим операциям необходимо сделать дополнительную термообработку нарезанных заготовок (отжиг, нормализацию и т. п.), но иногда бывает достаточно просто зачистить оплавленные края.

Если сравнивать лазерную и плазменную резку, можно сказать, что в тонких материалах (до 6 мм) и у лазерной, и у плазменной резки показатели производительности и качества примерно одинаковые. А вот с повышением толщины материала плазменная

резка работает чуть хуже лазерной. В процессе лазерной резки материал не успевает так разогреваться, как при плазменной, там явления термического упрочнения краев реза сглаживаются, и качество конечного продукта не страдает.

Лазерная резка металла отличается меньшим количеством отходов, меньшим допуском реза. По сравнению с плазменной резкой металла, у лазерной значительно выше точность позиционирования режущего инструмента (0,08 мм против 0,38 мм), есть возможность создавать отверстия диаметром от 0,2 мм. При резке металла кромки реза находятся под прямым углом по отношению к разрезаемой поверхности.

И в плазменных, и в лазерных установках идет в основном 2- и 3-координатная обработка материала. Современные установки могут вести 5-координатную резку, которая позволяет держать инструмент строго вертикально к разрезаемой плоскости (так называемое сопровождение). Точность реза такого оборудования чрезвычайно высокая.

### 5.3.3. Формообразование заготовок и рабочей части термопластической обработкой

Наряду с применением плазменного или лазерного раскроя листового стального проката при получении заготовок ДРОМ используют методы обработки давлением.

Одной из сложных технических задач является формообразование заготовок с рабочей частью переменного сечения. Анализ опыта получения таких заготовок отечественными и зарубежными фирмами позволяет заключить следующее. В заводской практике (ПО «Одессапочвомаш») при производстве лемехов использовалась технология вальцовки лезвийной части при температуре 650–700 °С. Высокая жесткость валкового узла установки позволяет получить лезвие толщиной 0,5 мм. На Оршанском ремонтном заводе и Минском заводе шестерен получила применение технология формообразования лезвий способом фрезерования. Известны примеры использования технологий кузнечнойковки и литья заготовок лемехов и долот, а также использование технологии продольной и поперечно-клиновой прокатки (ОАО «Дрогоичинский ТРЗ»).

На рис. 5.11 представлена схема технологического маршрута формообразования заготовки лемеха из стального прутка кузнечнойковки в треххручьевом штампе на пневматическом ковочном молоте.

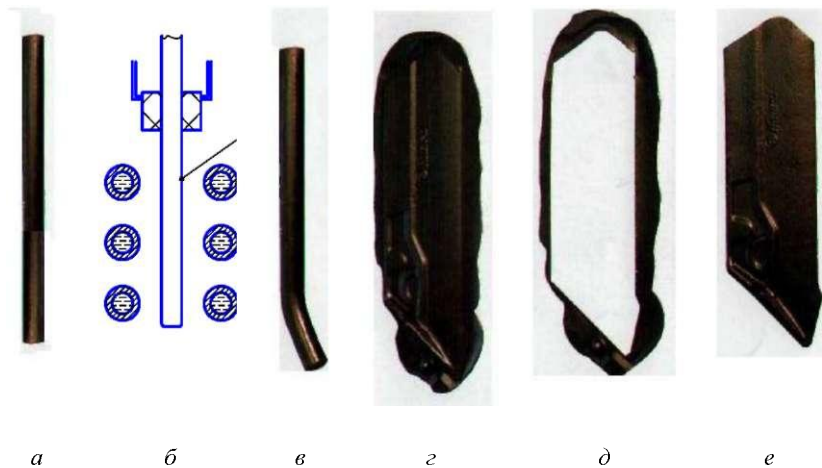


Рис. 5.11. Схема технологического маршрута

формообразования заготовки лемеха из стального прутка:

*a* – исходный материал (пруток Ø53 мм, длиной 520 мм); *б* – нагрев прутка в индукторе до 1150–1200 °С; *в* – изгиб прутка; *г* – формообразование кузнечной ковкой; *д* – вырубка заготовки (обрезка облоя); *е* – заготовка заданной формы

Применение метода поперечно-клиновой прокатки (ПКП) 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. Получаемые методом ПКП детали отличаются высокими прочностью и износостойкостью в процессе эксплуатации.

Схема осуществления ПКП показана на рис. 5.12. Заготовка, предварительно нарубленная на прессе, укладывается поперек заходной части неподвижного клинового инструмента. Подвижный клиновой инструмент перемещается параллельно неподвижному, внедряется в заготовку, вызывая ее вращение. Оба клиновых инструмента имеют боковые грани *М*, которые заставляют перемещаться избытки металла по направлению к торцам, тем самым удлиняя заготовку. Оставшаяся часть металла профилируется калибрующими поверхностями *К* инструмента, приобретая их негативный профиль. Так, непрерывно перекачивая заготовку вдоль неподвижного клинового инструмента, последовательно от центральной части к торцам,

оформляют требуемый профиль детали. На заключительной стадии прокатки специальными ножами *Н*, установленными по обе стороны инструмента, отрезают избытки металла от окончательно спрофилированной детали. Прокатанную деталь удаляют, а подвижный инструмент возвращается в исходное положение.

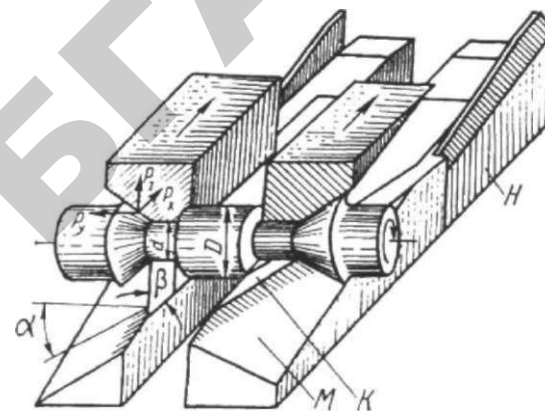


Рис. 5.12. Схема поперечно-клиновой прокатки

Геометрия клинового инструмента характеризуется углом заострения *P* и углом наклона боковой грани *a*. Интенсивность формоизменения при прокатке определяется степенью обжатия:  $\delta = D/d$ , где *D* – исходный диаметр заготовки; *d* – прокатываемый диаметр.

Методом ПКП могут обрабатываться практически все конструкционные стали, ряд инструментальных сталей, а также сплавы на основе меди, титана, никеля, циркония. В процессе эксплуатации прокатанные изделия отличаются более высокой прочностью и износостойкостью. За один проход инструмента диаметральные размеры могут быть уменьшены в 4–8 раз. При этом обеспечивается изготовление деталей или полуфабрикатов диаметром от 2 мм до 120 мм длиной от 40 мм до 1000 мм, достигаемая точность ±0,1 мм, максимально достигаемая чистота поверхности – 0,6 Ra [1].

*Зуб легкой бороны.* Зуб легкой бороны (рис. 5.13а) представляет собой цилиндрический стержень диаметром 14 мм. С одной стороны имеется коническое заострение, с другой – резбовой участок и лыски, удерживающие зуб от проворота при заворачивании гайки при сборке бороны.

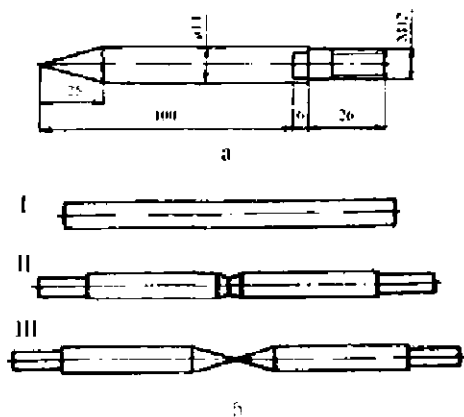


Рис. 5.13. Чертеж зуба легкой бороны (а) и технологические переходы процесса ПКП (б)

Для увеличения коэффициента трения между заготовкой и инструментом с целью достижения стабильности прокатки и избежания проскальзывания заготовок на деформирующих гранях инструмента нанесена технологическая насечка. Это позволяет получить значительные степени обжатия исходных заготовок за один проход.

Последовательность образования геометрических элементов на зубьях борон при ПКП показана на рис. 5.13б. Исходная заготовка на два зуба нагревается в нагревательном устройстве токами высокой частоты на участках, подвергасмых прокатке, по концам и в средней части на длине 20 мм. Процесс начинается с прокатки цилиндрических участков по концам заготовки и образования конических наметок в средней части под последующее разделение. Одновременная прокатка цилиндрических участков и образование конических заострений невозможно из-за большой продольной деформации заготовки при разделении. Поэтому разделение зубьев происходит после выхода заготовки из контакта с боковыми клиньями.

Инструмент для ПКП изготавливают из инструментальной стали Р6М5. Стойкость одного комплекта инструмента составляет 1 млн деталей. Точность и чистота поверхности, достигаемая при прокатке зубьев борон, позволяют производить накатку резьбы без механической обработки прокатанных цилиндрических участков.

Конструктивной особенностью рабочих органов почвообрабатывающей и кормоуборочной сельскохозяйственной техники является наличие заостренных лезвийных частей. Традиционной технологией изготовления лезвий на заготовках является операция фрезерования в специальных приспособлениях, обеспечивающих получение нужного угла заострения лезвия и его толщину.

Разработанный и запатентованный ГНУ «ФТИ НАН РБ» способ продольно-поперечной прокатки лезвийных частей является наиболее экономичным в отношении производительности и коэффициента использования металла. 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, объемное 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.

Рассмотрим особенность формирования субструктуры ОЦК-металла, к которой относится весь спектр железоуглеродистых сплавов, применяемый в качестве рабочих органов с.-х. техники.

В основу любой термопластической обработки положен такой принцип изменения структуры, который позволял бы получать высокий уровень свободной энергии системы при равномерном распределении дефектов кристаллической решетки и супермелком зерне в деформируемом объеме. Пластическая деформация в дорекристаллизационной температурной зоне позволяет увеличить плотность дефектов кристаллической решетки металла и его механические свойства, то есть своеобразным образом упрочнить металл. Однако в каждом отдельном случае степень

этого упрочнения и механизм структурообразования могут быть различными и приводить в конечном итоге к неодинаковым результатам. Следовательно, при разработке конкретного технологического процесса данное обстоятельство следует, очевидно, учитывать с тем, чтобы оптимизировать как схему, так и параметры этого процесса.

В силу поликристаллического строения все металлы при пластическом деформировании упрочняются за счет движения и взаимодействия дефектов кристаллической решетки, при этом их плотность увеличивается. На это свойство в свое время указывал Одинг И. А. [1], предложив диаграмму зависимости сопротивления металлов деформированию от плотности дислокаций.

Кривая изменения относительной величины сопротивления деформации в зависимости от плотности дислокаций  $\sigma/\sigma_m = f(\rho)$  (рис. 5.14) отвечает деформированию на всех его стадиях, начиная от идеального кристалла ( $\rho = 0$ ) и заканчивая предельной гипотетической степенью деформации ( $\rho = \rho_{кр}$ ), когда, по существу, отсутствует упорядоченное размещение атомов, и металл является, по сути дела, аморфным телом. На осях диаграммы отложены:  $\sigma/\sigma_m$ , где  $\sigma$  – сопротивление деформации;  $\sigma_m$  – прочность идеального кристалла, и плотность дефектов кристаллической решетки  $\rho$ .

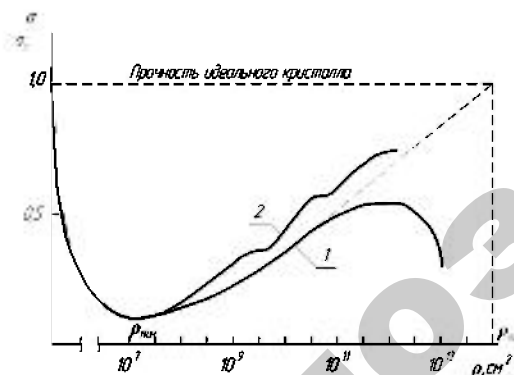


Рис. 5.14. Диаграмма изменения относительной величины сопротивления деформации в зависимости от плотности дислокаций  $\sigma/\sigma_m = f(\rho)$ :  
1 – непрерывное пластическое деформирование; 2 – циклическое пластическое деформирование

Начальная область диаграммы соответствует интенсивному введению в идеальный кристалл различных дефектов кристаллической решетки в процессе его затвердевания и характеризуется резким падением прочности металла. В отожженных металлах минимальная плотность дислокаций  $\rho_{min}$  обычно соответствует  $10^{-7} \text{ см}^{-2}$ .

Постепенный рост плотности дислокаций происходит в результате деформации металла до степеней, соответствующих плотности дислокаций  $\rho = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Дальнейшее повышение степени деформации не дает заметного увеличения прочности металла, поскольку начинается процесс аннигиляции дислокаций различных знаков с возрастанием дислокационных процессов и зарождением дефектов разрушения металла (рис. 5.14, кривая 1).

Таким образом, обычное, непрерывное пластическое деформирование не даст значительного увеличения прочности металла и, тем более, не даст приблизиться к предельной ее величине, поскольку при больших степенях деформации из двух конкурирующих процессов упрочнения и разупрочнения интенсивность последнего будет возрастать, приводя в конечном итоге к снижению прочности металла и к его разрушению.

Существует два способа повысить прочностные характеристики материала: путем увеличения межатомарных связей системы за счет легирования матрицы примесными атомами и созданием особых структур и субструктур, применяя особые режимы пластического деформирования металла.

Железуглеродистые сплавы, имеющие ОЦК-решетку, являются наиболее подходящими сплавами для субструктурного упрочнения по механизму создания ячеистых субструктур вследствие трех основных причин: низкой подвижностью дислокаций, высокой энергией взаимодействия примесных атомов с дислокациями и высокой энергией дефектов упаковки. Все эти факторы служат предпосылкой к возможности поперечного скольжения дислокаций с образованием клубкообразных систем и дислокационных ячеек высокой степени устойчивости.

Исключительно низкая подвижность дислокаций в ОЦК-металлах, отличающаяся на 5–7 порядков от скорости движения дислокаций у ГЦК-металлов, является одной из основных причин, сильного взаимодействия их с примесными атомами. Если учесть, что у легированных сталей наряду с атомами углерода имеется примесь атомов хрома и других элементов, то следует ожидать здесь более интенсивного образования ячеистой структуры по сравнению с простыми углеродистыми сталями.

Особенность строения решетки ОЦК-растворов и сравнительно высокая диффузионная подвижность примесных атомов внедрения являются причиной сильного их взаимодействия с дислокациями. Решетка ОЦК, как известно, обладает меньшими промежутками, вследствие чего внедренный атом сильно ее искажает и тем самым создает условие для высокой энергии взаимодействия.

Металлы с ОЦК-решеткой обладают также высокой энергией дефектов упаковки  $\gamma$ , которые связывают частичные дислокации. Расщепление полных дислокаций на частичные у этих металлов выражено очень слабо. Это облегчает поперечное скольжение дислокаций, приводя к турбулентности пластического течения. Механизм поперечного скольжения, когда дислокации перемещаются перпендикулярно к направлению сдвига, приводит к дополнительному охвату объемов пластического течения и более интенсивному упрочнению металла.

Рассмотренные причины образования ячеистой структуры у металлов с ОЦК-решеткой позволяют сделать важный вывод о том, что в данном случае происходит существенное увеличение суммарного объема металла, охваченного пластической деформацией. При этом повышается однородность деформации и увеличивается интенсивность энергопоглощения при заданных условиях нагружения.

Можно предположить, что поскольку образованию ячеистой структуры сопутствует процесс поперечного скольжения, то и условия интенсивного протекания поперечного скольжения будут соответствовать оптимальному режиму образования ячеистой структуры. Экспериментальными исследованиями деформированного железа показано, что поперечное скольжение начинается только после достижения верхнего предела текучести, а максимальное развитие образования ячеистой структуры соответствует моменту окончания площадки текучести, когда линии текучести охватывают весь деформируемый объем. В дальнейшем этот процесс существенно замедляется, что видно на рис. 5.15, где показаны кривые изменения плотности дислокаций  $\rho$  и средней длины пробега дислокаций  $\Delta$  [2].

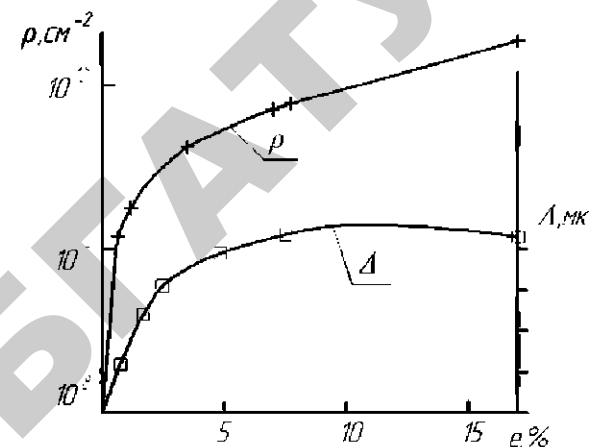


Рис. 5.15. Кривые изменения плотности дислокаций  $\rho$  и средней длины пробега дислокаций  $\Delta$

Поскольку плотность дислокаций взаимосвязана с числом актов перескальзывания их на другую плоскость скольжения за единицу времени, то есть с частотой поперечного скольжения, то кривая  $\rho = f(e)$  (рис. 5.15) может характеризовать интенсивность образования ячеистой структуры в зависимости от степени деформации.

Ход кривой  $\rho = f(e)$  свидетельствует о том, что максимум частоты поперечного скольжения достигается при степени деформации около 2%. В связи с этим, для быстрого формирования ячеистой структуры, требуется небольшая деформация в пределах площадки текучести. Дальнейшее же упрочнение металла путем увеличения плотности фрагментированной структуры следует достигать циклическим повторением малых деформаций с предварительной разгрузкой деформируемого объема. Во время разгрузки происходят неконсервативное переползание находящихся ранее в напряженном состоянии дислокаций и соответствующая этому релаксация внутренних напряжений. Наступает своеобразный «отдых» металла. Такое деформирование и соответствующее этому упрочнение металла можно представить на диаграмме (см. рис. 5.14, кривая 2).

Таким образом, применяя термопластическую обработку по механизму ячеистой фрагментации металла, можно достичь

существенно большей прочности металла. В настоящее время в результате применения технологий субструктурного упрочнения (хотя далеко не достигнут уровень теоретической прочности) достигнутый уровень в несколько раз превышает максимальную прочность существующих технических сплавов.

Продольно-поперечная прокатка заготовок осуществляется в два перехода. Первый переход производится при температуре горячей деформации 1200 °С, назначение которого – осуществить основное формообразование заготовки. Степень деформации заготовки на втором переходе небольшая, и сама операция предназначена для улучшения механических и пластических свойств металла путем создания фрагментированной мелкозеренной структуры. Температура начала деформации на втором переходе соответствует 950 °С, в связи с чем деформация происходит в температурной зоне рекристаллизации стали.

Процесс рекристаллизации при деформировании металла протекает одновременно с накоплением дефектов кристаллической решетки, и центры кристаллизации новой фазы, безусловно, зарождаются на этих дефектах. Одновременно происходят два процесса, и чтобы получить мелкодисперсную структуру с высокими физическими свойствами, надо знать взаимосвязь характера развития новой фазы и размеров зерен с характеристиками процесса деформации.

Формальное рассмотрение процесса образования новой фазы можно представить зависящим от времени  $\tau$ , то есть относительный объем  $\xi$  новой фазы записать в виде функции:

$$\xi = \frac{V_{\text{рек}}}{V} = f(\tau), \quad (5.1)$$

где  $V$  – рассматриваемый объем системы;

$V_{\text{рек}}$  – объем, занятый рекристаллизованной фазой за время  $\tau$ .

Поскольку весь процесс образования новой фазы состоит из двух стадий, первая из которых связана интенсивностью образования зародышей и инкубационным периодом их развития, а вторая включает время их интенсивного роста, то выражение объема  $\xi$  можно записать в следующем виде:

$$\xi = f(V_{\text{зар}}, V_{\text{рос}}, \tau), \quad (5.2)$$

где  $V_{\text{зар}}$  – скорость зарождения новой фазы;

$V_{\text{рос}}$  – скорость ее роста.

Рисунок 5.16 иллюстрирует изменение структуры стали 40Х в процессе термопластической обработки и рекристаллизации, в результате чего на острие лапы стрелчатой, изготовленной из этой стали, получена мелкозернистая структура с размером зерна 8–10 мкм.

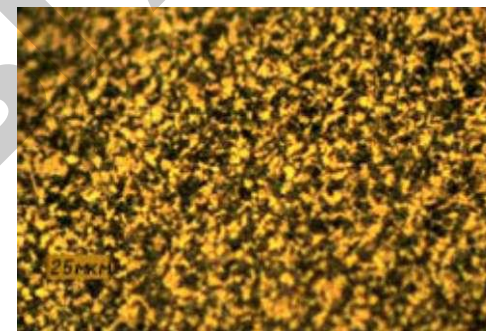


Рис. 5.16. Микроструктура острия стрелчатой лапы, изготовленной из стали 40Х методом поперечно-продольной прокатки

Рисунок 5.17 иллюстрирует формирование ячеистой субструктуры в стали 40Х после термопластической обработки.



Рис. 5.17. Тонкая структура стали 40Х после термопластической обработки ( $\times 40\,000$ )

Необходимо дать характеристику оборудования, на котором наиболее экономично и производительно производить операции ТПО.

Для реализации этого вида обработки используется модернизированное прокатное оборудование конструкции ГНУ «ФТИ НАН РБ», содержащее гидропривод с ползуном и прокатную клеть. Модернизация заключается в оснащении прокатного стана средствами загрузки плоской заготовки в прокатную клеть и средствами, изменяющими ее положение в случае формообразования двух и более лезвий. Кроме того, клеть снабжена специальной технологической оснасткой – коническими валками, установленными на ползуне, и системой упоров, фиксирующих плоскую заготовку в нужном положении. На рис. 5.18 приведены схемы конструкции такого стана, защищенной патентом РБ N3257.

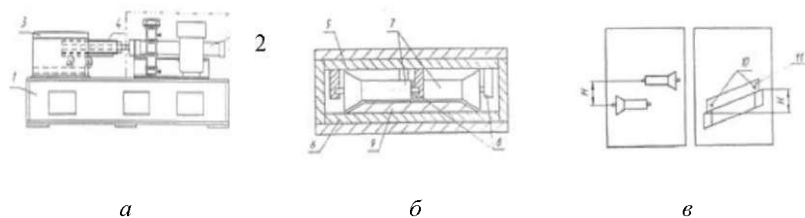


Рис. 5.18. Схема конструкции стана:

*a* – общий вид; *б* и *в* – формообразующая оснастка

Стан (рис. 5.18) состоит из станины 1, гидроцилиндра 2, прокатной клетки 3, ползуна 4, подвижной плиты 5, неподвижной плиты 6, инструмента подвижной плиты в виде валков 7, цапф 8, инструмента неподвижной плиты в виде упоров 9 и ловителей 10. На неподвижной плите 6 установлена заготовка 11.

Стан работает следующим образом. Исходную заготовку 11 фиксируют на плоских упорах 9 и ловителях 10 неподвижной плиты 6. При включении электропривода начинает перемещаться шток гидроцилиндра 2 с закрепленным на нем ползуном 4. При движении ползуна 4 в клеть 3 конические валки 7 на подвижной плите 5 за счет смещения на величину  $H$ , идентичного смещению упоров на неподвижной плите, одновременно внедряются в заготовку 11 и производят ее формообразование методом поперечно-клиновой и продольной прокатки. При этом металл частично смещается продольно в направлении движения ползуна 4, а под действием горизонтальной составляющей усилия от конической поверхности валка 7 происходит поперечное удлинение и формовка заготовки 11 в направлении, перпендикулярном движению ползуна 4.

При обратном ходе ползуна 4 валки 7 воздействуют на сформированные поверхности заготовки 11 и дополнительно калибруют их при уже пониженной температуре с минимальной степенью деформации  $s = 3-5\%$ , что позволяет получить оптимальный комплекс механических свойств, так как структура металла, продеформированного при минимальной степени деформации и пониженной температуре, обеспечивает минимальный размер зерна, повышает прочность и повышает ударную вязкость. Минимальная степень деформации обеспечивается упругой деформацией прокатной клетки 3, которая при пониженной температуре заготовки во время обратного хода ползуна сохраняет свою расчетную жесткость конструкции с сохранением минимальных зазоров между ползуном и прокатной клетью.

Напряженное и деформированное состояние очага деформации при прокатке плоской заготовки между плоской плитой и подвижным коническим валком, совершающим поступательное движение, должно проводиться по сложной схеме, компоненты напряжений которой вызваны активными силами, действующими во взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис. 5.19). 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 периметру лезвия.

Интенсивность каждой из компонент деформации зависит от соотношения скорости движения валка и угла его заострения.

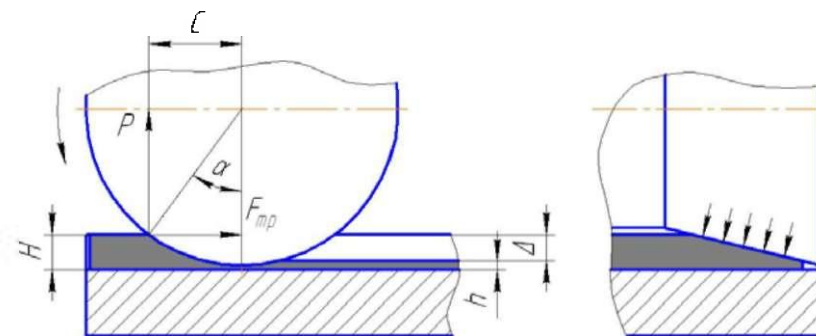


Рис. 5.19. Схема действия сил, возникающих на площадке контакта конического валка с заготовкой

Толщина обжимаемого валком слоя металла  $\Delta$  ограничивается условием поперечного захвата заготовки валком. При очень больших величинах  $\Delta$  возможно буксование валка о заготовку.

Величина  $\Delta$  определяется следующим равенством:

$$\Delta = \frac{v}{n_b} \frac{H^2}{\delta h^2} \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.3)$$

где  $v$  – скорость поступательного перемещения валка относительно заготовки;

$n_b$  – скорость вращения валка при деформировании;

$H$  – исходная толщина заготовки;

$h$  – толщина заготовки в рассматриваемом сечении;

$\delta$  – обжатие заготовки по толщине;

$\alpha$  – угол образующей конуса очага деформации.

Из этого равенства следует, что с увеличением скорости движения ползуна, несущего валок, при ограниченной величине  $\Delta$  необходимо увеличивать скорость вращения валка, то есть уменьшать его диаметр.

Кроме соблюдения условия предельной величины  $\Delta$ , стабильность процесса прокатки зависит от условий трения на контакте заготовки с инструментом. Эту зависимость можно определить, составив уравнение равновесия моментов, создаваемых реакцией от внешних сил  $P$  и  $F_{тр}$ .

Силы трения  $F_{тр}$ , прилагаемые к заготовке со стороны валка, образуют момент:

$$M_1 = F_{тр} H = P \mu H, \quad (5.4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

Этот момент вызывает вращение валка.

Нормальные реактивные силы, которые возникают вследствие прокатки валка по заготовке, создают момент  $M_2 = P \cdot c$ , который направлен в сторону, противоположную вращению валка.

Его вращение будет происходить до тех пор, пока  $M_1 = M_2$  или  $\mu H = c$ .

При увеличении степени деформации  $M_2 > M_1$  произойдет проскальзывание валка, и процесс формообразования прекратится.

С целью определения предельной степени деформируемости, до которой осуществим процесс вращения валка при формообразовании лезвия, используют уравнение (5.4), выразив  $h$  и  $c$  через толщину исходной заготовки и обжатие  $\Delta$ . После несложных преобразований это уравнение примет вид:

$$\sqrt{H^2 - (H - \Delta)^2} = \mu(H - \Delta) \quad (5.5)$$

или

$$\frac{1}{1 + \mu^2} = 1 - \frac{\Delta}{H} + \frac{\Delta^2}{H^2}. \quad (5.6)$$

Последний член уравнения (5.6) – малая величина, которой можно пренебречь, тогда

$$\frac{1}{1 + \mu^2} = 1 - \frac{\Delta}{H}. \quad (5.7)$$

Заменив  $\frac{\Delta}{H} = \varepsilon$ , получим

$$\frac{1}{1 + \mu^2} = 1 - \varepsilon \quad (5.8)$$

или

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{1 + \mu^2} \quad (5.9)$$

при  $\mu = 0,5$  –  $\varepsilon = 20\%$ .

Эта зависимость определяет условие трения валка о заготовку. Поскольку кинетическое обкатывание валка о заготовку при формообразовании лезвия происходит с различными обжатиями, изменяющимися от  $\varepsilon = 0$  у выхода на исходную поверхность заготовки до  $\varepsilon_{\max}$  – на острие лезвия, возможно вести процесс формообразования в режиме средней степени деформации, то есть полное обжатие заготовки увеличится вдвое до значения  $\varepsilon = 40\%$ .

Проведенные эксперименты по формообразованию лезвий лапы стрельчатой подтвердили это предположение.



При толщине исходной заготовки лапы стрельчатой, равной 8 мм, оказалось возможным провести формообразование лезвий до размера его острия 1,5–2,0 мм в два прохода. При этом на первом переходе при степени деформации 40 % острие лезвия получили в размере 4,6 мм, а на втором, при той же степени деформации, получили лезвие с режущей кромкой 1,92 мм.

На рис. 5.20 приведены типовые детали рабочих органов с.-х. машин, изготавливаемые по технологии термопластической обработки.

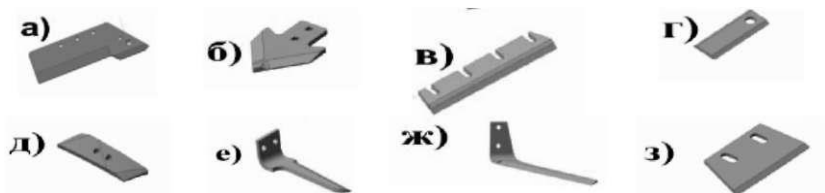
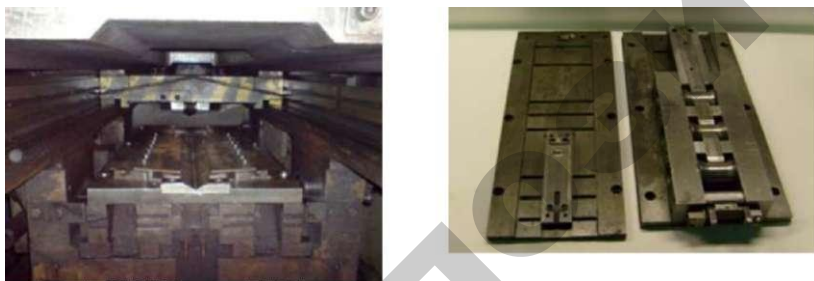


Рис. 5.20. Типовые детали рабочих органов с.-х. машин, изготавливаемые по технологии термопластической обработки:

а) – лемех; б) – прокатанная заготовка лапы стрельчатой; в) – нож измельчителя; г) – нож ротационной косилки; д) – долото; е) – зуб роторной бороны; ж) – нож свеклоуборочного комбайна; з) – нож КВК

На рис. 5.21 приведены конструкции технологических оснасток для формообразования различных рабочих органов: лап стрельчатых, ножей измельчителей, фрез, лемехов и долот.



а

б

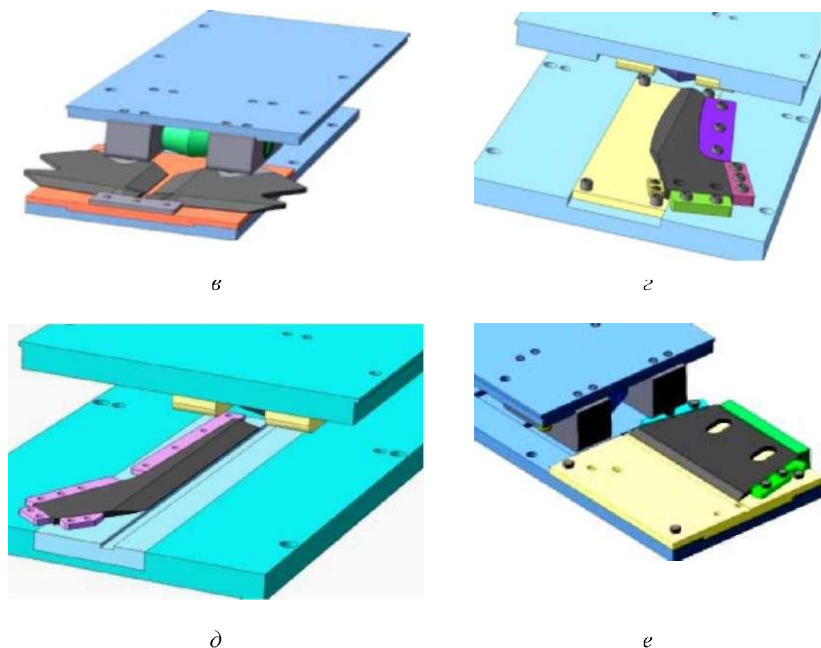


Рис. 5.21. Схемы оснастки для продольно-поперечной прокатки рабочих органов с.-х. машин:

*a* – нож измельчителя; *б* – нож ротационной косилки; *в* – лапа стрелчатая; *г* – зуб роторной борозы; *д* – нож свеклоборочного комбайна; *е* – нож квк

## 5.4. Технология термического модифицирования заготовок

### 5.4.1. Объемно-поверхностное термическое модифицирование

*Выбор системы охлаждения и конструкции закалочного устройства.* В практике термической обработки плоскопрофильных и длинномерных деталей с применением управляемого интенсивного теплоотвода используются системы струйного закалочного охлаждения, либо регулируемого потока воды. Основной задачей систем закалочного охлаждения является обеспечение оптимальных параметров подачи охлаждающей среды на закаливаемую поверхность, предотвращение закалочных пятен, деформаций, коробления и трещин.

Закалочные устройства (рис. 5.22*а, б*) для интенсивного охлаждения деталей отличаются конструкциями формообразования потока охлаждающей среды между охлаждающими поверхностями и конструкциями ограждения. Они, как правило, содержат подводные коллекторы охлаждающей среды и ограждающие конструкции, копирующие поверхности охлаждения. От совершенства их конструкций зависят функциональные возможности управления термическим циклом закалочного охлаждения, качество выполняемой технологической операции.

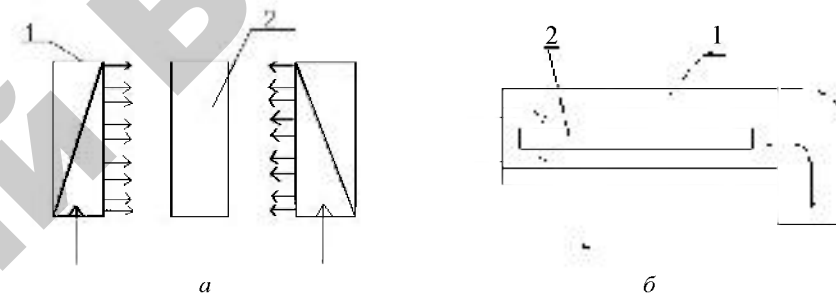


Рис. 5.22. Принципиальные схемы закалочных устройств для охлаждения стальных заготовок струями (*а*) и потоком (*б*) жидкости:

*1* – спрейерное устройство; *2* – заготовка

При использовании закалочного устройства (рис. 5.22*а*) изучалось силовое взаимодействие струи, вытекающей из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  на охлаждаемую поверхность. Охлаждаемая поверхность образца располагалась перпендикулярно по отношению к струе жидкости. Избыточное давление жидкости в ресивере задавалось от 0,1 до 0,45 МПа с интервалом 0,05 МПа. Расстояние между охлаждаемой поверхностью и спрейерной пластиной составляло 5; 10; 20; 30; 40 и 50 мм.

Изменение силового воздействия струи жидкости на охлаждаемую поверхность заготовки представлено рис. 5.23–5.28. Из приведенных данных видно, что с увеличением избыточного давления охлаждающей жидкости в ресивере силовое воздействие струи на охлаждаемую поверхность возрастает прямо пропорционально.

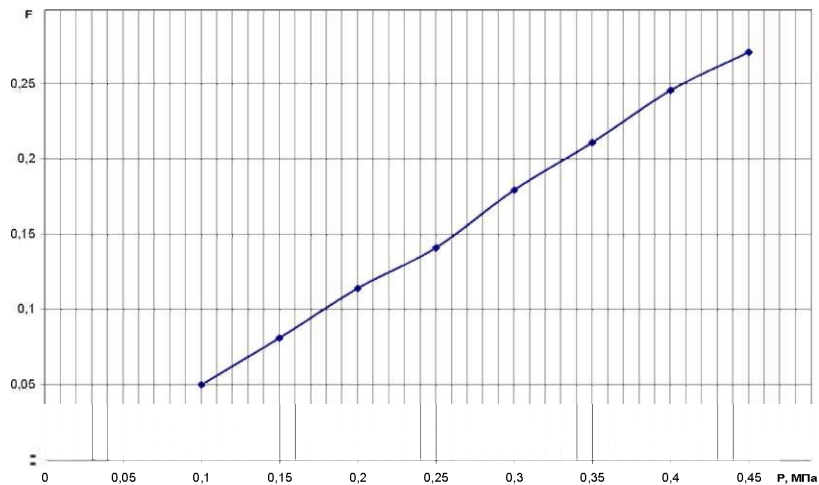


Рис. 5.23. Изменение коэффициента относительного силового воздействия струи из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  в зависимости от давления в ресивере при расстоянии 5 мм между спрейером и охлаждаемой поверхностью

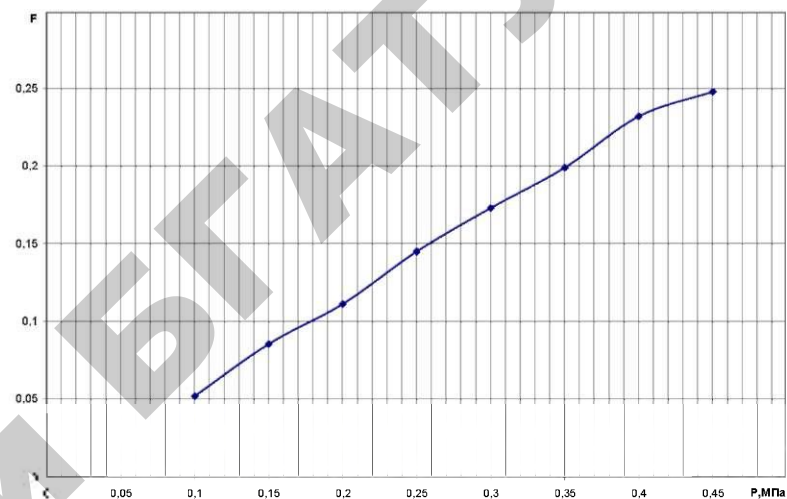


Рис. 5.25. Изменение коэффициента относительного силового воздействия струи из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  в зависимости от давления в ресивере при расстоянии 20 мм между спрейером и охлаждаемой поверхностью

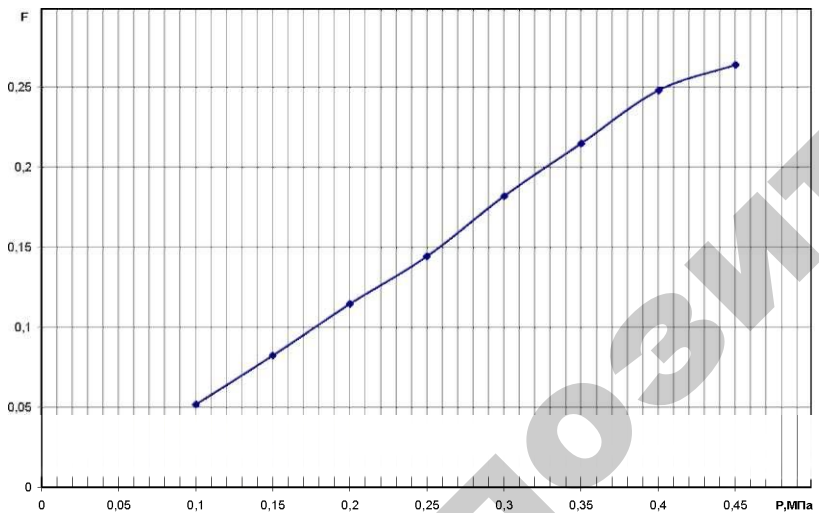


Рис. 5.24. Изменение коэффициента относительного силового воздействия струи из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  в зависимости от давления в ресивере при расстоянии 10 мм между спрейером и охлаждаемой поверхностью

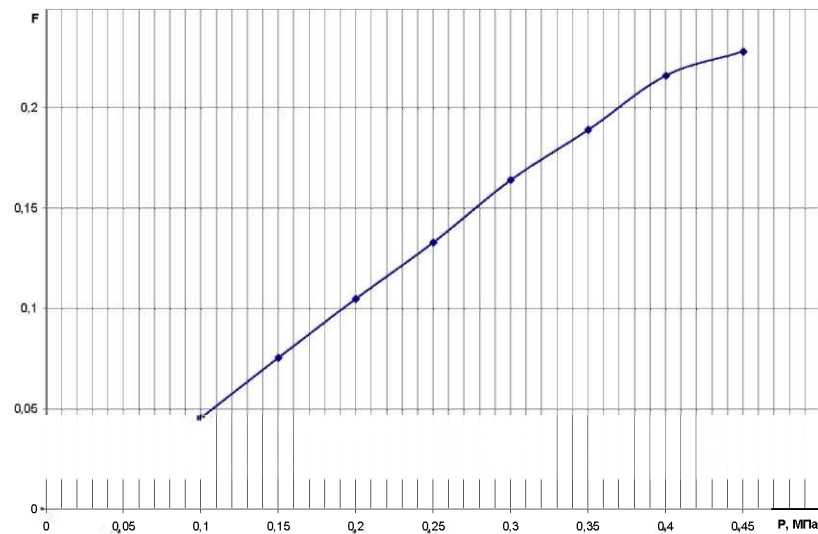


Рис. 5.26. Изменение коэффициента относительного силового воздействия струи из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  в зависимости от давления в ресивере при расстоянии 30 мм между спрейером и охлаждаемой поверхностью

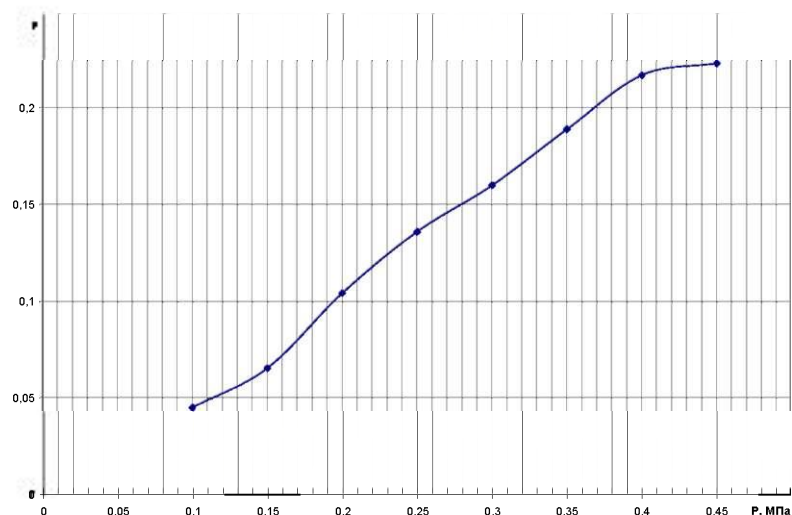


Рис. 5.27. Изменение коэффициента относительного силового воздействия струи из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  в зависимости от давления в ресивере при расстоянии 40 мм между спрейером и охлаждаемой поверхностью



Рис. 5.28. Изменение коэффициента относительного силового воздействия струи из прорези площадью  $2 \text{ мм}^2$  в зависимости от давления в ресивере при расстоянии 50 мм между спрейером и охлаждаемой поверхностью

Любая конструкция системы закалочного охлаждения должна обеспечивать реализацию и воспроизводимость оптимальных технологических параметров термического цикла. Их оценка должна быть связана с показателями качества выполняемой технологической операции термического модифицирования изделия:

- марка стали;
- металлургическое качество этого материала;
- вид внутренней структуры;
- размер зерна мартенсита структуры;
- структурное строение поперечного сечения;
- твердость;
- ударная вязкость;
- глубина и равномерность закаленного слоя;
- отсутствие закалочных трещин, коробления и деформации;
- износостойкость.

При этом конечной целью является получение изделия с предельно возможными потребительскими свойствами.

На первое место среди этих показателей ставится структурное состояние поперечного сечения металла изделия после его термической обработки (термического модифицирования и отпуска). Операции термической обработки изделия в технологическом процессе относятся к числу регламентирующих. В опубликованных за последние 3–5 лет научных и авторских работах изложены методологические основы проблемы повышения качества деталей рабочих органов с.-х. техники, проведен глубокий анализ различных факторов (материаловедческого, конструкторского, технологического, триботехнического, экологического, эксплуатационного и экономического) и их показателей, составляющих научно-методическую основу технических решений, связанных с повышением надежности деталей. При этом значительно расширена область научного познания вопросов физики и механики ударно-абразивного изнашивания почворежущих элементов, показано определяющее значение и влияние их свойств (прочности, твердости, ударной вязкости и пр.), на конструкционную прочность, обеспечивающую надежность и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Из изложенного следует, что на современном этапе техническое оснащение рабочих мест для осуществления технологии термического модифицирования заготовок ДРОМ должно комплектоваться современным технологическим оборудованием для печного и индукционного нагрева, а также специальными, с высокой степенью

автоматического регулирования параметров охлаждения, системы закалочного охлаждения (рис. 5.29). Такой комплексный подход при термическом модифицировании заготовок тонкостенных длинномерных ДРОМ составляет основу достижения принципиально новых результатов с точки зрения формирования остаточных напряжений, заданного комплекса механических и эксплуатационных свойств. Сочетание способов нагрева при заданных параметрах со способами охлаждения также является необходимым условием формирования принципиально новой морфологии структурного строения в поперечном сечении изделия, структуры мартенсита, и главное, ее дисперсности.

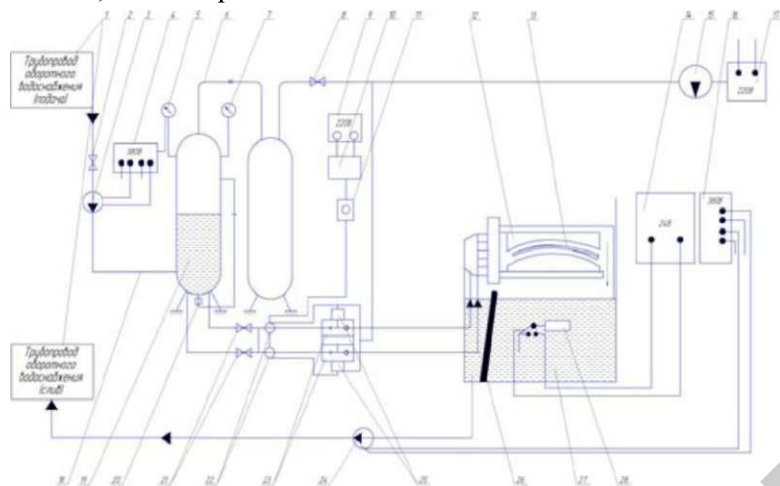


Рис. 5.29. Принципиальная схема технологии импульсного закалочного охлаждения жидкостью:

1 – система обратного водоснабжения; 2, 21 – кран шаровой фланцевый ДУ-50; 3, 24 – насос бустерный (БА 6-10-50); 4, 16 – щит силовой; 5 – манометр (МП-63); 6, 18 – рукав резиновый напорный (0,63 МПа); 7 – реле давления Д-210-111; 8 – кран шаровой фланцевый ДУ-20; 9, 17 – источник питания; 10 – пульт управления клапанами «Бабочка» с электронным реле времени с блоком питания на 24 В; 11 – кнопка управления электрическая 24 В; 12 – закалочное устройство (рабочее давление до 0,5 МПа); 13 – заготовка; 14 – станция управления бустерными насосами; 15 – компрессор СБ 4Ц-100ЕБ-51А; 19 – пневмогидроаккумулятор ПГА 0.8000; 20 – датчик уровня воды; 22 – электромагнитный клапан УНРЗ 3/2,5-7312; 23 – кран «Бабочка ЛВК»; 25 – пневмопривод; 26 – фильтр; 27 – ванна для воды; 28 – датчик уровня воды

Технология термического модифицирования плоскопрофильных длинномерных дисковых заготовок. Общепринято, что в сталях с различным содержанием углерода при малых и больших скоростях охлаждения не возникает трещин. Они могут возникать при средней скорости охлаждения. При разработке принципиальной схемы ТМ плоскопрофильных длинномерных дисковых заготовок, руководствуясь приведенным заключением Второго Всероссийского семинара по проблемам закалочного охлаждения (1997 г.), было принято техническое решение об использовании очень быстрого охлаждения (около 10 000 °С/с) потоком воды. Такое охлаждение создает возможность получить на поверхности деталей напряжение сжатия около 800 МПа, что исключает возникновение трещин.

На рис. 5.29 представлена принципиальная схема ТМ плоскопрофильных длинномерных дисковых заготовок на базе технологического модуля ТМ-60, ранее используемого при спрейерном водяном охлаждении.

Нагрев заготовок из стали 60 ПП (ТУ14-1-1926-76РФ) осуществлялся в печи сопротивления ПКМ 3.6.2/11ИЗ. Режим нагрева изучался в широком интервале его параметров (от 770 °С до 860 °С). Температура нагрева контролировалась микропроцессорным контроллером «ТЕРМОДАТ-14». Точность измерения температуры нагрева образцов составляла ±2 °С.

Охлаждение заготовок производилось потоком воды в специальном закалочном устройстве 12, которое подсоединялось трубопроводной арматурой к ТМ-60 через краны «Бабочка ЛВК» с пневмоприводами. Пневмоприводы управлялись от блока управления с электромагнитными клапанами ЕАО24ДС 10. Продолжительность цикла охлаждения заготовки задавалась с помощью электронного реле времени с точностью ±0,1 с. Охлаждающая среда (вода) подавалась к закалочному устройству от гидропневмоаккумулятора (ГПА) 19. Давление охлаждающей среды в ГПА создавалось бустерным насосом (агрегатом-БА-6-10-50) 3. Контроль давления в ГПА осуществлялся манометром МП-63 5 с точностью ±0,01 МПа. Управление бустерным насосом осуществлялось станцией 14 и реле давления Д-210-111 7. Технологический модуль ТМ-60, укомплектованный исполнительными и измерительными техническими средствами, позволил изучать влияние параметров режима нагрева комплекса свойств изделий.

Структурный анализ и физико-механические свойства. Исследована динамика изменения твердости образцов после ТМ в зависимости от температуры нагрева (рис. 5.30) и от давления воды в гидропневмоаккумуляторе (см. рис. 5.31).

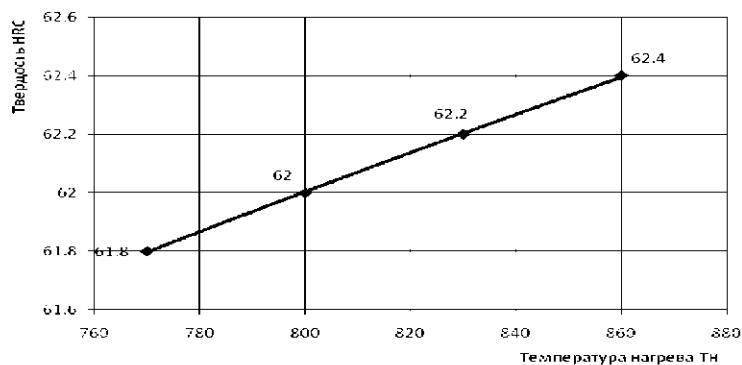


Рис. 5.30. Зависимость твердости поверхностного слоя образцов от температуры нагрева

Установлено, что при возрастании давления воды в ГПА с 0,25 МПа до 0,45 МПа твердость образцов стали 60ПП при ТМ в потоке воды увеличивается с 61 HRC до 65 HRC (рис. 5.31)

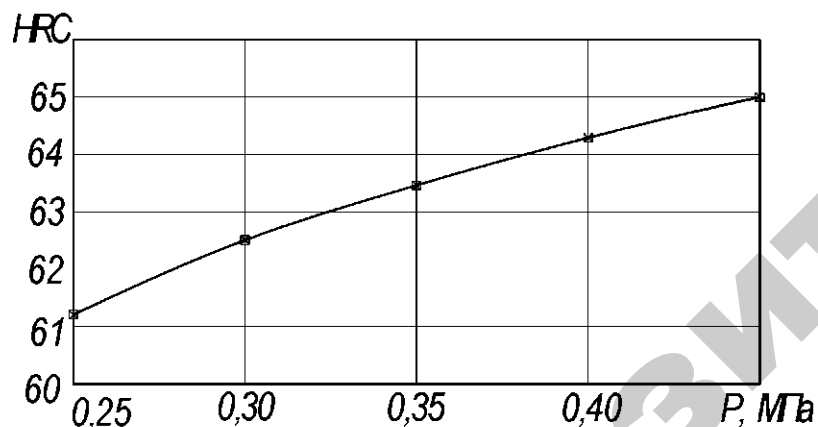


Рис. 5.31. Изменение твердости образцов из стали 60ПП в зависимости от давления в ГПА при исходной температуре нагрева 800 °С

Характер изменения твердости образцов из стали 60ПП (толщиной 8 мм), термически модифицированных в потоке воды после нагрева 770–860 °С, в зависимости от давления воды в ГПА остается идентичным приведенному на рис. 5.31. На основании полученных результатов исследования было установлено, что оптимальной

температурой нагрева образцов является 800 °С. При нагреве образцов до этой температуры минимизируется расход электроэнергии, обеспечивается полная аустенизация, не происходит роста размера зерна аустенита.

Последующие исследования были связаны с измерением изменения твердости в зависимости от температуры отпуска. Динамика изменения твердости образцов из стали 60ПП (толщиной 8 мм), термически модифицированных в потоке воды при давлении в ГПА 0,40 МПа и в последующем отпущенных при нагреве в интервале температур 200–260 °С, представлена на рис. 5.32.

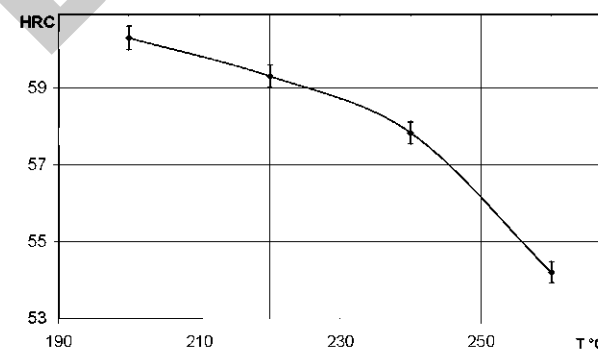


Рис. 5.32. Изменение твердости в зависимости от температуры отпуска

Из графика (рис. 5.32) следует, что при увеличении температуры отпуска твердость образцов монотонно снижается. Характер изменения исследуемого показателя свидетельствует о возможности управлять величиной твердости в заданном интервале значений.

Установлено, что ударная вязкость зависит от твердости образцов (рис. 5.33) и температуры отпуска (рис. 5.34). Из графиков следует, что значения ударной вязкости (140–250 Дж/см<sup>2</sup>) образцов из стали 60ПП (толщиной 8 мм), подвергнутых низкому отпуску, имеют достаточный уровень, соответствующий условиям ударно-абразивного изнашивания. При температуре отпуска около 250 °С значения ударной вязкости находятся на уровне предельно возможного значения для материала образцов в состоянии поставки.

Исследованием фасеток поверхности излома образцов, испытанных на ударную вязкость, установлено, что они характеризуются вязко-пластичным состоянием.

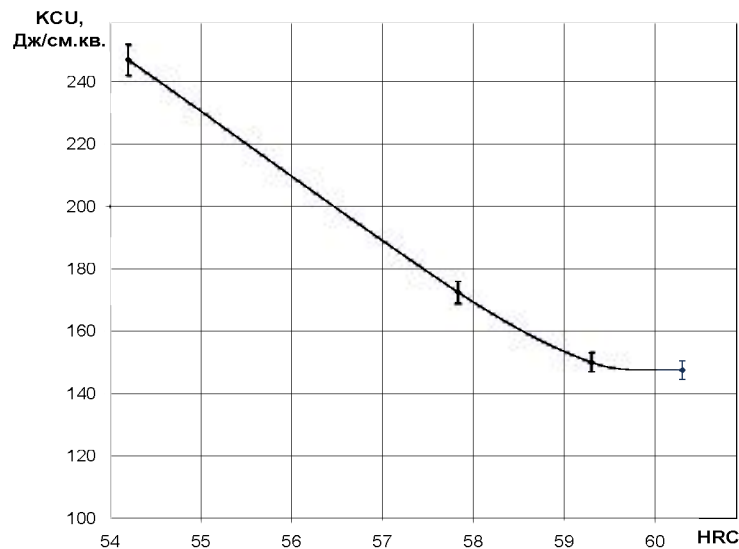


Рис. 5.33. Изменение ударной вязкости в зависимости от твердости образцов

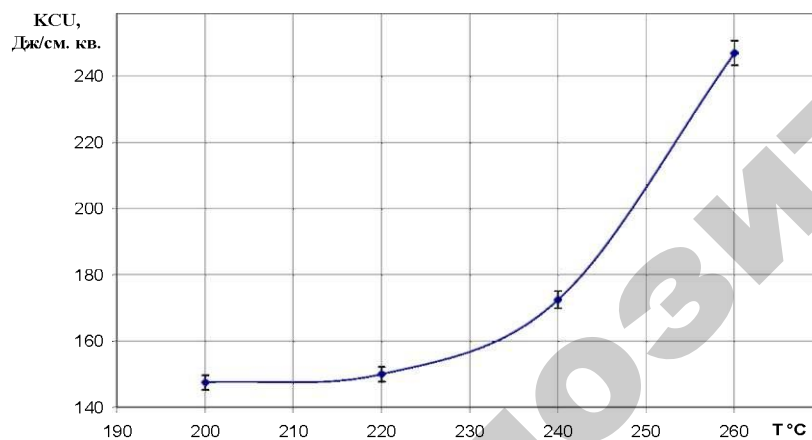


Рис. 5.34. Изменение ударной вязкости в зависимости от температуры отпуска

Структурное состояние термически модифицированных образцов из стали 60ПП (толщиной 8 мм) изучалось на макро- и микро-

уровне. Для этих целей из опытных образцов изготавливались шлифы с последующим травлением, а также использовались фасетки изломов образцов, испытанных на ударную вязкость.

Макроструктурным анализом выявлена неоднородность (неоднородность) структурного строения в поперечном сечении образцов. Видимые при визуальном просмотре макрошлифов (темплетов поперечного сечения) и фасеток изломов образцов зоны в поперечном сечении отличаются своим отражением. Зоны со стороны внешних поверхностей макрошлифов отсвечивают более отчетливо, с оттеночным блеском, зона средней части – с матовым оттенком.

В связи с необходимостью структурного строения проводилось измерение микротвердости в поперечном сечении макрошлифов. Было выявлено убывание (диссипация) значений микротвердости в направлении сердцевины образца. Анализ численных значений микротвердости свидетельствует о наличии в поверхностных слоях структуры мартенсита, далее – троостомартенситной (бейнитной), а в сердцевине – трооститной структуры.

Исследования микроструктуры с помощью светового микроскопа позволили выявить наличие структуры мартенсита в поверхностных слоях и переходной троостомартенситной структуры в сердцевине образца. Отличительной особенностью структурного строения мартенсита в поперечном сечении образца является его мелкозернистость, так как в плоскости микрошлифа заметны лишь сечения зерен. Ввиду недостаточной разрешающей способности оптического микроскопа (не превышает 200 нм (0,2 мкм)) более мелкие детали структуры не выявляются.

Для оценки металлургического качества стали 60ПП и технологии ее термического модифицирования проводились исследования структурного строения с применением метода электронной фактографии изломов (фасеток) образцов после испытаний их на ударную вязкость при увеличении  $\times 5000$ ,  $\times 10\ 000$ ,  $\times 20\ 000$ . Это позволяет выявить сверхтонкие морфологические особенности строения излома металла, а также влияние технологического фактора упрочняющей технологии. Исследование морфологии излома (фасетки) образца из стали 60ПП после термического модифицирования в потоке воды проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы *Tescan* (Чехия).

Результаты исследований микроструктуры шлифов из стали 60ПП на световом микроскопе «MeF-3» фирмы *Reichert* (Австрия) представлены на рис. 5.35 ( $\times 500$ ) и 5.36 ( $\times 2000$ ).

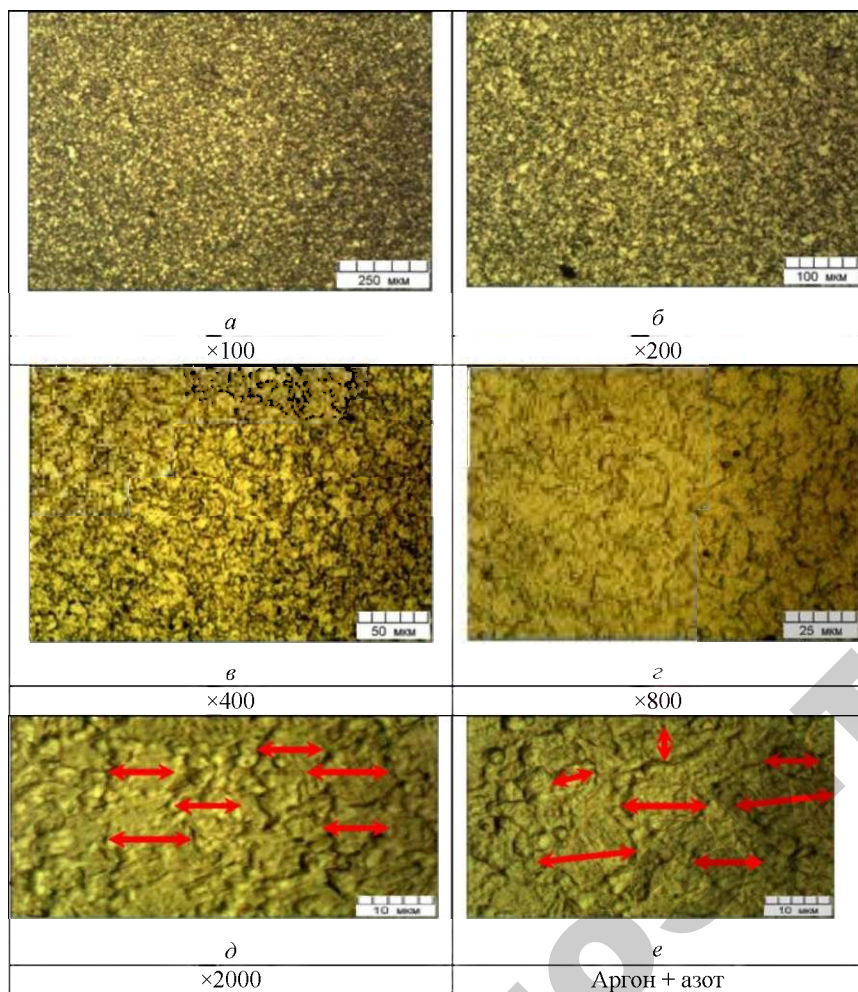


Рис. 5.35. Микроструктура образцов из стали 60ПП после обработки в аргоне (20 мин) наружных слоев (при увеличении):  
 $a - \times 100$ ;  $b - \times 200$ ;  $v - \times 400$ ;  $z - \times 800$ ;  $d, e - \times 2000$

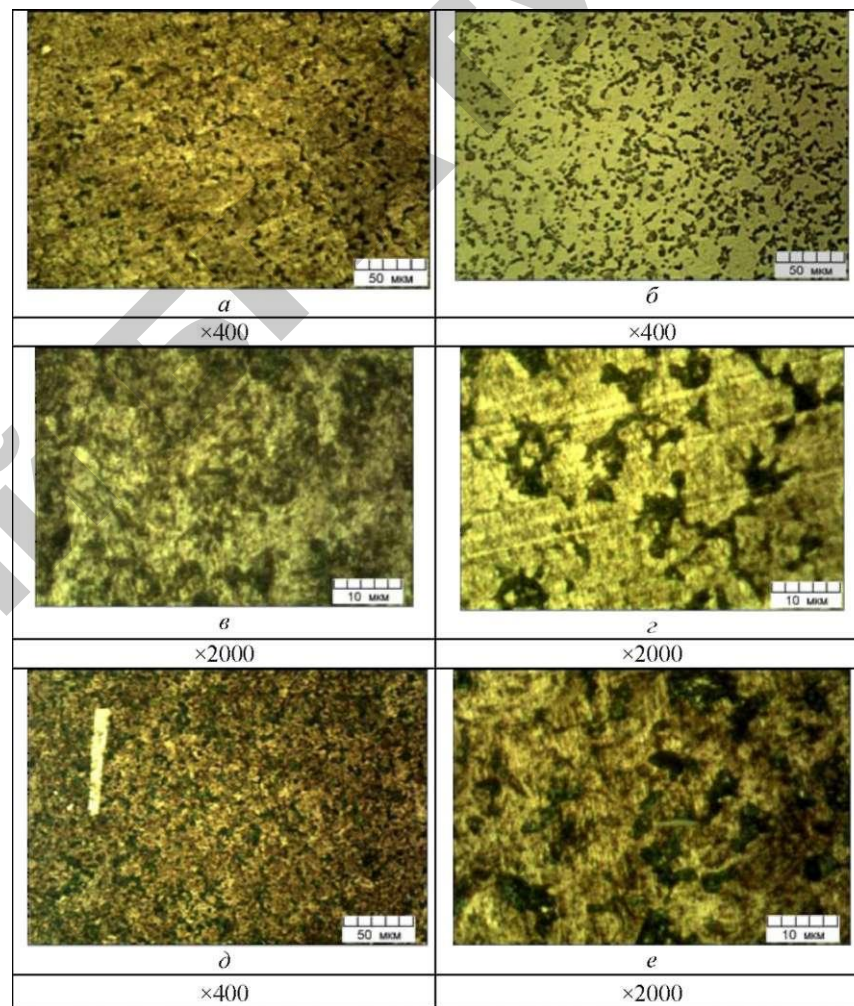


Рис. 5.36. Микроструктура образцов из стали 60ПП после химического травления сердцевины (при увеличении):  
 $a, b, d - \times 400$  и  $v, z, e - \times 2000$

Фрактограммы излома образцов из стали 60ПП после испытаний на ударную вязкость, полученные с применением метода электронной фрактографии, представлены на рис. 5.37 (с увеличением  $\times 500$  и  $\times 10\,000$ ) и 5.38 (с увеличением  $\times 5000$ ;  $\times 10\,000$  и  $\times 20\,000$ ).



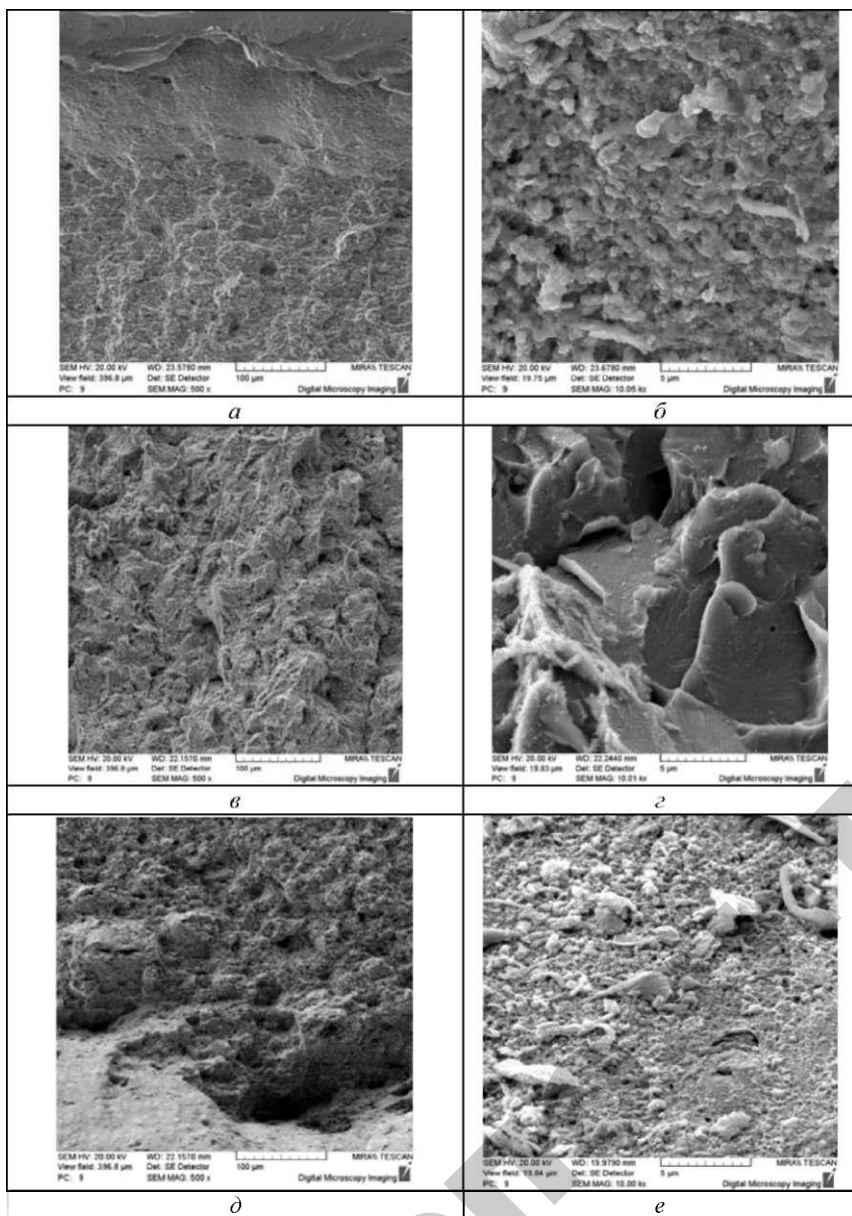


Рис. 5.37. Фрактограмма излома образца из стали 60ГП (при увеличении): в наружных слоях: а, д –  $\times 500$ , б, е –  $\times 10\,000$  и сердцевине: в –  $\times 500$ ; г –  $\times 10\,000$

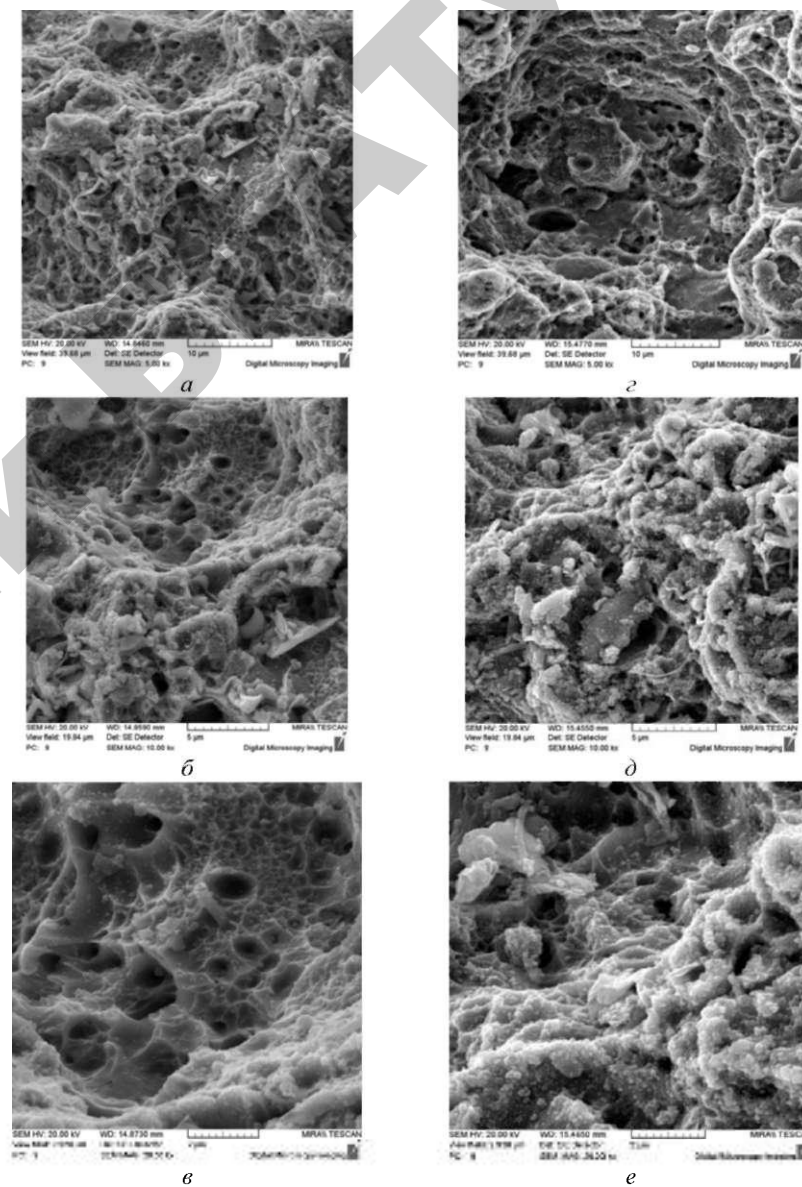


Рис. 5.38. Микроструктурное строение (а, г –  $\times 5000$ ; б, д –  $\times 10\,000$ ; в, е –  $\times 20\,000$ ) внутризеренного вязкого излома образца из стали 60ГП после испытаний на ударную вязкость у краев внешних поверхностей: а, б, г – верхней, г, д, е – нижней

Метод электронной фрактографии изломов (фасеток) образцов из стали 60ПП позволил выявить мелкодисперсность внутризеренной структуры мартенсита. Такое структурное строение стали 60ПП, термически модифицированной в потоке воды сопровождается высокой твердостью (61–64 HRC) и ударной вязкостью (до 2,5 МДж/м<sup>2</sup>).

Микроструктура опытных образцов дисков лущильников, изготовленных из стали 30ХГСА, после объемной поверхностной закалки и низкого отпуска представлена на рис. 5.39, а характеристики распределения твердости по толщине дисков приведены на рис. 5.40.

На основании анализа структурного строения, как основного оценочного показателя качества термической обработки, можно заключить, что оно соответствует техническим требованиям на разрабатываемые изделия.

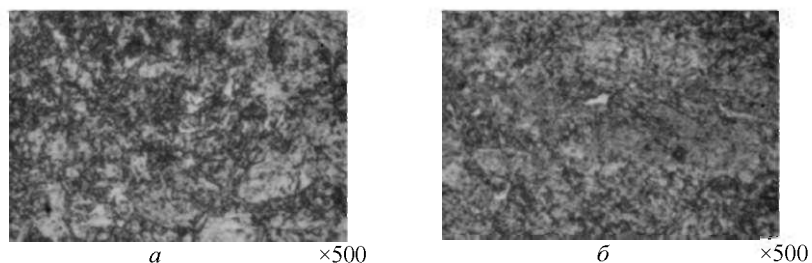


Рис. 5.39. Микроструктура опытных образцов дисков лущильников, изготовленных из стали 30ХГСА, после объемной поверхностной закалки и низкого отпуска: а – поверхностный слой, б – сердцевина

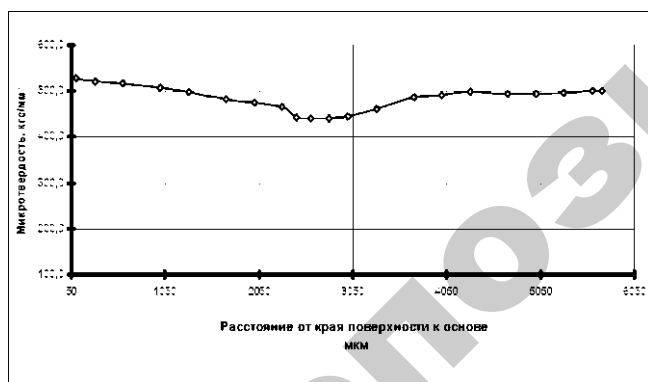


Рис. 5.40. Распределение твердости по толщине опытных образцов дисков лущильников

Характеристика теплового процесса охлаждения высокотемпературной поверхности потоком жидкости. Проводились экспериментальные исследования термического цикла охлаждения высокотемпературной поверхности потоком жидкости. Охлаждающую способность потоком жидкости и закалочных сред изучали на плоских образцах размером 65×50×8 мм. Образцы были изготовлены из стали 60ПП. Для определения температуры образца на глубине 2 мм от поверхности были выполнены каналы Ø1,5 мм, куда укладывали термопары (рис. 5.41). Спай термопары выполняли серебром. Образцы охлаждали в потоке воды, погружением в воду и 10% раствор кальцинированной соды (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Температуру измеряли хромель-алюмелевыми термопарами. Изменение температуры при охлаждении определяли быстродействующим самописцем-регистратором «Нюки-8826». Результаты измерений приведены на рис. 5.42–5.44.



Рис. 5.41. Конструкция образца:

а – внешний вид образца, б – схема сверления отверстий в образце под термопары

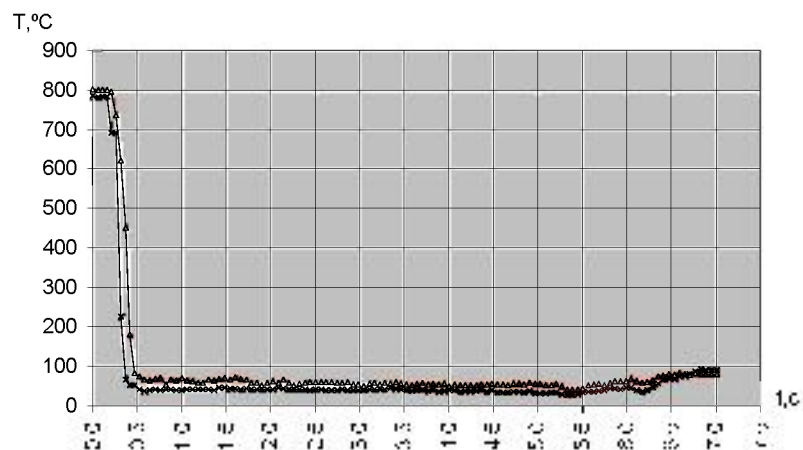


Рис. 5.42. Динамика изменения температуры пластины толщиной 8 мм на глубине 2 мм при охлаждении потоком воды ( $P = 0,36$  МПа)

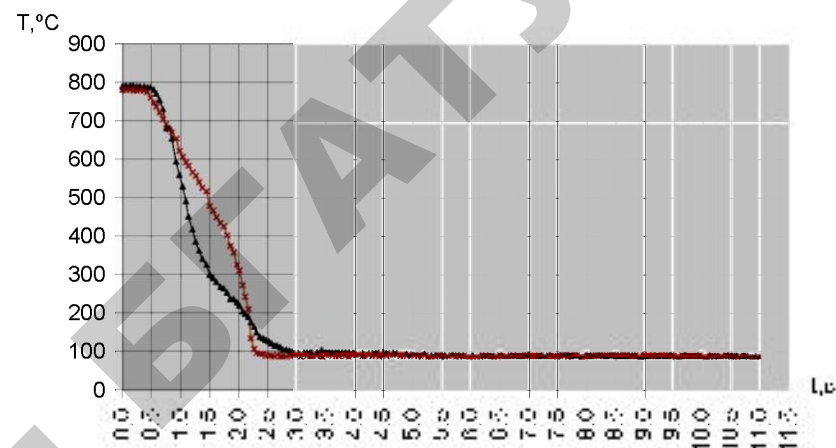


Рис. 5.44. Динамика изменения температуры пластины толщиной 8 мм на глубине 2 мм при охлаждении погружением в 10% водный раствор кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

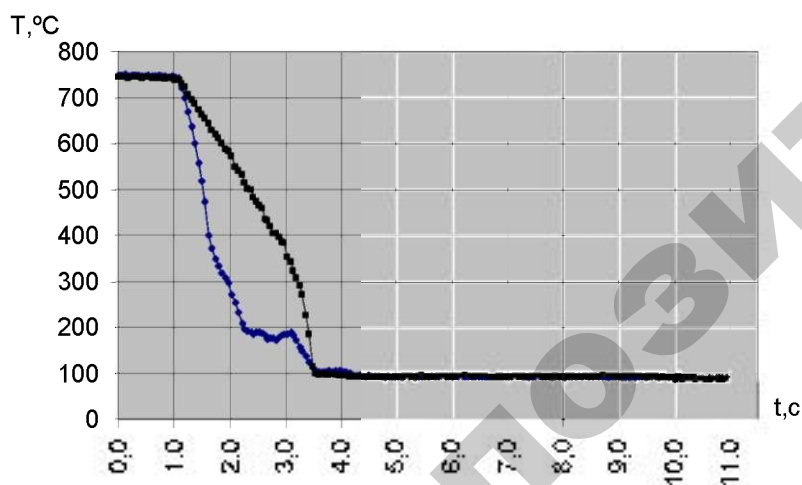


Рис. 5.43. Динамика изменения температуры пластины толщиной 8 мм на глубине 2 мм при охлаждении погружением в воду

Математическая модель теплового процесса охлаждения высокотемпературной поверхности потоком жидкости. Температурное поле нагретой тонкой пластины, контактирующей на обеих поверхностях с охлаждающей внешней средой, определяется следующим одномерным уравнением теплопроводности:

$$\rho(T(x,t))c(T(x,t))\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T(x,t)) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right), \quad (5.10)$$

где  $\rho(T)$  – плотность материала пластины;  
 $c(T)$  и  $\lambda(T)$  – его теплоемкость и теплопроводность, соответственно.

В общем случае указанные величины, называемые теплофизическими характеристиками (ТФХ), зависят от величины локальной температуры охлаждаемой детали. Если ТФХ являются постоянными (не зависящими от температуры), то уравнение (5.10) можно записать в следующей форме:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (5.11)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент температуропроводности материала пластины.

Красивыми условиями для случая спрейсного охлаждения равномерно нагретой тонкой пластины будут следующие:

$$T(x, 0) = T_0; \quad (5.12)$$

$$\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \alpha_0 (T(0, t) - T_c); \quad (5.13)$$

$$\lambda \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = -\alpha_L (T(L, t) - T_c). \quad (5.14)$$

Уравнение (5.12) является начальным условием, отображающим равномерность нагрева пластины в начальный момент воздействия на него водного душа. Уравнения (5.13) и (5.14) – граничные условия, описывающие закон теплового взаимодействия тонкой пластины с окружающей средой на обеих ее поверхностях ( $L$  – толщина пластины,  $\alpha_0$  и  $\alpha_L$  – соответствующие коэффициенты теплоотдачи,  $T_c$  – температура окружающей среды). В общем случае величины  $\alpha_0$  и  $\alpha_L$  могут быть различными. Поставленная задача решается в ее самой общей постановке ( $\alpha_0 \neq \alpha_L$ ) с применением к системе уравнений (5.11)–(5.14) соответствующего конечномерного преобразования Фурье:

$$\bar{T}(\mu_k, t) = \int_0^L T(x, t) \left( \mu_k \cos \mu_k \frac{x}{L} + h_0 L \sin \mu_k \frac{x}{L} \right) dx, \quad (5.15)$$

где  $\mu_k > 0$  – корни уравнения  $\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{(h_0 + h_L)L} - \frac{h_0 h_L L}{(h_0 + h_L)\mu}$ ,  $h_0 = \frac{\alpha_0}{\lambda}$ ,

$$h_L = \frac{\alpha_L}{\lambda}.$$

Оператор двойного дифференцирования по пространственной переменной  $\frac{d^2 T}{dx^2}$  после применения к нему преобразования (5.15)

примет вид: 
$$\left[ \frac{dT(0, t)}{dx} - h_0 T(0, t) \right] \mu_k + \frac{\mu_k^2 + h_0^2 L^2}{(h_0 + h_L)L} \sin \mu_k$$

$$\left[ \frac{dT(L, t)}{dx} + h_L T(L, t) \right] - \left( \frac{\mu_k}{L} \right)^2 \bar{T}(\mu_k, t).$$

Таким образом, после применения преобразования (5.15) к системе уравнений (5.11)–(5.14) последняя примет вид:

$$\frac{\partial \bar{T}(\mu_k, t)}{\partial t} = a \left( \left[ h_0 \mu_k + h_L \frac{\mu_k^2 + h_0^2 L^2}{(h_0 + h_L)L} \sin \mu_k \right] T_c - \left( \frac{\mu_k}{L} \right)^2 \bar{T}(\mu_k, t) \right); \quad (5.16)$$

$$\bar{T}_0(\mu_k, 0) = \left( \sin \mu_k + \frac{h_0 L}{\mu_k} [1 - \cos \mu_k] \right) L T_0. \quad (5.17)$$

Решение уравнения (5.16), с учетом начального условия (5.17), имеет вид:

$$\bar{T}(\mu_k, t) = \left( \sin \mu_k + \frac{h_0 L}{\mu_k} [1 - \cos \mu_k] \right) L T_0 \exp(-\alpha \gamma_k^2 t) +$$

$$+ \left( h_0 \mu_k + h_L \frac{\mu_k^2 + h_0^2 L^2}{(h_0 + h_L)L} \sin \mu_k \right) T_c \frac{1 - \exp(-\alpha \gamma_k^2 t)}{\gamma_k^2}, \quad (5.18)$$

где  $\gamma_k = \frac{\mu_k}{L}$ . Теперь, применяя к выражению (5.18) соответствующую процедуру обратного преобразования Фурье, получим уравне-

ние, определяющее распределение температурного поля в охлаждаемой тонкой пластине в произвольный момент времени:

$$T(x, t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + h_0^2 L^2) \left( \mu_k \cos \mu_k \frac{x}{L} + h_0 L \sin \mu_k \frac{x}{L} \right)}{\left\{ (\mu_k^2 + h_0^2 L^2) [h_0 L + (\mu_k^2 + h_0^2 L^2)] + h_0 L (\mu_k^2 + h_0^2 L^2) \right\}} \times$$

$$\times \left[ \left( \sin \mu_k + \frac{h_0 L}{\mu_k} [1 - \cos \mu_k] \right) T_0 \exp(-\alpha \gamma_k^2 t) + \right.$$

$$\left. + \left( h_0 \mu_k + h_0 \frac{\mu_k^2 + h_0^2 L^2}{(h_0 + h_L) L} \sin \mu_k \right) T_c \frac{1 - \exp(-\alpha \gamma_k^2 t)}{\gamma_k^2 L} \right]. \quad (5.19)$$

В том случае, если условия охлаждения являются симметричными ( $h_0 = h_L = h$ ), выражение (5.19) можно значительно упростить:

$$T(x, t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_k \cos \mu_k \frac{x}{L} + hL \sin \mu_k \frac{x}{L}}{\mu_k^2 + h^2 L^2 + 2hL} \left[ \left( \sin \mu_k + \frac{hL}{\mu_k} [1 - \cos \mu_k] \right) T_0 \exp(-\alpha \gamma_k^2 t) + \right.$$

$$\left. + \left( h \mu_k + \frac{\mu_k^2 + h^2 L^2}{2L} \sin \mu_k \right) T_c \frac{1 - \exp(-\alpha \gamma_k^2 t)}{\gamma_k^2 L} \right]. \quad (5.20)$$

Учет физических условий процесса позволяет получить решение поставленной задачи в еще более простой форме. Так как при одинаковых условиях охлаждения на обеих поверхностях все теплофизические параметры симметричны относительно плоскости  $x = L/2$ , то, поместив начало координат в данной плоскости, исходную задачу (5.11)–(5.14) можно сформулировать в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (5.21)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0; \quad (5.23)$$

$$\lambda \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} = -\alpha (T(l, t) - T_c), \quad (5.24)$$

где  $l = L/2$ ,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в плоскости  $x = l$ .

Соответствующее преобразование Фурье в этом случае:

$$\bar{T}(\mu_k, t) = \int_0^l T(x, t) \cos \mu_k \frac{x}{l} dx, \quad (5.25)$$

$\mu_k > 0$  – корни уравнения  $\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu}{hl}$ . Оператор двойного диф-

ференцирования по переменной  $x$  примет вид:

$$\left[ \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} + hT(l, t) \right] \cos \mu_k - \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} - \left( \frac{\mu_k}{l} \right)^2 \bar{T}(\mu_k, t).$$

Таким образом, в результате применения преобразования (5.25) к (5.21)–(5.24), приходим к системе уравнений:

$$\frac{\partial \bar{T}(\mu_k, t)}{\partial t} = a \left[ h \cos \mu_k T_c - \left( \frac{\mu_k}{l} \right)^2 \bar{T}(\mu_k, t) \right]; \quad (5.26)$$

$$\bar{T}_0(\mu_k, 0) = \frac{l}{\mu_k} \sin \mu_k T_0. \quad (5.27)$$

Ее решение приводит к следующему результату:

$$\bar{T}(\mu_k, t) = \frac{l \sin \mu_k}{\mu_k} T_0 \exp(-\alpha \gamma_k^2 t) + \frac{h \cos \mu_k}{\gamma_k^2} T_c (1 - \exp(-\alpha \gamma_k^2 t)). \quad (5.28)$$

Теперь, используя соответствующее обратное преобразование Фурье:

$$T(x, t) = \frac{2}{l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + h^2 l^2) \cos \mu_k \frac{x}{l} \bar{T}(\mu_k, t)}{\mu_k^2 + h^2 l^2 + hl} \quad (5.29)$$

получим окончательное выражение для определения температурного поля в охлаждаемой пластине:

$$T(x, t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + h^2 l^2) \cos \mu_k \frac{x}{l}}{\mu_k^2 + h^2 l^2 + hl} \left( \frac{\sin \mu_k}{\mu_k} T_0 \exp(-\alpha \mu_k^2 t) + \frac{h \cos \mu_k}{l \mu_k^2} T_c (1 - \exp(-\alpha \mu_k^2 t)) \right) \quad (5.30)$$

Необходимо отметить, что кроме абсолютной величины нагрева важным параметром, влияющим на качество изготавливаемой детали, является также локальная скорость охлаждения. Она определяется с помощью следующего соотношения:

$$V(x, t) = \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = -2 \alpha \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + h^2 l^2) \cos \mu_k \frac{x}{l}}{\mu_k^2 + h^2 l^2 + hl} \left( \frac{\sin \mu_k}{\mu_k} T_0 - \frac{h \cos \mu_k}{l \mu_k^2} T_c \right) \exp(-\alpha \mu_k^2 t) \quad (5.31)$$

В качестве примера моделирования процесса спрейерного охлаждения рассматривается отпуск после термозакалки плоской заготовки толщиной 12 мм, изготовленной из стали 60ПП. Заготовка разогрета до температуры  $T_0 = 830$  °С, температура охлаждающей воды  $T_c = 18$  °С. Теплофизические характеристики стали при начальной температуре: плотность  $\rho = 7500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 23,63 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ , коэффициент теплоемкости  $c = 845,94 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . Результаты моделирования процесса охлаждения приведены на рис. 5.45–5.48.

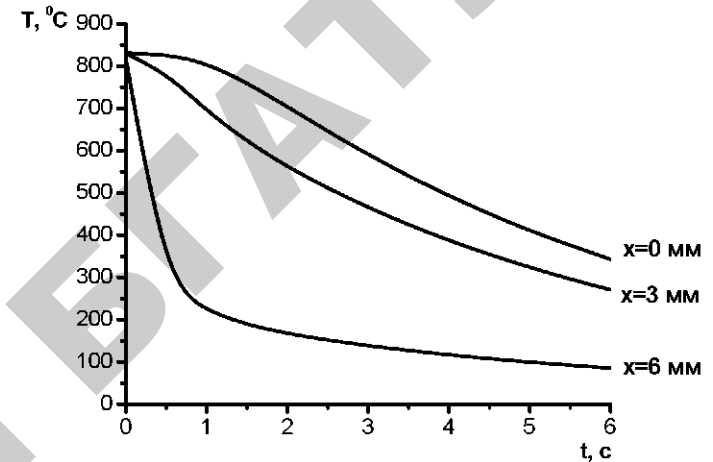


Рис. 5.45. Изменение температуры точек заготовки со временем (в зависимости от их положения):

$x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  $x = 6$  мм – поверхность детали

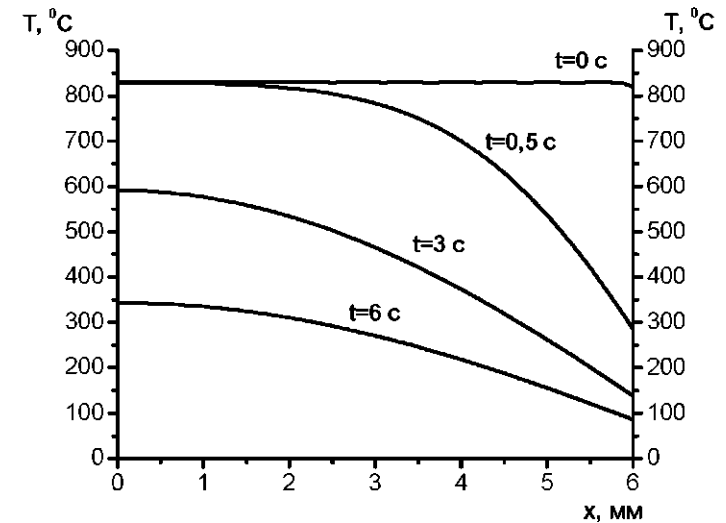


Рис. 5.46. Профиль температуры заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени охлаждения

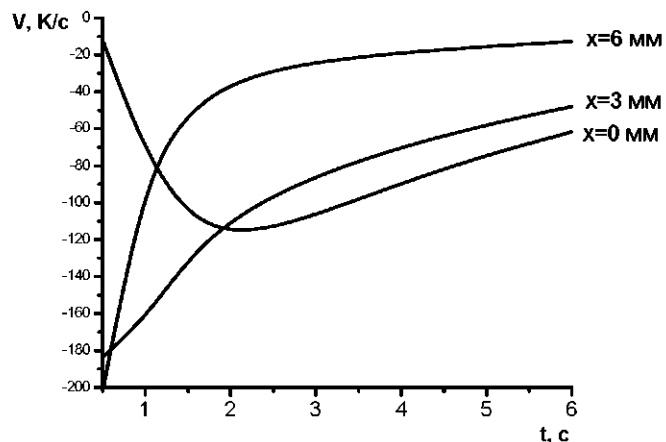


Рис. 5.47. Изменение скорости охлаждения точек заготовки со временем (в зависимости от их положения):

$x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали,  $x = 6$  мм – поверхность детали

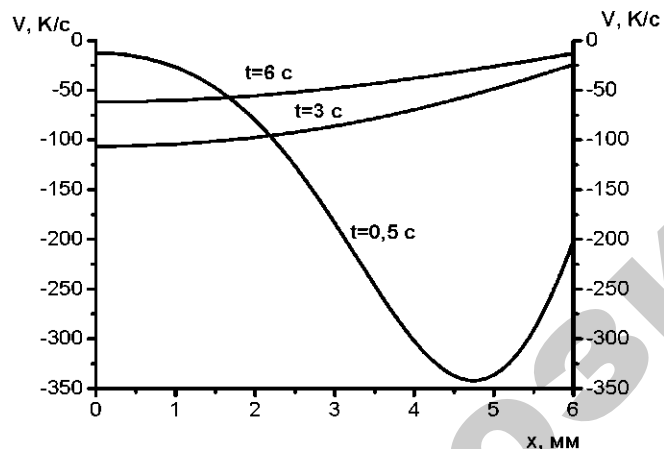


Рис. 5.48. Профиль скорости охлаждения заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени

Как видно из представленных рисунков, на начальном этапе процесса (порядка 0,5 с) происходит резкое охлаждение поверхности заготовки и областей, непосредственно к ней прилегающих. При этом температура центральных областей детали практически не изменяется. По истечении некоторого времени процесс охлаждения достигает центра, и стальная пластина начинает охлаждаться как единое целое, причем скорость охлаждения внутренних областей становится даже несколько выше, чем на поверхности (рис. 5.43 и 5.44). Особый интерес вызывает рис. 5.44, показывающий появление на начальных этапах процесса ярко выраженного пика скорости охлаждения, который движется от поверхности к центру заготовки и исчезает при достижении плоскости симметрии.

Полученные решения (5.30), (5.31) должным образом описывают динамику температурных полей в нагретых металлических пластинах в процессе их охлаждения в том случае, когда теплофизические характеристики материала изделий постоянны (не зависят от температуры) или испытывают незначительные вариации при изменении величины нагрева. Изменение температуры в рассматриваемом процессе (рис. 5.43 и 5.44) за относительно короткий промежуток времени достигает  $750^{\circ}\text{C}$ . По имеющимся данным, температурную зависимость ТФХ стали 60ПП можно аппроксимировать следующими выражениями:

$$\lambda(T) = 52,337 - 3,5 \cdot 10^{-3} T - 3,745 \cdot 10^{-5} T^2, \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right), \quad (5.32)$$

$$c(T) = 475 + 0,44691 T, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right). \quad (5.33)$$

Как видно из формул (5.32) и (5.33), на указанном интервале изменения температуры теплофизические характеристики также будут претерпевать существенные изменения, что, в свою очередь, может оказывать сильное влияние на протекание процесса охлаждения. С целью анализа этого влияния было проведено моделирование процесса при ТФХ, соответствующих по приведенным уравнениям температурам  $800^{\circ}\text{C}$  и  $200^{\circ}\text{C}$ . Результаты моделирования приведены на рис. 5.49–5.52.

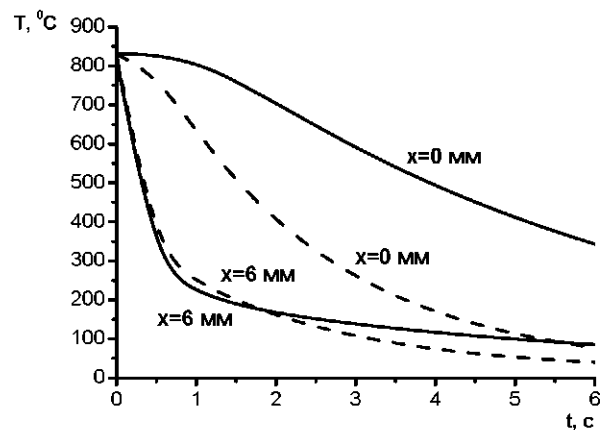


Рис. 5.49. Изменение температуры точек заготовки со временем (в зависимости от их положения):  
 $x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  $x = 6$  мм – поверхность детали; и ТФХ материала: — — —  $T = 800$  °С; - - - -  $T = 200$  °С

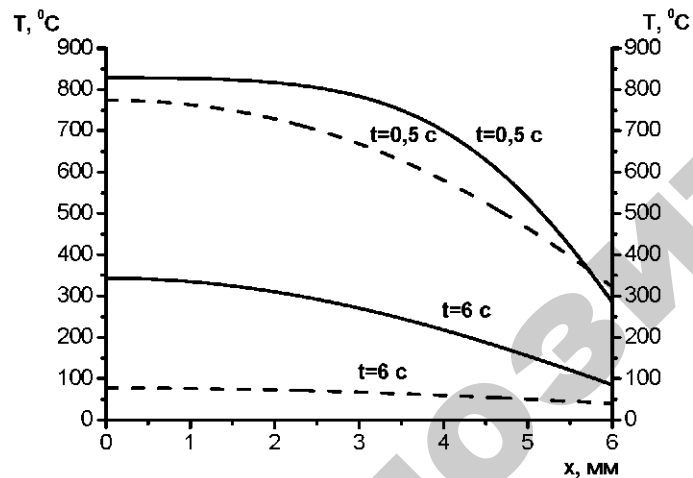


Рис. 5.50. Профиль температуры заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени охлаждения и ТФХ материала:  
 — — —  $T = 800$  °С; - - - -  $T = 200$  °С

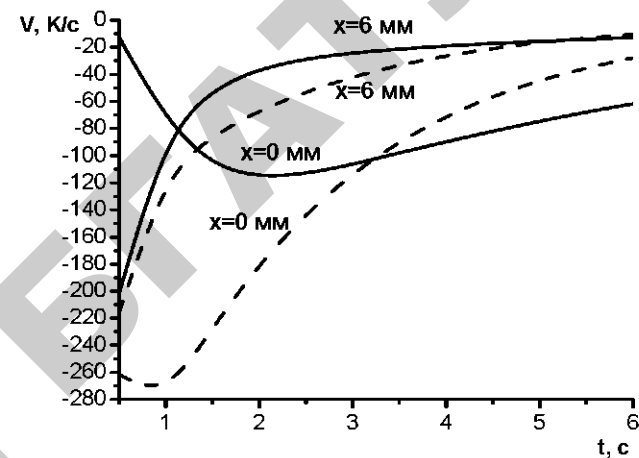


Рис. 5.51. Изменение скорости охлаждения точек заготовки со временем (в зависимости от их положения):  
 $x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  $x = 6$  мм – поверхность детали; и ТФХ материала: — — —  $T = 800$  °С; - - - -  $T = 200$  °С

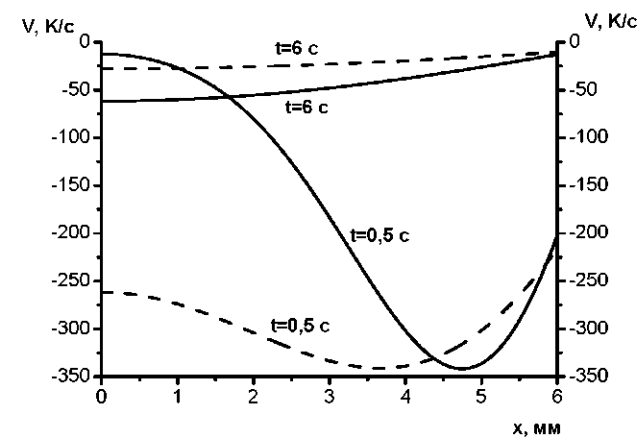


Рис. 5.52. Профиль скорости охлаждения заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени и ТФХ материала:  
 — — —  $T = 800$  °С; - - - -  $T = 200$  °С



Различия в теплофизических характеристиках (см. рис. 5.49–5.52) приводят к существенному изменению характера протекания тепловых процессов в пластине. В особенности это касается скорости изменения температуры в глубине заготовки в начальный период охлаждения. Рисунки 5.47 и 5.48 показывают, что при ТФХ, соответствующих температуре нагрева 200 °С, скорость охлаждения в плоскости симметрии достигает предельного значения в течение первой секунды процесса, тогда как для ТФХ, соответствующих 800 °С, охлаждение практически только начинается. Кроме того, максимальное значение при 200 °С более чем в два раза превосходит аналогичный параметр при 800 °С. С точки зрения абсолютной температуры, это приводит к значительно более быстрому выравниванию температурного профиля по всей толщине пластины (рис. 5.46). Отмеченные особенности указывают на важность учета температурной зависимости ТФХ материала изделия при решении поставленной задачи. Такой учет приводит к необходимости решать вместо линейного уравнения (5.11) первоначальное уравнение (5.10), которое записывается в следующем виде (плотность стали 60ПП не зависит от температуры):

$$\rho c(T(x,t)) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial \lambda(T(x,t))}{\partial x} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + \lambda(T(x,t)) \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}. \quad (5.34)$$

Начальное и граничные условия записываются для случая температурной зависимости коэффициента теплопроводности:

$$T(x, 0) = T_0, \quad (5.35)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0, \quad (5.36)$$

$$\lambda(T(l, t)) \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} = -\alpha(T(l, t) - T_c). \quad (5.37)$$

Уравнения вида (5.32) принадлежат к классу нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами переноса и допускают решения в аналитическом виде только для неко-

торых частных случаев. К тому же мы имеем также и нелинейное граничное условие (5.35). Поэтому, для решения задачи (5.32)–(5.35) применим аппарат численных методов математической физики и использование явной конечно-разностной схемы для задач теплопроводности с граничными условиями, содержащими производные.

В пространственно-временной области  $0 \leq x \leq l$ ,  $0 \leq t \leq T$  рассматривается описываемая дифференциальным уравнением второго порядка эволюция некоторой функции  $f$ . Для этого наносится на указанную область конечно-разностная сетка  $\omega_{h,\tau}$ :

$$\omega_{h,\tau} = \{x_j = jh, j = \overline{0, N}; t^k = k\tau, k = \overline{0, K}\}, \quad (5.38)$$

с пространственным шагом  $h = l/N$  и шагом по времени  $\tau = T/K$ . Вводятся два временных слоя: нижний  $t^k = k\tau$ , на котором распределение искомой функции  $f(x_j, t^k)$ ,  $j = \overline{0, N}$ , известно (при  $k = 0$  распределение определяется начальным условием), и верхний временной слой  $t^{k+1} = (k+1)\tau$ , на котором распределение искомой функции  $f(x_j, t^{k+1})$ ,  $j = \overline{0, N}$ , подлежит определению. На сетке вводятся сеточные функции  $f_j^k$ ,  $f_j^{k+1}$ , первая из которых известна, вторая – подлежит определению. Для этого заменяются в исходном уравнении дифференциальные уравнения отношениями конечных разностей:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_j^k = \frac{f_j^{k+1} - f_j^k}{\tau}, \quad (5.39)$$

$$\left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_j^k = \frac{f_{j-1}^k - 2f_j^k + f_{j+1}^k}{h^2}. \quad (5.40)$$

Подставляя (5.39) и (5.40) в конкретную исходную задачу, получим явную конечно-разностную схему для этой задачи.

Рассматриваемая задача (5.34)–(5.37) в окончательной конечно-разностной форме примет вид:

$$T_j^{k+1} = \frac{\tau}{\rho c_j h^2} \left( (\lambda_{j+1}^k - \lambda_j^k) (T_{j-1}^k - T_j^k) + \lambda_j^k (T_{j-1}^k - 2T_j^k + T_{j+1}^k) \right) + T_j^k, \quad j = \overline{1, N-1}, \quad k = \overline{0, K-1}, \quad (5.41)$$

$$T_j^0 = T_0, \quad j = \overline{0, N}, \quad (5.42)$$

$$T_0^k = T_1^k, \quad k = \overline{0, K}, \quad (5.43)$$

$$T_N^k = \frac{\lambda_{N-1}^k T_{N-1}^k + ah T_c'}{\lambda_N^k + ah}, \quad k = \overline{0, K}. \quad (5.44)$$

Таким образом, системой (5.41)–(5.44) – полностью определяется динамика температурного поля в нагретой металлической пластине, подвергающейся спреерному охлаждению с боковых поверхностей. Алгоритм решения следующий:

1. Уравнение (5.42) задает начальное распределение температуры.
2. С помощью уравнения (5.41) определяется температура во внутренних пространственных точках на втором временном слое.
3. Уравнения (5.43) и (5.44) (граничные условия) дают температуру во внешних пространственных точках.
4. По уравнениям (5.34), (5.35) рассчитывают новые значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости и далее – переход к следующему временному слою.

В заключение, условие устойчивости Куранта для разработанной явной конечно-разностной схемы:

$$\frac{\alpha^2 \tau}{h^2} \leq 0,5. \quad (5.45)$$

С помощью соотношения (5.45) определяются величины шагов разбиения пространственно-временной области.

Результаты моделирования тепловых процессов при температурозависимых коэффициентах переноса приведены на рис. 5.53–5.60.

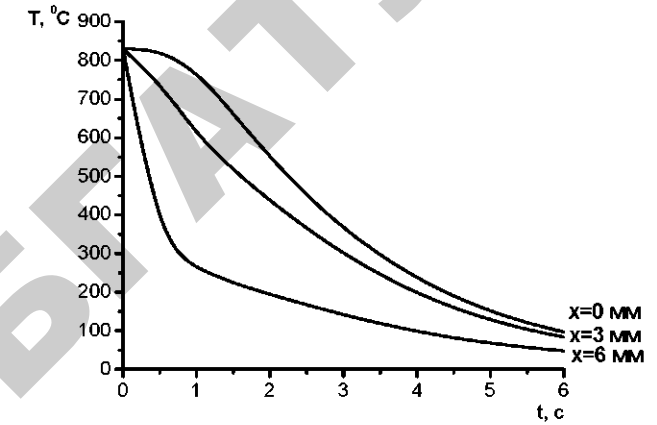


Рис. 5.53. Изменение температуры точек заготовки со временем (в зависимости от их положения):

$x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  $x = 6$  мм – поверхность детали (коэффициенты переноса зависят от температуры)

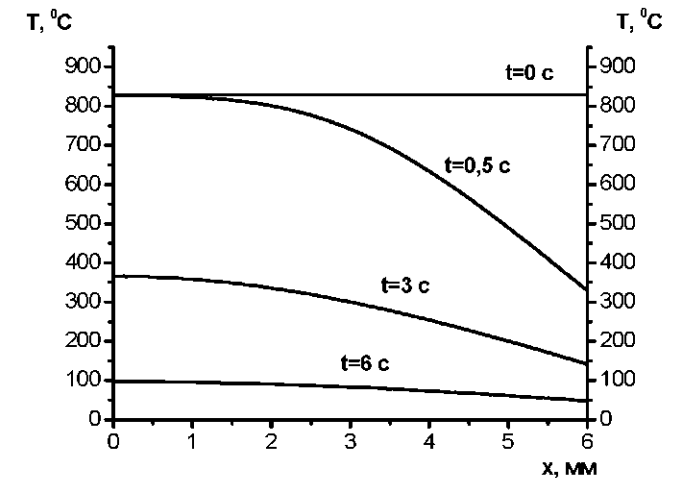


Рис. 5.54. Профиль температуры заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени охлаждения (коэффициенты переноса зависят от температуры)

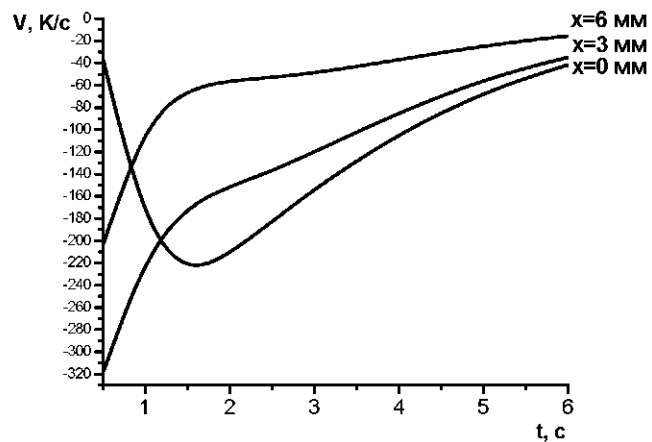


Рис. 5.55. Изменение скорости охлаждения точек заготовки со временем (в зависимости от их положения):

$x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  $x = 6$  мм – поверхность детали (коэффициенты переноса зависят от температуры)

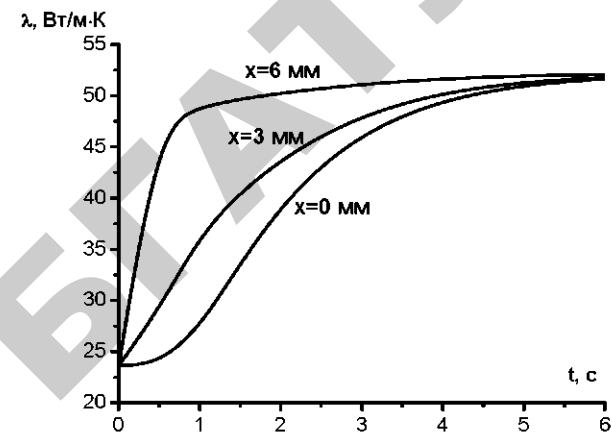


Рис. 5.57. Изменение коэффициента теплопроводности в различных точках заготовки со временем в процессе охлаждения:

$x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  $x = 6$  мм – поверхность детали

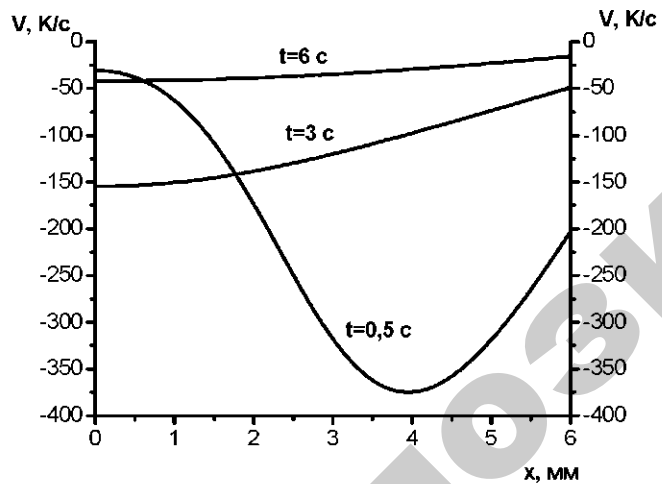


Рис. 5.56. Профиль скорости охлаждения заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени (коэффициенты переноса зависят от температуры)

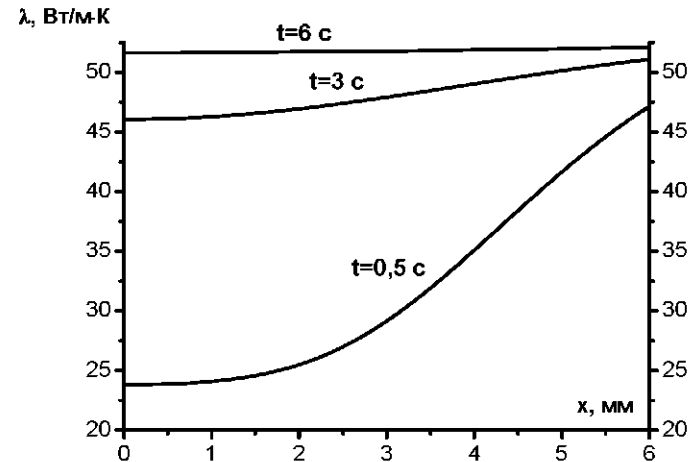


Рис. 5.58. Профиль коэффициента теплопроводности материала заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени охлаждения

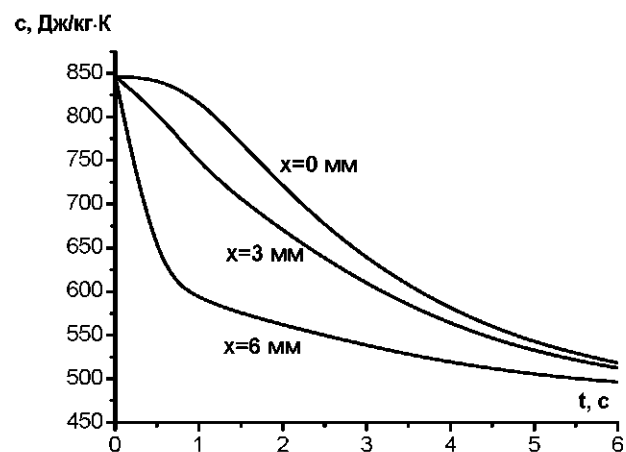


Рис. 5.59. Изменение удельной теплоемкости в различных точках заготовки со временем (в процессе охлаждения):  
 $x = 0$  мм – центральная плоскость симметрии детали;  
 $x = 6$  мм – поверхность детали

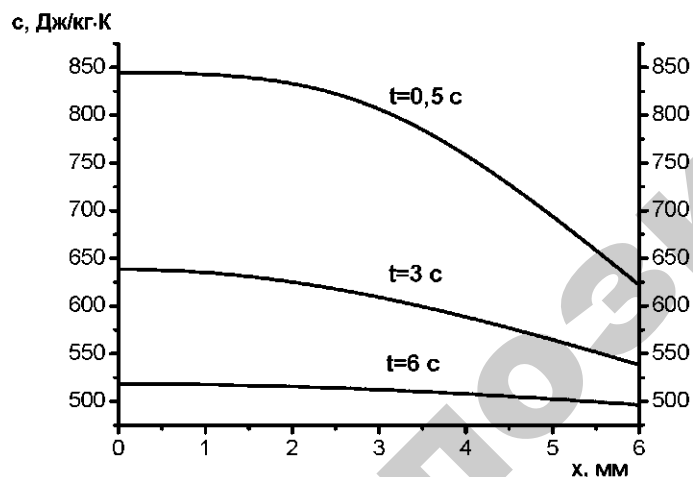


Рис. 5.60. Профиль удельной теплоемкости материала заготовки от центральной плоскости симметрии к поверхности в зависимости от времени охлаждения

### 5.4.2. Высокочастотное термическое модифицирование

При высокочастотном термическом модифицировании заготовка подвергается нагреву в индукторе высокочастотной установки и в последующем охлаждается в специальном устройстве с требуемой скоростью. От правильного выбора оборудования для индукционного нагрева заготовок и технологической оснастки во многом зависит производительность, энергоёмкость, качество и, в конечном итоге, себестоимость продукции. Современный мировой уровень оборудования предусматривает возможность использования разнообразных типов источников питания с преобразователями частоты, выбираемых с учетом индивидуальных особенностей нагревательных установок, требуемой частоты, мощности, параметров индуктора и др. факторов.

Оборудование для высокочастотного нагрева заготовок деталей. Высокочастотный (индукционный) нагрев металлов по сравнению с так называемыми традиционными методами является наиболее эффективным и экономичным. При традиционных способах нагрев осуществляется за счет теплопередачи от источника тепла к нагреваемому телу, то есть происходит косвенный нагрев с существенными потерями энергии. При индукционном способе нагрев производится токами большой величины, протекающими непосредственно в металле. Токи наводятся (индуцируются) переменным магнитным потоком, пронизывающим металл. Магнитный поток, в свою очередь, создается в индукторе (катушке индуктивности, охватывающей нагреваемый объем металла) током генератора – преобразователя частоты. Индуктор, по сути дела, является трансформатором тока, многократно увеличивающим ток генератора.

Интенсивность нагрева, прежде всего, зависит от физических свойств металла (эквивалентного активного сопротивления), мощности генератора (величины тока), а также частоты тока. Вследствие так называемого поверхностного эффекта, индукционный переменный ток протекает не по всему объему металла, а только в поверхностном слое, называемом глубиной проникновения тока, и находящимся в обратной зависимости от частоты. Нагрев металла происходит непосредственно на глубину проникновения тока. Важнейшее свойство индукционного нагрева – способность быстрого нагрева ограниченной зоны, регулируемая выдержка времени нагрева.

Данные свойства позволяют производить с помощью индукционного нагрева разнообразные технологические операции. Основным элементом установки индукционного нагрева является источник питания. Имеется большое количество разнообразных источников питания, начиная с промышленной сети 50 Гц, машинных, ламповых генераторов, современных тиристорных и транзисторных преобразователей частоты. Из-за недостатков ранее широко используемые машинные преобразователи (невысокий КПД, шум и необходимость их размещения в обособленных помещениях) и ламповые генераторы (невысокий КПД, небольшой ресурс генераторных ламп, использование высокого напряжения) уступают свое место статическим (тиристорным и транзисторным) генераторам.

Наибольшее распространение в промышленности получили индукционные установки с тиристорными преобразователями частоты. В настоящее время выпускается уже пятое их поколение. Тиристорные преобразователи всех поколений зарекомендовали себя как надежные, универсальные преобразователи с широким диапазоном регулировочных характеристик, позволяющим использовать их в качестве источников питания для индукционных плавильных печей, установок индукционного нагрева под пластическую деформацию и закалку. Регулировочные характеристики позволяют обеспечить диапазон изменения параметров выходного напряжения от 10 % до 100 %, выходной мощности от 3 % до 100 %. Преобразователи могут работать в повторно-кратковременном режиме с частотой включения до 15 раз в минуту. Последнее является особенно ценным, когда преобразователи применяются для закалки деталей, в процессе которой требуются частые пуски.

Основными параметрами, определяющими выбор высокочастотного оборудования для термообработки дискообразных деталей, является частота тока и мощность преобразователей частоты. При выборе частоты необходимо учитывать, что для каждого размера сечения детали существует определенная частота, при которой возможен нагрев до температур аустенизации стали с высоким значением КПД индуктора. Наименьшее желательное значение этой частоты может быть определено по зависимости:

$$f = \frac{5000}{d^2}, \quad (5.46)$$

где  $d$  – толщина поперечного сечения детали, см.

Исходя из толщины дисковых рабочих органов с.-х. машин, которая, в большинстве случаев, не превышает 8 мм, минимальное расчетное значение частоты тока будет составлять около 7,8 кГц.

Мощность преобразователя

$$P_T = \frac{P_0 S}{\eta_{\text{и}} \eta_{\text{т}} \eta_{\text{к}} \eta_{\text{л}}}, \quad (5.47)$$

где  $P_0$  – мощность на единицу площади одновременно нагреваемой поверхности детали, кВт/см<sup>2</sup>;

$S$  – площадь нагреваемой поверхности изделия, см<sup>2</sup>;

$\eta_{\text{и}}$ ,  $\eta_{\text{т}}$ ,  $\eta_{\text{к}}$ ,  $\eta_{\text{л}}$  – соответственно КПД индуктора, закалочного трансформатора, конденсаторной батареи и линии электропередачи.

Для снижения неравномерности нагрева детали при частоте тока 10 кГц и глубине нагрева до 4 мм значение удельной мощности рекомендуется принимать равным 0,8 кВт/см<sup>2</sup>, КПД индуктора, закалочного трансформатора, конденсаторной батареи и линии электропередачи для предварительных расчетов соответственно равны 0,75; 0,85; 0,97; 0,95. Тогда требуемая мощность преобразователя индукционной установки для нагрева локальной части диска площадью 36 см<sup>2</sup> будет составлять около 50 кВт.

Вышеизложенное позволяет рекомендовать для высокочастотного нагрева заготовок при их модифицировании тиристорную установку СВГ-50/10 в составе генератора среднечастотного СЧ1-50/10, блока закалочного БЗ2-100/10 и станции водоохлаждения СВ1-1,7.

*Технологическая оснастка.* В качестве технологической оснастки при высокочастотном термическом модифицировании применяются индуктор, спрейерное устройство, контрольно-измерительная аппаратура.

Посредством индуктора происходит преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую. Индуктор состоит из индук-

тирующего провода, токоподводящих шин, колодок для подключения к источнику питания и электроизоляционного покрытия. Конструкция и размеры индуктора зависят от размеров и конфигурации нагреваемой детали, способа загрузки и выгрузки детали в индуктор, мощности и частоты источника питания. Практика показывает, что для индукционного нагрева деталей требуется индивидуальная разработка индукторов.

При разработке конструкции индуктора исходят, прежде всего, из необходимости одновременного достижения требуемой температуры всеми участками нагреваемой детали, что обеспечивается соответствующей формой индуктирующего провода, так как она во многом определяет форму контура протекающего по детали тока. При нагреве дискообразной детали конфигурация индуктора должна обеспечивать не только равномерный нагрев, но и возможность сквозного прохода через индуктор нагреваемой части при вращении детали в процессе нагрева. Для этих целей рекомендуются индукторы с петлевой формой индуктирующего провода, который состоит из криволинейных участков (с учетом диаметра диска), замкнутых лобовыми частями. Форма лобовых частей петлевого (проходного) индуктора обеспечивает возможность ввода и вывода нагреваемого сегмента диска. Толщина стенки медного индуктора, рекомендуемая для частоты 10 кГц, должна быть от 3,2 до 4,0 мм. При меньших значениях толщин стенки снижается КПД индуктора.

Большое влияние на интенсивность и равномерность нагрева оказывают зазоры между индуктирующим проводом и деталью. Подбор зазоров используют в качестве одного из средств достижения равномерного нагрева. Уменьшение зазора увеличивает удельную мощность и сужает зону нагрева. Чем меньше зазор, тем более жесткими должны быть допуски на положение детали в индукторе и тем более жестким механически должен быть сам индуктор. Отклонение положения нагреваемого изделия в индукторе при малых зазорах приводит к большей неравномерности нагрева, чем то же отклонение при больших зазорах. Не рекомендуется брать зазоры менее 1,5–2 мм. Однако слишком больших зазоров также следует избегать, так как они ухудшают коэффициент мощности и коэффициент полезного действия индуктора, увеличивают расход электроэнергии. Для частоты тока 10 кГц рекомендуемое расстояние от индуктора до нагреваемой поверхности детали должно быть в пределах 2–3 мм.

С целью повышения безопасности обслуживания индукторов, а также для предохранения от аварий при случайном соприкосновении нагреваемых деталей с включенным индуктором, на индуктирующий провод желательно наносить электроизоляционное покрытие, которое должно выдерживать без разрушения тепловое излучение от нагреваемой заготовки, обладать высокой влагостойкостью и достаточной механической прочностью. Простейшая электроизоляция обеспечивается путем обмотки индуктирующего провода стеклянной или асбестовой нитью (лентой). Также для предупреждения соприкосновения детали с индуктирующим проводом могут применяться различные керамические прокладки из кордиерита, корунда (алунда), карбидкремния (карборунда), шамота и других огнеупорных материалов.

Спрейерным устройством осуществляется обработка водяным душем локально нагретой части дискообразной детали на выходе из индуктора. Ширина зоны спрейерного охлаждения должна составлять порядка 20–25 мм. Вода (температура 288–308 К) подается в спрейерное устройство под избыточным давлением около 0,35–0,4 МПа. Для обеспечения достаточной интенсивности охлаждения расход воды должен превышать  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$ , зазор между спрейером и охлаждаемой поверхностью принимают равным 5–15 мм. При больших зазорах следует увеличивать расход воды. Угол падения струй воды на охлаждаемую поверхность изделия должен быть 30–40°. Применение воды с температурой ниже 288 К будет способствовать образованию закалочных трещин, а с температурой выше 308 К может вызвать снижение твердости.

Важнейшим параметром, характеризующим режим модифицирования заготовки, является температура ее нагрева перед охлаждением. Контроль и управление температурой нагрева могут быть обеспечены контрольно-измерительным комплексом в комплекте с пирометрическим прибором «Кельвин 200ЛЦМ».

*Температура нагрева заготовки.* Нагрев определяет размер зерна аустенита, следовательно, и величину кристаллов пластин мартенсита, глубину закалки и степень однородности или неоднородности полученного твердого раствора. Оптимальным режимом нагрева является такой, при котором после закалки стали с наиболее низкой температуры, при данной скорости нагрева, достигается структура безгольчатого, равномерно травящегося мартенсита. Из этого следует, что оптималь-

ному режиму индукционного нагрева, обеспечивающему получение наилучшего сочетания свойств стали, имеющей структуру отпущенного мартенсита, соответствует размер начального зерна аустенита, возникающего в стали сразу после завершения образования достаточно однородного гамма-состояния во всем нагреваемом объеме.

Установлено также, что увеличение скорости нагрева с 0,5 °С до 10–100 °С/с при дисперсных исходных структурах измельчает начальное зерно стали с 8-9-го до 13-14-го балла. При скоростях нагрева около 10 °С/с на дисперсных исходных структурах получается некоторый промежуточный размер зерна аустенита – 11-12-й балл.

Таким образом, при использовании мелкодисперсной исходной структуры имеется возможность изменять начальное зерно аустенита в широком интервале путем выбора той или иной скорости нагрева. При этом условиями, необходимыми для получения «сверхмелкого» начального зерна аустенита 14-15-го балла, являются мелкодисперсная исходная структура и относительно высокие скорости нагрева – 10–100 °С/с.

Для осуществления процесса высокочастотного объемного термического модифицирования установлено, что температура нагрева стали 60ПП должна находиться в пределах 1123–1223 К.

*Охлаждение заготовки.* Интенсивность охлаждения влияет, главным образом, на твердость, глубину прокаливаемости, внутренние напряжения и степень распада мартенсита. На качество закаленной детали влияют так же режимы охлаждения заготовки. К ним относятся: скорость охлаждения нагретой части заготовки в спрейсе, температура охлаждающей среды и избыточное давление в системе спрейерного охлаждения. Установлено, что интенсивность процесса струйного охлаждения во многом определяют гидродинамические параметры, которыми характеризуется система капель непосредственно перед охлаждаемой поверхностью – скорость капель и распределение их по размеру.

Эти параметры зависят от количества подаваемой жидкости, вида и расположения распыляющих устройств, а также от расстояния между срезом сопла и охлаждаемой поверхностью. В зависимости от того, какая область струи соприкасается с охлаждаемой поверхностью, можно осуществить процесс теплосъема как с помощью сплошных струй, так и применяя диспергированные струи. Под термином «сплошная струя» следует понимать характеристику, которая указывает на отсутствие видимого распада струи на отдельные капли.

В ходе экспериментов были рассмотрены гидродинамические характеристики жидких струй и пленок, процессов их образования и распада для конкретных конструкций распыляющих устройств, определен фактический коэффициент расхода охлаждающей жидкости. В работе применялся механический метод распыливания, когда жидкость (вода) вытекает в неподвижную газовую среду (воздух). В связи с этим для подачи охлаждающей воды на нагретую вертикальную поверхность стальной пластины использовались простейшие механические струйные форсунки, представляющие собой цилиндрические и щелевые сопла.

Для обеспечения равномерного распределения массового потока охлаждающей жидкости по всей орошаемой поверхности нагретого образца, стенки водоподающего коллектора, обращенные к охлаждаемой поверхности, были перфорированы в шахматном порядке цилиндрическими и/или щелевидными отверстиями в количестве до 1000 штук.

В процессе проведения гидродинамических испытаний для всех видов используемых в опытах сопел были определены фактические коэффициенты расхода. Эксперименты проводились при величине перепада давления жидкости на форсунке, равной 0,35 МПа, и температуре подаваемой воды, равной +18 °С. Коэффициент расхода определялся как отношение измеренной в ходе опытов величины объемного расхода  $Q_3$  к расчетной величине объемного расхода  $Q_T$  в соответствии с методикой. Сопло № 1 было выполнено в виде цилиндрического отверстия, сопла № 2–4 представляли собой щелевидные прямоугольные отверстия. Результаты обработки опытных данных представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

*Расход охлаждающей жидкости в зависимости от параметров сопла*

№ сопла	Параметры сопла				Отношение длины сопла к ширине $d_0/h_0$	Расчетный расход воды $Q_T$ , мл/с	Измеренный расход воды $Q_3$ , мл/с	Коэффициент расхода $\mu$
	диаметр $d$ , мм	ширина $h_0$ , мм	длина $d_0$ , мм	площадь поперечного сечения $f$ , мм <sup>2</sup>				
1	1,5	–	–	1,77	–	46,4	28,8	0,62
2	–	0,5	2,0	1,0	4,0	26,2	21,0	0,8
3	–	1,0	1,0	1,0	1,0	26,2	21,0	0,8
4	–	0,67	1,5	1,0	2,24	26,2	22,0	0,84

Из анализа представленных в табл. 5.1 данных видно, что наиболее эффективными с точки зрения использования расхода охлаждающей жидкости представляются сопла, выполненные в виде плоских прямоугольных щелей – № 2–4. Коэффициент расхода для них изменяется в пределах от 0,8 до 0,84. Для струйных форсунок можно достичь высоких значений коэффициента расхода (до 0,87) посредством профилирования цилиндрического сопла, создания конических сопел и т. д. Однако все это приводит к удорожанию конструкции распыливающего устройства.

Полученные опытные данные по гидродинамике для щелевых сопел № 2–4 хорошо согласуются с результатами серии расчетных и экспериментальных исследований. Авторы получили на основе полуэмпирического метода уравнение веерообразного контура жидкой пленки, вытекающей из плоской прямоугольной щели.

Для проверки справедливости полученного уравнения были проведены эксперименты, в которых менялись размеры щелевых сопел. Было получено хорошее согласование опытных и расчетных данных. В частности установлено, что для плоской щели коэффициент расхода зависит только от величины отношения длины сопла  $d_0$  к его ширине  $h_0$ . Причем оптимальным является диапазон  $1,7 \leq d_0/h_0 \leq 2,4$ . В этом случае коэффициент расхода щелевого сопла находится в пределах  $0,81 \leq \mu \leq 0,85$ . Показано, что использовать щелевые сопла с соотношением геометрических характеристик  $d_0/h_0 < 1,7$  или  $d_0/h_0 > 2,4$  нецелесообразно, так как в этом случае величина коэффициента расхода снижается.

Так же были определены длины нераспавшейся части пленки. Распад веерообразной жидкой пленки, вытекающей из плоской щели, происходит вследствие перфорации поверхности пленки отверстиями, вплоть до появления тонких нитей, распадающихся на отдельные капли. При расположении охлаждаемой поверхности относительно среза сопла важно знать, на каком расстоянии от сопла происходит распад пленки на капли. В этом случае можно производить орошение охлаждаемой поверхности как сплошной, так и диспергированной струями.

В частности, для охлаждения низкотемпературных поверхностей (до 100 °С) находит широкое применение струйное охлаждение жидкостью без предварительного ее диспергирования. В этом случае невелики энергетические затраты на подачу жидкости. Определены величины радиуса нераспавшейся части пленки  $r$  были выполнены для сопла № 4. Результаты расчета представлены на рис. 5.61 и в табл. 5.2.

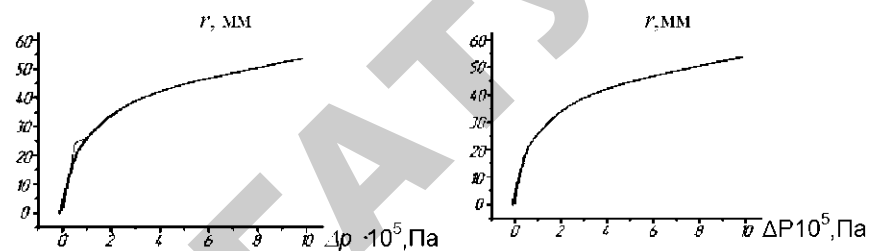


Рис. 5.61. Зависимость величины радиуса ( $r$ ) нераспавшейся части пленки от величины перепада давления ( $\Delta p$ ) на плоском сопле

Таблица 5.2

Результаты определения радиуса нераспавшейся части пленки

Перепад давления $\Delta p \cdot 10^5, \text{Па}$	0,5	1,0	2,0	3,5	5,0	8,0	10,0
Радиус нераспавшейся части пленки $r, \text{мм}$	24	26	33	40	42	50	54
Скорость распада пленки на срезе сопла $V, \text{м/с}$	8,5	12	17	23	27	34	38

Из анализа полученных результатов видно, что на начальном этапе в диапазоне величин перепада давления от 0 до 0,5 МПа происходит быстрый рост длины жидкой пленки. В дальнейшем наблюдается плавное возрастание величины радиуса нераспавшейся части пленки по мере роста перепада давления воды на форсунке.

После того, как определена структура жидкой пленки, необходимо определить диаметры капель, на которые начинает дробиться край пленки за пределами своей нераспавшейся части.

Размер диаметра капли распада пленки является необходимой величиной для оценки характеристик теплообмена в условиях охлаждения



струями диспергированной жидкости. Определение размера диаметра капли производилось для той же форсунки №4 при ранее принятых условиях испытаний:  $\Delta p = (0,5-10) \cdot 10^5$  Па;  $t_{cp} = +18$  °С. В основу расчета положена критериальная зависимость для определения медианного диаметра капли распада жидкой пленки, вытекающей из щелевого сопла:

$$d_m K^{0,5} = W_1^{-0,333} F_1^{0,333} F_2, \quad (5.48)$$

где  $d_m$  – медианный диаметр капли, м;

$W_1 = \rho_1 V^2 D \sigma^{-1}$  – критерий Вебера;

$f_c$  – площадь проходного сечения сопла, м<sup>2</sup>;

$F_1, F_2$  – функции критерия Рейнольдса;

$Re_1 = (W_1 L p_1)^{0,5}$  – критерий Рейнольдса;

$L p_1 = \rho_1 \mu_1^2 D \sigma$  – число Лапласа.

Результаты расчета представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Результаты определения диаметра капли распада жидкой пленки

Перепад давления $\Delta p \cdot 10^5$ , Па	0,5	1,0	2,0	3,5	5,0	8,0	10,0
Скорость пленки на срезе сопла $V$ , м/с	8,5	12	17	23	27	34	38
Число Вебера $W_1$	47	93	186	341	470	745	930
Число Рейнольдса $Re_1$	400	564	799	1081	1269	1598	1786
Функция $F_1$	3	3	3	3	3	3	3
Функция $F_2$	4	4	4	4	4	4	4
Диаметр капли $d_m \cdot 10^{-3}$ , м	0,58	0,46	0,36	0,3	0,27	0,23	0,21

В ходе экспериментов установлено соответствие технологических параметров режимов НПВМ условиям получения качества термической обработки стали пониженной прокаливаемости:

– скорость охлаждения нагретой части заготовки в спрейере в процессе закалки составляет не менее 1500 К/с;

– температура охлаждающей среды должна находиться в пределах 288–308 К;

– избыточное давление воды в системе спрейерного охлаждения должно быть в пределах около 0,35–0,40 МПа.

Практически также установлено, что при скорости охлаждения ниже 1500 К/с на поверхности металла могут образоваться микротрещины вплоть до растрескивания заготовки.

*Скорость перемещения заготовки в индукторе.* Для проведения исследований был спроектирован и собран механизм, предназначенный для вертикального перемещения заготовки в индукторе при высокочастотном объемном термическом модифицировании с последующим спрейерным охлаждением. Это устройство значительно механизмирует труд рабочих. В нем использованы новые технические решения на основе частотно-регулируемого привода SV 0,04 IG 65-4U-RUS.

В разработанной конструкции установки для вертикального перемещения заготовки, деталь, которую нужно закалить, фиксируют при помощи винта на верхней лапе, затем запускают установку, индуктор и систему спрейерного охлаждения. Управляет процессом оператор при помощи пульта управления.

Вблизи индуктора устанавливается спрейер. Нагрев детали осуществляется при неподвижном индукторе, за счет перемещения лап с закрепленной в них заготовкой. В индукторе нагревается часть детали, которая охвачена индуктором. После достижения заданной температуры заготовка за счет перемещения механизма «винт-гайка» манипулятора попадает под спрейерный водяной душ. Спрейерное охлаждение обеспечивает высокую и равномерную твердость поверхности, обладает высокой производительностью. Количество подаваемой воды дозируется для осуществления непрерывной равномерной закалки по всей поверхности детали. После завершения цикла срабатывает реверсивное устройство, и лапы установки для вертикального перемещения заготовки занимают исходное положение (рис. 5.62 и 5.63).

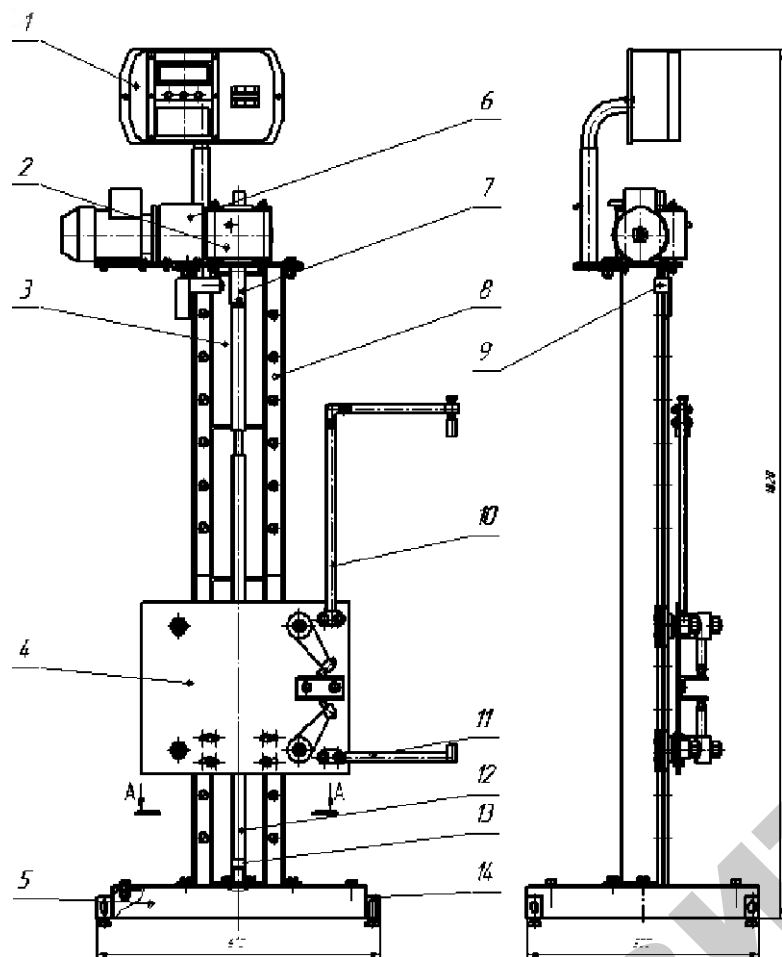


Рис. 5.62. Общий вид установки для вертикального перемещения заготовки:

1 – шкаф управления; 2 – механизм привода, 3 – станина, 4 – панель управления, 5 – основание, 6 – кожух, 7 – муфта, 8 – направляющая штанга, 9 – стопор, 10 – верхняя лапа, 11 – нижняя лапа, 12 – винт, 13 – втулка, 14 – опорная пятка

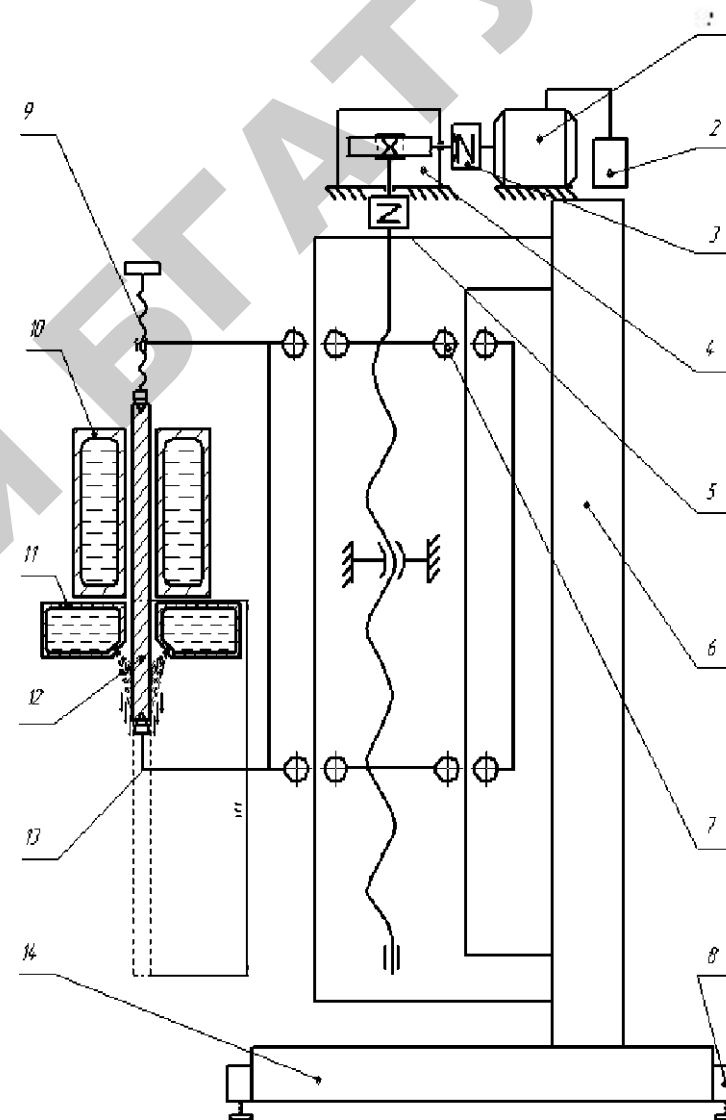


Рис. 5.63. Кинематическая схема установки для вертикального перемещения заготовки:

1 – электродвигатель, 2 – частотный регулятор, 3 – муфта, 4 – червячный редуктор, 5 – направляющая штанга, 6 – колонна, 7 – ролик, 8 – опора, 9 – опорный винт, 10 – индуктор, 11 – спрейер, 12 – заготовка, 13 – панель управления, 14 – основание

Привод конструкции осуществляется через мотор-редуктор 7МИ-М-40-10-ПЦ19/Л1-М314/160//0,37/4-14/160/000/М3081-IP55/F/230/400/50/U3/S1-K1 при помощи муфты. Также возможна замена муфты на клиноременную передачу. Перемещение детали в индукторе осуществляется со скоростью 2–30 мм/с. Скорость непрерывно-последовательного перемещения в индукторе детали зависит от мощности высокочастотного генератора.

*Твердость термически модифицированных заготовок.* Твердость исследовалась на приборе ТК-2 по методу Роквелла вдавливанием в поверхность испытуемого материала алмазного наконечника. Результаты измерений твердости по поперечному сечению заготовки толщиной 12 мм приведены в табл. 5.4. и на рис. 5.64.

Таблица 5.4

*Распределение твердости в поперечном сечении образца толщиной 12 мм из стали 60ПП после ИПВМ*

Расстояние от наружной поверхности, мм	Твердость, HRC
0	60–65
2	58–64
4	35–50
6	28–40

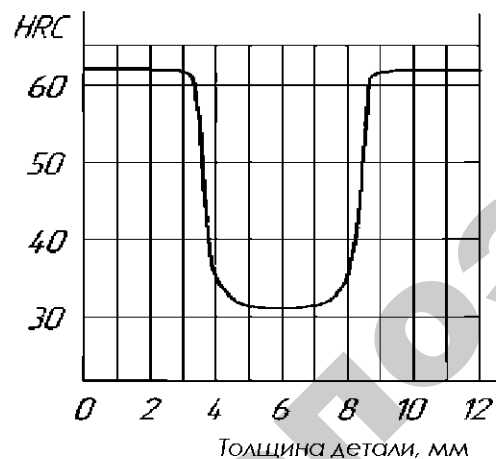


Рис. 5.64. График изменения твердости по поперечному сечению заготовки

Анализируя результаты опытов, можно отметить, что при индукционном нагреве заготовки из стали 60ПП с применением спрейсного охлаждения и отпуска при 180–230 °С твердость поверхности находится в пределах 55–64 HRC (рис. 5.65).

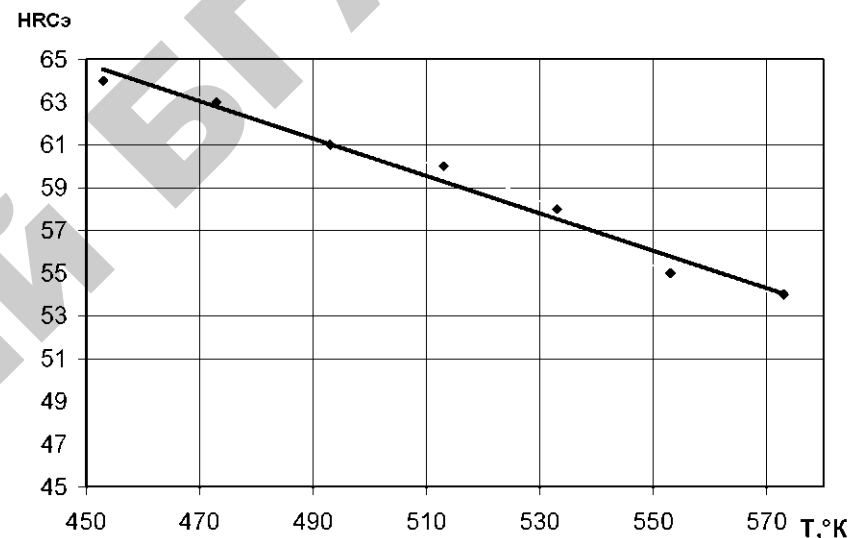


Рис. 5.65. Изменение твердости поверхности заготовки (сталь 60ПП) после ИПВМ в зависимости от температуры отпуска

*Ударная вязкость.* Исследования проводились на образцах сечением 10×10 мм на копре по методу Шарпи. Образцы после упрочнения непрерывно-последовательным высокочастотным модифицированием (твердость поверхности 60–64 HRC) подвергались отпуску при температуре в пределах от 180 °С до 300 °С. Изменение ударной вязкости в зависимости от температуры отпуска представлено графически на рис. 5.66.

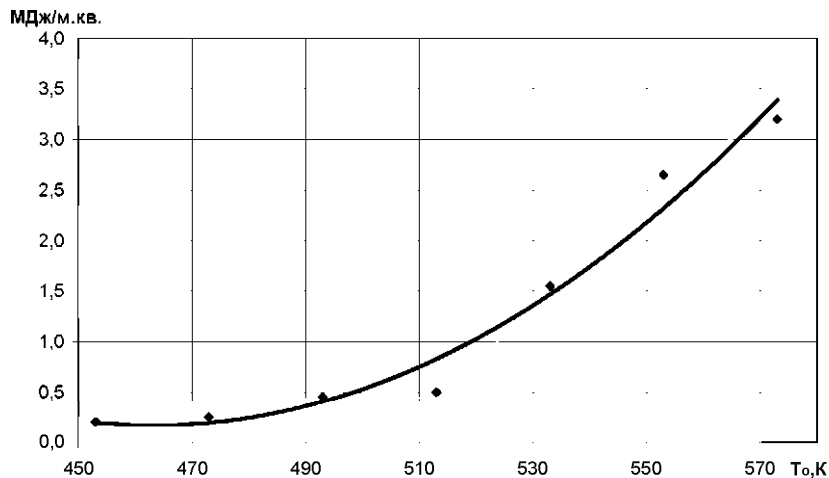


Рис. 5.66. Изменение ударной вязкости стали 60ПП после НППВМ в зависимости от температуры отпуска

**Микроструктура.** Термическое модифицирование с нагревом токами высокой частоты является методом упрочнения, при котором в поверхностном слое реализуется классическая схема закалки, основанная на превращении аустенита в мартенсит. Толщина упрочненного слоя достигается регулированием глубины прогрева деталей при равном по всему объему содержании углерода, которое должно превышать 0,3 %. Максимальная твердость на поверхности за счет высокой скорости нагрева и кратковременной выдержки на 5–7 HRC выше твердости тех же сталей, закаленных при печном нагреве.

В результате термического модифицирования при индукционном нагреве плоские детали из сталей пониженной прокаливаемости имеют диссипативное структурное строение. При этом поверхность имеет микроструктуру в виде отпущенного мартенсита и с твердостью 55–64 HRC, обеспечивая тем самым высокие износостойкие свойства, а сердцевина имеет микроструктуру (рис. 5.67) в виде троостита или троостосорбита, или сорбита с твердостью 28–40 HRC, что позволяет сохранять деталям высокую ударную вязкость в процессе работы.

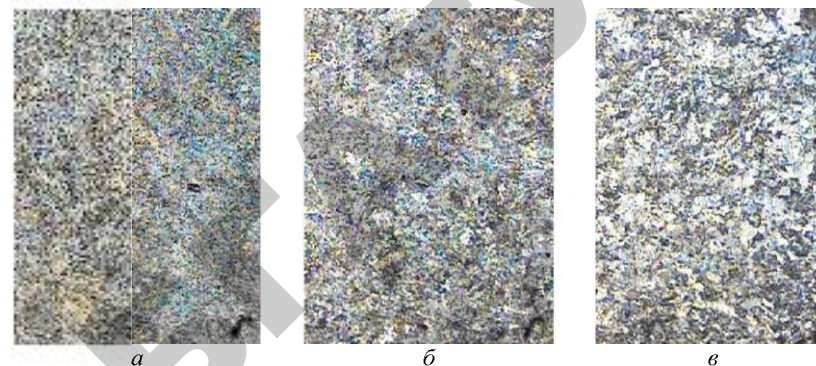


Рис. 5.67. Микроструктура заготовки после высокочастотного объемного термического модифицирования ( $\times 500$ ): а — поверхностный слой; б — переходный слой; в — вязкая сердцевина

**Интенсивность абразивного изнашивания.** В ходе лабораторных исследований испытывались образцы из стали 45 в отожженном состоянии, взятой за эталон, и образцы из стали 60ПП, закаленные при высокочастотном объемном термическом модифицировании при разных режимах. Как показывают результаты испытаний, относительная износостойкость материала прямо пропорциональна твердости испытуемого образца (табл. 5.5).

На рис. 5.68 представлены фотографии изношенной поверхности металла после проведения испытаний. Зависимость износостойкости от типа и твердости материала представлены на рис. 5.69 и 5.70.

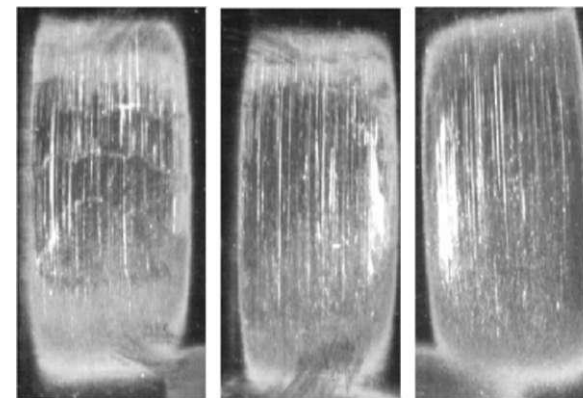


Рис. 5.68. Внешний вид лунки после испытаний образцов на абразивное изнашивание при трении о нежестко закрепленный кварцевый абразив

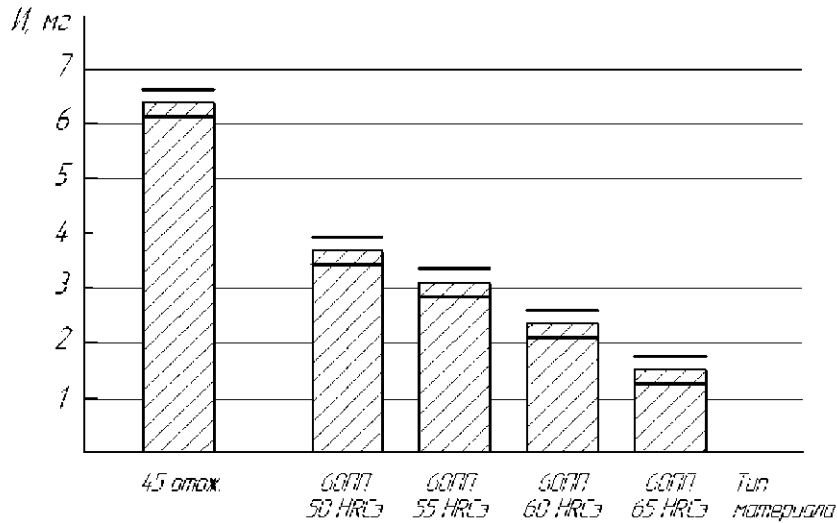


Рис. 5.69. Диаграмма зависимости износа от типа материала

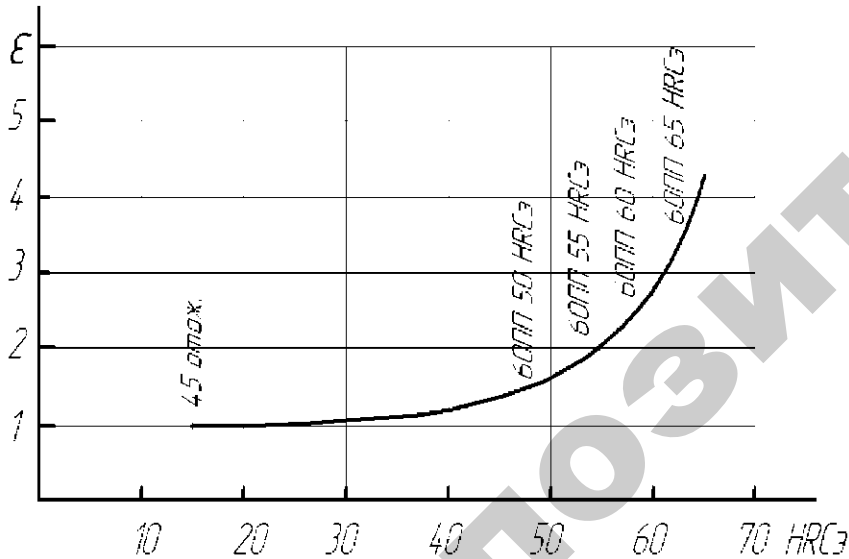


Рис. 5.70. График зависимости относительной износостойкости от твердости материала

Результаты испытаний образцов на изнашивание

№ опыта	№ образца	Твердость, HRC	Износ образца, мг			Среднее значение за 3 замера	Относительная износостойкость
			№ замера				
Сталь 45, n = 3600, N = 14,32 Н, t = 30 мин							
1	Эта-лон	180–200НВ	6,7	6,1	6,5	6,4	1,0
60НП, n = 3600, N = 14,32 Н, t = 30 мин							
2	1	50	3,5	3,9	3,7	3,7	1,73
3	2	55	3,4	2,9	3,2	3,1	2,06
4	3	60	2,4	2,1	2,4	2,4	2,66
5	4	65	1,6	1,5	1,4	1,5	4,27

### 5.5. Технология диффузионного намораживания

В современном машиностроении широко используются детали и элементы биметаллических конструкций (стальная основа – износостойкое покрытие). Особенно эффективно применение подобных конструкций в почворезущих элементах, применяемых в сельском хозяйстве, которые относятся к быстроизнашивающимся деталям [3]. Повышение ресурса почворезущих элементов является одной из важных проблем современного с.-х. машиностроения и ремонтного производства. При их изготовлении используют, как правило, традиционные методы упрочняющей технологии (закалку и отпуск). Однако, как показывает практика, закалка деталей из конструкционных сталей не дает существенного эффекта. Значительно более эффективным является наплавление почворезущих профилей деталей твердыми сплавами высокой износостойкости.

#### 5.5.1. Теоретический анализ тепловых процессов, происходящих при намораживании

Наплавление намораживанием износостойкого металла на заготовку осуществляется путем подачи порции этого расплавленного металла в зазор между наплаваемой, предварительно активированной поверхностью заготовки и стенкой формы. Полость формы определяет конфигурацию и объем наращиваемого металла.

При заполнении формы присадочный материал вытесняет защитный слой флюса с наплавляемой поверхности и затвердевает на ней с образованием заданных размеров и формы наращиваемого металла.

Одним из основных требований, предъявляемых к технологии намораживания на заготовку, является обеспечение монолитного сплавления присадочного сплава с наращиваемой поверхностью. Для получения монолитного сплавления при намораживании на заготовку производится предварительная подготовка наращиваемой поверхности. Подготовка осуществляется повышением температуры заготовки (термическая активация) и очисткой наращиваемой поверхности от оксидных пленок и технологических загрязнений (физико-химическая активация).

Очистка поверхности от окислов и технологических загрязнений, защита от окисления и обезуглероживания наплавляемой поверхности достигается флюсованием. При этом флюс должен быть достаточно вязким, чтобы удерживаться на вертикальных и наклонных поверхностях сплошным слоем, обеспечивающим защиту нагретой заготовки, и подвижным, чтобы легко вытеснялся расплавленным присадочным сплавом с наплавляемой поверхности, не препятствуя их взаимодействию.

Поэтому для практического осуществления разработки биметаллических деталей намораживанием необходимо провести комплекс исследований тепловых процессов в многослойной среде с учетом фазового перехода кристаллизации расплава.

Намораживание погружением в расплав, как способ наращивания износостойких сплавов, – это результат дальнейшего развития и совершенствования технологии получения элементов с биметаллической рабочей частью [3]. На рис. 5.71 представлена принципиальная схема основных технологических операций, выполняемых при осуществлении намораживания погружением заготовки в расплав.

Сущность этого процесса намораживания заключается в последовательном затвердевании сплава на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки, погруженной в расплав. Из-за разности исходных температур расплава ( $T_3$ ) и заготовки ( $T_1$ ) (причем  $T_1 \ll T_3$ ), контактируемый локальный объем расплава с поверхностью заготовки охлаждается до температуры фазового перехода. Это позволяет при определенных температурно-временных условиях получить на поверхности заготовки, находящейся в расплаве, слой затвердевшего присадочного сплава соответствующей тол-

щины. При этом активация наплавляемой поверхности заготовки осуществляется с применением флюсов и протекст при высокой температуре.

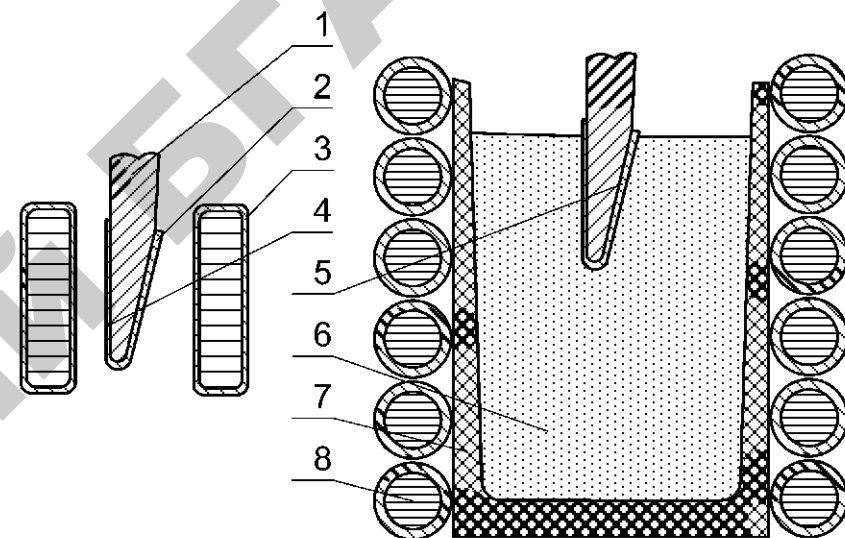


Рис. 5.71. Принципиальная схема намораживания погружением в расплав присадочного материала:

1 – заготовка; 2 – флюс; 3 – индуктор закалочного генератора; 4 – теплоизоляционное покрытие; 5 – износостойкое покрытие (намораживаемый слой); 6 – расплав; 7 – тигель; 8 – индуктор плавильной установки

Математическую формулировку задачи исследования теплового процесса намораживания твердого расплава на стальную пластину будем в первом приближении рассматривать как полуограниченную симметричную систему тел, состоящих из трех неограниченных зон.

На рис. 5.72 представлены принципиальные схемы распределения температурных полей в системе «металл заготовки – расплав присадочного материала» сплава с течением времени, с учетом процесса намораживания.

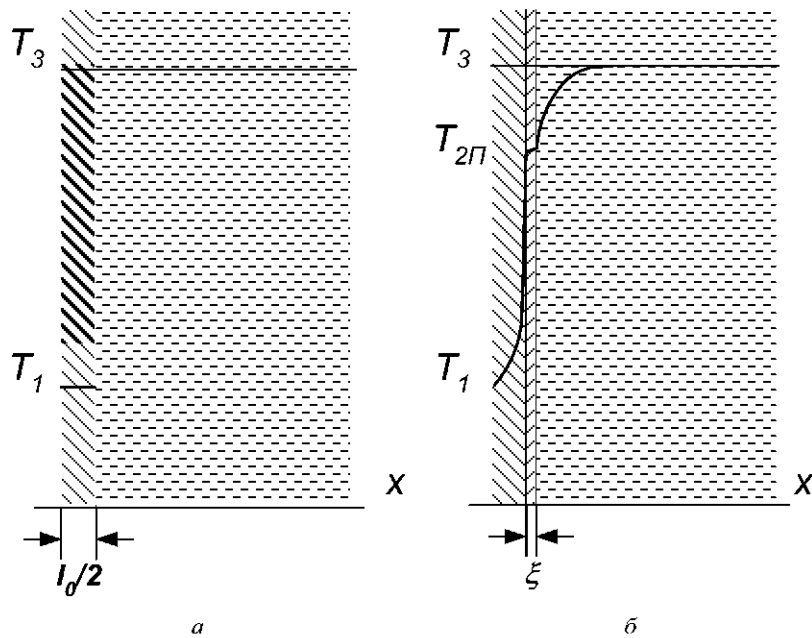


Рис. 5.72. Схемы распределения температурных полей в системе «металл заготовки – расплав присадочного материала»: а – с течением времени; б – с учетом процесса намораживания

Предполагается, что расплав присадочного материала состоит из чистого металла. Для простоты исследования уравнения энергии для всех трех зон запишутся в виде одномерных нестационарных уравнений теплопроводности:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq \frac{l_0}{2}. \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad \frac{l_0}{2} \leq x \leq \xi. \quad (5.50)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \tau} = a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \quad \xi \leq x \leq \infty. \quad (5.51)$$

Специфической особенностью процесса намораживания (затвердевания) является выделение скрытой теплоты кристаллизации при определенной температуре ( $T_{кр}$ ). Поэтому на границе раздела твердой поверхности и жидкого расплава необходимо записать еще одно дифференциальное уравнение сохранения энергии:

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} + L \rho V = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \quad x = \frac{l_0}{2} + \xi, \quad (5.52)$$

где  $V = \frac{\partial \xi}{\partial \tau}$  – скорость намораживания (кристаллизации).

Граничные и начальные условия:

$$x = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0;$$

$$x = \frac{l_0}{2}, \quad T_1 = T_2;$$

$$\text{при } x = \frac{l_0}{2} + \xi, \quad T_2 = T_3 = T_{кр};$$

$$x \rightarrow \infty \quad T_\infty = \text{const} \quad \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_\infty = 0;$$

$$\tau = 0 \quad T_1 = \text{const} \quad T_3 = T_\infty = \text{const}.$$

Полученная система дифференциальных уравнений математически описывает процесс «намораживания» твердого материала на несущую пластину за счет теплопроводности.

Однако, как показывают проведенные исследования, в процессе затвердевания расплава на заготовке происходит довольно интенсивное его перемешивание в объеме ванны за счет естественной конвекции [3, 4]. Поэтому для получения более точных результатов расчета тепловых процессов и, следовательно, скорости

и толщины замороженного слоя необходимо учитывать дополнительное влияние естественной конвекции на теплообмен расплава с твердой поверхностью.

Наиболее строгий подход к решению этой задачи может быть осуществлен методом сопряженного совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности для твердой стенки и энергии, и движения для жидкого расплава.

Другой, наиболее простой способ расчета теплообмена от расплава к твердой поверхности состоит в задании на твердой поверхности граничных условий третьего рода [5]:

$$\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_{n=0} + \alpha (T_1 - T_{2п}) = 0, \quad (5.53)$$

в которых коэффициент теплоотдачи ( $\alpha$ ) определяется из интегральных критериальных соотношений, полученных экспериментально, например, [4]:

$$Nu = 0,53 (Pr^2 Gr)^{1/4}. \quad (5.54)$$

Однако в этом случае при решении задачи не получим распределения температурного поля в не затвердевшем расплаве, которое крайне важно при анализе скорости и толщины намораживания.

При численной реализации предложенной модели в зоне учета теплоты фазового перехода (рис. 5.73, область 2) в нее была внесена так называемая «мягкая» зона (смесь отвердевшего и жидкого материалов) [17], которая появляется из-за существования температурного диапазона кристаллизации, резкого изменения теплофизических свойств и кинетики отвердевания.

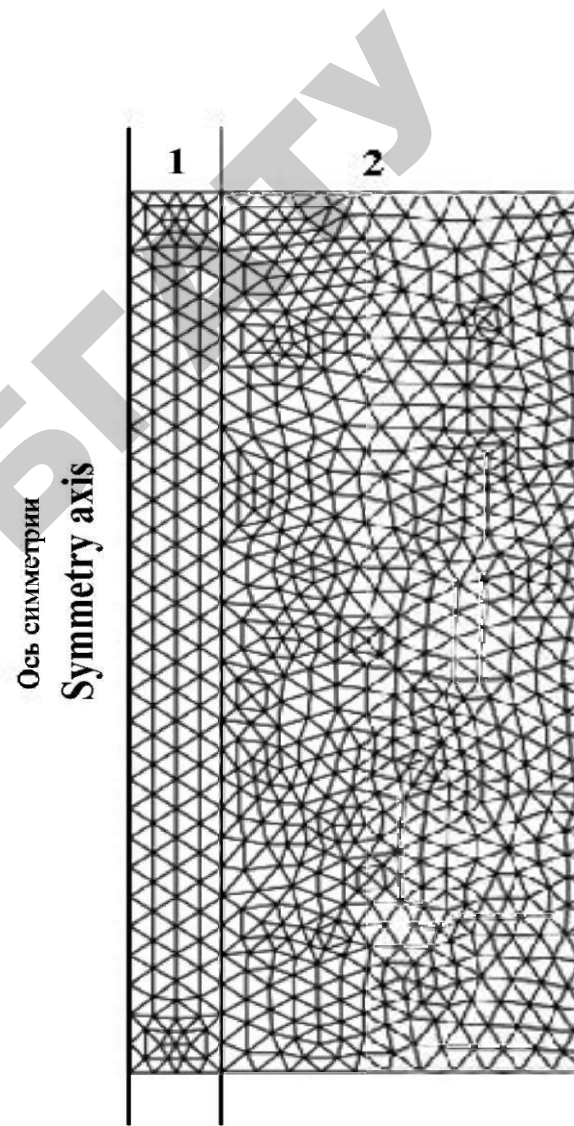


Рис. 5.73. Конечно-элементное разбиение расчетных областей

Для удобства численной реализации модели в области учета теплоты фазового перехода  $C_p$  в уравнении теплопроводности было заменено на  $(C_p + DL)$ , где  $L$  – это теплота фазового перехода,  $D$  – нормализованное гауссово распределение [6]:



$$T_1 = \frac{\exp((T - T_m)^2 / dT^2)}{dT \sqrt{\pi}} \quad (5.55)$$

Причем  $T_m$  и  $dT$  представляют пик температуры плавления и половину температурного диапазона фазового перехода соответственно. Изменение  $C_p$  во время фазового перехода описывается сглаживающей функцией.

На границе областей 1 и 2 задано условие непрерывности. Начальными условиями для областей являются температуры погружаемого образца и расплава. Численное решение задачи осуществлялось методом конечных элементов. Результаты численного эксперимента показаны на рис. 5.74.

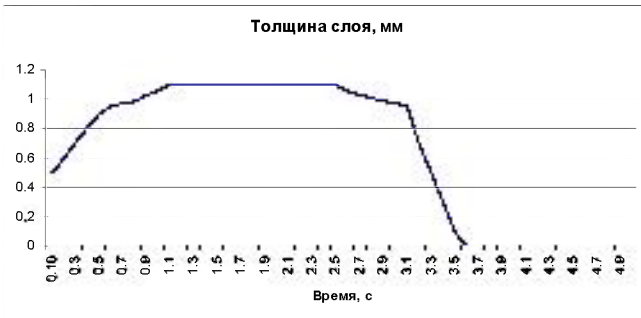


Рис. 5.74. Результаты численного эксперимента

Распределение температур по толщине образца и в расплаве в разные моменты времени показано на рис. 5.75.

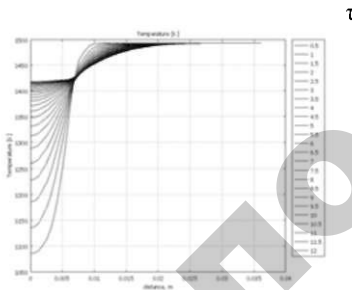


Рис. 5.75. Распределение температур по толщине образца и в расплаве в зависимости от времени ( $\tau$ )

Рассмотрим влияние температуры заготовки на процесс намораживания. На графике (рис. 5.76) приведены кривые намораживания для температур образца 873, 973, 1073, 1173 К.

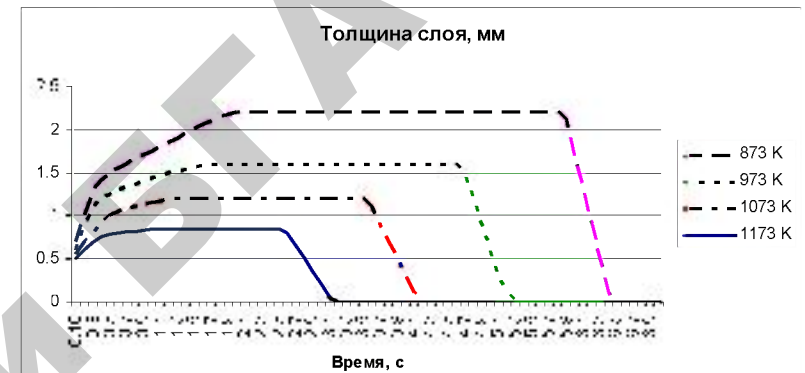


Рис. 5.76. Влияние температуры заготовки на процесс намораживания

В технологическом исполнении эксперимент по намораживанию сплава заключается в следующем. В тигле плавильной установки расплавляют какой-либо сплав (в данном случае – чугун). Температура расплава  $T_3$  превышает температуру его затвердевания  $T_{кр}$ . Величина перегрева  $\Delta T = T_3 - T_{кр}$  во избежание интенсивного перемешивания (принудительной конвекции) должна быть незначительной. Для исследуемого сплава и условий его плавки перегрев составлял 30–50 К. При таком перегреве сплавы, как правило, имеют низкую вязкость и высокую текучесть. Это соответствует жидко-твердому состоянию сплава. В расплаве находятся твердые зародыши в виде суспензии. Расплав в тигле выдерживался при заданной температуре на протяжении всего процесса экспериментирования. Температура расплава по всему объему ванны постоянна ( $T_3 = \text{const}$ ).

После приготовления расплава осуществляется подготовка образца к наплавке. По форме образец представляет пластину толщиной 12 мм. Образец нагревают до определенной температуры  $T_1$ . температура нагрева образца перед наплавкой значительно ниже температуры расплава, то есть  $T_3 \gg T_1$ . поверхность образца при температуре  $T_1$  подвергается активации (нагрев и флюсование). После активации образца его погружают в расплав. Температура образца перед погружением в расплав по всему сечению одинакова

( $T_1 = \text{const}$ ). Образец погружается в расплав плавно и выдерживается в нем некоторое время ( $\tau$ ).

За время пребывания образца в расплаве на поверхности пластины затвердевает слой сплава толщиной  $\xi$ .

По мере увеличения продолжительности контактирования заготовки с расплавом толщина затвердевшего слоя возрастает. Однако время, в течение которого наблюдается рост и сохранение слоя затвердевшего сплава, ограничено. Максимальное его значение (заштрихованная зона на графике, рис. 5.77) называется критическим временем. Если продолжительность пребывания заготовки в расплаве превышает это критическое время, то происходит лавинообразное расплавление затвердевшего слоя. Установлено, что различным исходным температурам флюсования соответствуют различные значения критического времени. Так, расплавление слоя затвердевшего чугуна при одной и той же толщине стального образца, при температуре флюсования 1123 К происходило через 4,0–4,5, а при температуре флюсования 1173 К – через 3,5–4,0 с.

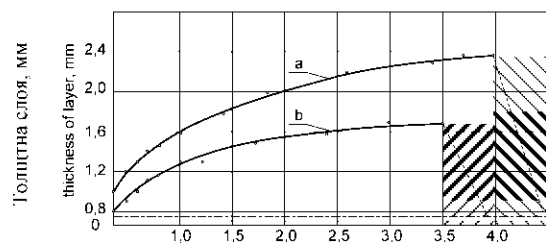


Рис. 5.77. Зависимость толщины затвердевшего слоя от времени:  
*a* – температура флюсования 1123 К; *b* – температура флюсования 1173 К

Обработка опытных данных по толщине намораживания была проведена в виде зависимости:

$$\xi = k\sqrt{\tau}, \quad (5.56)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, полученный экспериментально.

В результате экспериментов установлены две стадии намораживания: ускоренная и замедленная.

Специфические условия взаимодействия расплавленного металла с офлюсованной поверхностью заготовки определяют необходимость оценки одного из основных параметров процесса намораживания на заготовку – скорости подъема уровня расплава при заполнении зазора между наплавляемой поверхностью и формой.

Для обеспечения сплошности биметаллического соединения необходимо непрерывное вытеснение расплавленным присадочным сплавом защитного слоя флюса с поверхности заготовки. Вытеснение флюса должно предшествовать затвердеванию намораживаемого сплава. Следовательно, скорость подъема уровня расплава не должна превышать скорость вытеснения защитной пленки флюса с наплавляемой поверхности. Соблюдение определенной скорости вытеснения защитной пленки флюса во взаимосвязи с температурно-временными параметрами процесса намораживания создают необходимые условия для образования монолитного сплавления присадочного сплава с заготовкой.

Экспериментально установлено, что значения скорости подъема уровня ванны расплава по наплавляемой поверхности заготовки не должны превышать 0,15 м/с. Вязкость флюса должна находиться в интервале 1,2–1,5 Па·с.

Изучение конфигурации вытесняемого слоя флюса в системе «заготовка–флюс–расплав» показало, что образуемый щелевой зазор можно рассматривать как капиллярный канал (рис. 5.78).

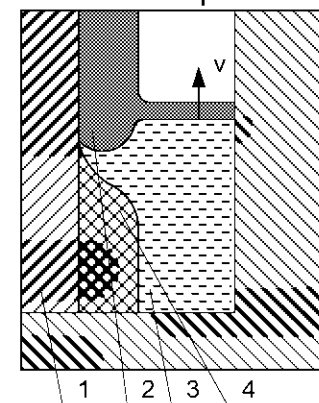


Рис. 5.78. Конфигурация вытесняемого слоя флюса в системе «заготовка – флюс – расплав»:  
 1 – заготовка; 2 – флюс; 3 – расплав металла; 4 – затвердевший (намороженный) сплав

В результате экспериментальных исследований получено, что для расчета максимальной скорости подъема уровня расплава по поверхности заготовки, при которой возможно обеспечение полного вытеснения флюса с наплавляемой поверхности, можно использовать следующее соотношение:

$$v = \frac{48\mu h \pm \sqrt{(48\mu h)^2 + 4(\alpha \rho_f \lambda h)(8\sigma \cos \theta + 4\alpha^2 \Delta \rho g h)}}{2\alpha \rho_f \lambda h}, \quad (5.57)$$

где  $h$  – высота шелевого зазора, м;

$\Delta \rho$  – разность плотности флюса и металла, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_f$  – плотность флюса, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – гидравлический коэффициент трения;

$\sigma$  – поверхностное натяжение флюса, Н/м;

$\theta$  – угол смачивания флюсом поверхности заготовки, град;

$\alpha$  – ширина шелевого зазора, м;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

### 5.5.2. Структура, физико-механические свойства и работоспособность покрытий

*Структура.* Исследовалась макро- и микроструктура наплавленного износостойкого сплава и металла основы. С помощью микроструктурного анализа по излому образцов выявлялись направленная кристаллизация и толщина слоя наплавленного сплава.

Пористость, наличие газовых пузырей, трещин, неметаллических включений и монолитность соединения наплавленного сплава с основой изучались на полированной поверхности шлифов в непотравленном состоянии. При анализе макрошлифов в протравленном состоянии исследовались дендритное строение и направленная кристаллизация. Образцы вырезались таким образом, чтобы контролируемая поверхность находилась в плоскости, параллельной направлению движения фронта затвердевания.

Просмотр отполированных и протравленных поверхностей образцов показал, что для условий оптимальной технологии наплавленное металлопокрытие является плотным и имеет монолитное соединение с основой. Отсутствует также подплавление металла основы.

В ходе микроструктурного анализа исследовалась структура наплавленного сплава на шлифах по двум взаимно перпендикулярным плоскостям. В первом случае контролируемая плоскость шлифа была параллельна направлению теплоотвода, во втором случае – перпендикулярна. Это позволяло получать информацию об изменении структуры наплавленного сплава по толщине слоя, а также в плоскости, параллельной поверхности теплоотвода. Установлено, что затвердевший сплав и в ходе диффузионного намораживания приобретает структуру, присущую литым изделиям. Сплав имеет крупнозернистое столбчатое строение. В наплавленном слое выявлена направленная кристаллизация.

Столбчатые кристаллы хорошо различимы при изучении микроструктуры. Они распространяются по толщине слоя наплавленного сплава и, в основном, нормально направлены к поверхности теплоотвода. Эта особенность микростроения сплавов, наплавленных намораживанием, имеет важное практическое значение. Четко выраженная литая структура, направленная кристаллизация затвердевающего сплава при диффузионном намораживании являются положительными элементами при наращивании изнашиваемых поверхностей деталей, работающих в абразивной среде. Расположение столбчатых кристаллов нормально к наплавляемой поверхности почворезущих элементов является оптимальной ориентировкой, так как главные оси столбчатых кристаллов направлены перпендикулярно поверхности трения.

*Прочность сцепления.* Прочность сцепления намороженного сплава с основой является одной из важнейших эксплуатационных характеристик. Особую значимость этот параметр имеет применительно к деталям, работающим в условиях ударно-абразивного изнашивания. Величину прочности сцепления наиболее объективно можно оценить по методу нормального отрыва наплавленного слоя от металла заготовки. Для определения данного параметра разработана технология получения диффузионным намораживанием специальных образцов. После механической обработки образцы испытывались на разрывной машине УММ-5. Установлено [13], что величина прочности сцепления для одних и тех же материалов зависит от режимов диффузионного намораживания. Сцепление намороженного слоя сплава с наплавляемой поверхностью обеспечивается силами межатомного взаимодействия между ними.

Прочность сцепления наплавленного металла с основой оценивалась по величине предела прочности на растяжение. Так как

хрупкие материалы, которыми являются износостойкие наплавки, разрушаются без образования шейки, то для этих условий максимальная и разрушающая силы совпадают. Прочность на разрыв  $\sigma$  определяется из соотношения силы  $F$ , приложенной перпендикулярно поверхности раздела к площади поперечного сечения образца  $S$  по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (5.58)$$

где  $F$  – разрушающая сила;

$S$  – начальная площадь поперечного сечения образца.

Результаты испытаний прочности сцепления обрабатывались по известным зависимостям математической статистики. Определялись среднее арифметическое, дисперсия, эмпирический стандарт, коэффициент вариации и доверительная оценка. Истинное значение исследуемой величины оценивалось с надежностью 0,95.

На примере диффузионного намораживания серого чугуна СЧ-18 выявлено изменение прочности сцепления со стальной основой в зависимости от режимов активации наплавляемой поверхности. Установлено, что более высокая прочность сцепления достигается при меньших значениях вязкости флюса. Значение прочности сцепления намороженного серого чугуна СЧ-18 приближается к оптимальным (180 МПа), при температуре активации, обеспечивающей вязкость флюса от 1,4 до 1,7 Па·с. При использовании флюса, состоящего из 40 мас. ч. буры и 60 мас. ч. борного ангидрида, оптимальные значения температуры флюсования находятся в интервале 1123–1173 К (рис. 5.79).

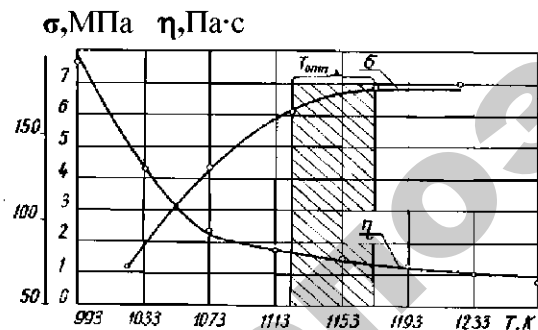


Рис. 5.79. График изменения прочности сцепления и вязкости флюса в зависимости от температуры

Испытанные образцы подвергались металлографическому анализу. Установлено, что у образцов, флюсованных при температуре 1023 К, не достигается монолитность соединения покрытия с основой. В наплавленном металле, а также в зоне сплавления имеются раковины, включения флюса.

Наплавленный металл контактирует с основным в отдельных местах. Между ними имеет место так называемая «мостиковая связь». С повышением температуры флюсования (вязкость флюса уменьшается) увеличивается площадь контакта намороженного металла с основой. Это объясняется улучшением смачиваемости расплавом наплавляемой поверхности при снижении вязкости флюса. При температуре флюсования, равной 1123 К, достигается полное смачивание расплавом наплавляемой поверхности, сопровождающееся монолитным соединением намороженного металла с основой (рис. 5.80). Этому условию соответствует получение максимального значения прочности сцепления (в данном случае 180 МПа).

Образование «мостиковой связи» между намороженным металлом и основой при флюсовании в интервале температур от 1023 К до 1073 К связано с повышенной вязкостью расплавленного флюса. Флюс, будучи вязким, лишь частично отделяется от наплавляемой поверхности. При этом создаются условия для смачивания и схватывания намораживаемого металла с основой только в отдельных местах. На основании диаграммы состояния системы (бура + борный ангидрид), температура начала плавления этого флюса составляет около 873 К.

Таким образом, флюс, состоящий из 40 мас. ч. буры и 60 мас. ч. борного ангидрида, обладает сравнительно широким интервалом размягчения. Он достигает примерно 200 К, и лишь при температуре 1073 К флюс приобретает вязкость, близкую к требуемой технологической. Флюс становится жидкотекучим, хорошо смачивает наплавляемую поверхность. Для данного флюса в интервале температур от 993 К до 1273 К кривой вязкости (см. рис. 5.79) характерны два участка. Нисходящая часть кривой вязкости с увеличением температуры флюса до 1073 К круто падает вниз. Затем, хотя вязкость флюса уменьшается с ростом температуры, это снижение протекает медленнее.

Результаты исследований дают возможность сделать выводы о существенном влиянии исходной температуры активации наплавляемой поверхности на прочность сцепления намороженного металла с основой. Из рис. 5.79 следует, что по мере повышения температуры флюсования прочность сцепления намороженного серого чугуна СЧ-18 с основой возрастает с 74,5 МПа (при 1023 К) до 189,3 МПа (при 1173 К).

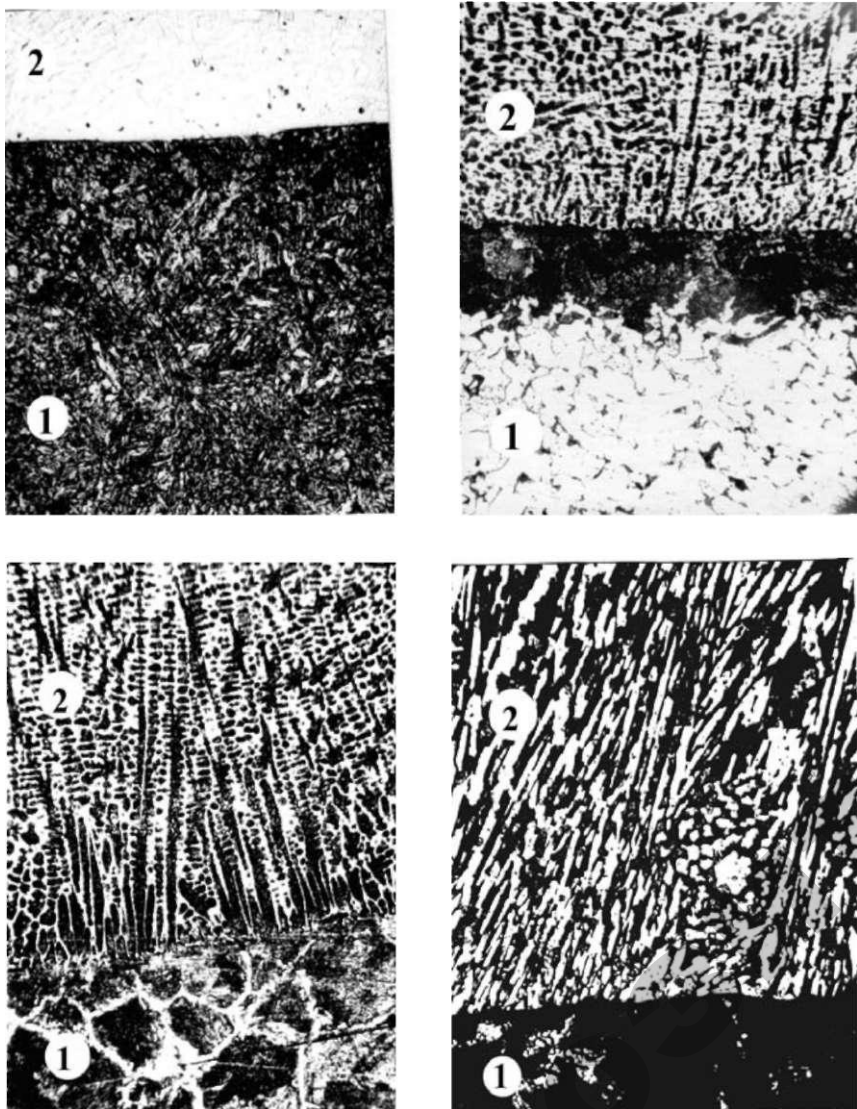


Рис. 5.80. Зона сплавления в биметалле ( $\times 100$ ):  
1 – стальная основа; 2 – сплав

При температуре 1173 К прочность сцепления достигает максимального значения, и дальнейшее повышение температуры до 1223 К не приводит к изменению исследуемой эксплуатационной характеристики (прочность сцепления). Наряду с этим следует отметить, что максимальное значение прочности сцепления ограничивается пределом прочности менее прочного материала, в данном случае – серого чугуна СЧ-18.

Очевидно, что критериями оценки качества сплавления, а вместе с тем и того положительного эффекта, который достигается в результате получения монолитного (без раковин, пор, неметаллических включений и др.) соединения, служат результаты прочности сцепления. Также очевидно, что уровень максимальных значений прочности сцепления ограничивается механическими свойствами замороженного сплава (в данном случае – пределом прочности на растяжение).

При диффузионном намораживании возможно применение как флюсов, так и присадочных сплавов с различной температурой их плавления. Однако, несмотря на различие температур предварительного нагрева заготовки и плавления присадочного сплава, достигаются одинаковые показатели прочности сцепления (100 %) по отношению к оптимальному (предельно возможному) их уровню. Положительный эффект в данном случае состоит в реализации максимально возможной прочности сцепления, оцениваемой пределом прочности на растяжение замороженного сплава.

Известно, что флюсы (на основе буры) для наплавки обладают высокой смачиваемостью и растекаемостью по поверхности заготовки. В этом заключаются их основные функциональные свойства. Боратные флюсы широко апробированы на практике. Одним из наиболее характерных свойств расплавленных флюсов (жидкостей) является текучесть. При перемещении одного слоя жидкости относительно другого оказывается сопротивление, мерой которого является величина коэффициента вязкости (внутреннего трения). Именно с такими перемещениями приходится сталкиваться при флюсовании (активации) наплавляемой поверхности. При изготовлении биметаллических изделий намораживанием их необходимо подвергнуть флюсованию, основное назначение которого заключается в очистке поверхности от оксидов и других загрязнений, а также в недопущении образования новых оксидных пленок до

осуществления их наплавки (во время нагрева и переноса заготовки с позиции активации на позицию наплавки). Препятствием проникновению кислорода к наплавляемой поверхности является наличие на ней слоя жидкого флюса. Вязкость жидкого флюса определяет в данном случае толщину удерживаемого на поверхности заготовки слоя флюса, необходимого для защиты наплавляемой поверхности от окисления кислородом воздуха.

Установлено [14], что минимальными значениями вязкости, при которых флюс сплошным защитным слоем устойчиво удерживается на наплавляемой поверхности, является вязкость около 1,3 Па·с. При меньших значениях вязкости на наплавляемой поверхности не сохраняется сплошной слой флюса, и из-за его стекания образовавшиеся незащищенные участки интенсивно окисляются. Это является причиной отсутствия сплавления между замороженным сплавом и основой (наличие сплошных пленок или локально распространенных на наплавляемой поверхности не допускается).

Нецелесообразно осуществлять подготовку наплавляемой поверхности и последующее намораживание при вязкости флюса более чем 2,4 Па·с, так как вязкий флюс не отделяется при погружении заготовки в расплав, ухудшается его растекание по поверхности заготовки, увеличивается расход флюса. Не отделившийся флюс, аналогично оксидной пленке, препятствует сплавлению замороженного слоя с основой.

Установлено [7, 14], что при одном и том же флюсе и одинаковой температуре заготовки, скоростью относительного перемещения присадочного сплава и наплавляемой поверхности можно достичь как полного, так и отсутствия или частичного отделения флюса, а вместе с тем, и различного уровня сцепления в биметалле, полученном диффузионным намораживанием. Для обеспечения высокого качества сцепления в биметалле, полученном диффузионным намораживанием, скорость относительного перемещения присадочного сплава и наплавляемой поверхности не должна превышать 0,2 м/с.

Установлены средние максимальные значения прочности сцепления ряда наплавочных износостойких высокохромистых чугунов со стальной основой. Они составляют: для сплава из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. сормайт-1 – 184 МПа; для сормайт-1 – 353 МПа; для сплава из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. ПГ-ХН80СРЗ – 224 МПа;

для сплава ПГ-ФБХ-6-2 – 173 МПа; для сплава ПР-С27 – 244 МПа. Такие биметаллические изделия удовлетворяют требованиям, предъявляемым к наплавленному сплаву, предназначенному для работы в условиях ударно-абразивного изнашивания.

*Ударная вязкость.* В почворежущих элементах с биметаллической режущей частью, полученной диффузионным намораживанием, ударная вязкость, главным образом, обеспечивается основным металлом. Согласно технологии диффузионного намораживания, стальная основа первоначально нагревается во время флюсования до 1123–1173 К. В результате теплообмена с расплавом, она дополнительно нагревается до температуры, равной или близкой по величине к температуре солидуса сплава. Это приводит к аллотропическим превращениям основного металла. Учитывая, что температура по сечению заготовки неодинаковая и зависит от продолжительности диффузионного намораживания, возможно частичное изменение характера вторичной структуры. Такой режим нагрева заготовки приводит к росту зерна. Последующее быстрое охлаждение на воздухе не обеспечивает образования мелкозернистой структуры основного металла.

Сведения об ударной вязкости основного металла (сталь 65Г и 45), наплавленного намораживанием сплава, представлены в табл. 5.1.

Из приведенных данных видно, что для изделий, наплавленных намораживанием, ударная вязкость предопределяется показателями основного металла. Наплавленному сплаву присуща высокая твердость, а вместе с этим, и хрупкость. Наплавленный сплав (высокохромистый чугун) имеет ударную вязкость на порядок ниже, чем стальная основа.

Наряду с этим (табл. 5.6) видно, что если стальную основу – сталь 45 или 65Г – подвергнуть диффузионному намораживанию износостойкими сплавами с последующим охлаждением на воздухе, то ударная вязкость основного металла повышется (по сравнению с закаленным состоянием). Хотя величина этого показателя ниже значений ударной вязкости для нетермообработанных изделий из стали 45 или 65Г, уровень значений ударной вязкости основного металла после диффузионного намораживания сравнительно высок и удовлетворяет требованиям эксплуатации деталей в условиях ударно-абразивного изнашивания.

Таблица 5.6

Ударная вязкость металла основы детали и наплавленного намораживанием сплава

Материал образца	Состояние материала образца, термическая обработка	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
Сталь 65Г (эталон)	Объемная закалка в масло	226,7
Сталь 45 (эталон)	Объемная закалка в воду	107,9
Сталь 65Г	Основа, наплавленная сплавом С-1	272,1
Сталь 65Г	Основа, наплавленная сплавом ФБХ-6-2	311,9
Сталь 45	Основа, наплавленная сплавом ФБХ-6-2	421,7
Сормайт-1 (С-1)	Диффузионное намораживание (погружением)	19,1
80 мас. ч. КБХ + 20 мас. ч. ПГ-ХН80СРЗ	Диффузионное намораживание (погружением)	15,1
80 мас. ч. КБХ + 20 мас. ч. сормайта-1	Диффузионное намораживание (погружением)	22,7
ПГ-ФБХ-6-2	Диффузионное намораживание (на заготовку)	30,8
ПР-С27	Диффузионное намораживание (на заготовку)	63,2

*Твердость и микротвердость.* Твердость исследовалась путем измерений как со стороны внешней поверхности наплавленного слоя, так и в плоскости, перпендикулярной ей. Для всех исследованных материалов, наплавленных намораживанием из расплава, твердость со стороны внешней поверхности слоя превышает этот показатель в плоскости, перпендикулярной ей. И хотя отличие средних значений чисел твердости невелико, для всех проверенных образцов это различие соблюдается. В табл. 5.7 приведены результаты измерений твердости металлопокрытий, полученных диффузионным намораживанием.

Отличительной особенностью наплавленного сплава, наряду с анизотропией твердости, является сравнительно высокая стабильность значений твердости. Разброс значений твердости исследованных сплавов не превышает 8–10 %, что свидетельствует о стабильности их структурного строения и химического состава. Результаты измерений твердости показали, что наращивание износостойких высокохромистых чугунов диффузионным намораживанием позво-

ляет реализовать потенциальные возможности сплавов по уровню твердости. Исследованные сплавы (высокохромистые чугуны ПР-С1, ПГ-ФБХ-6-2, ПГ-КБХ, ПР-С27 и др.) имеют твердость не ниже значений, указанных в сертификатах поставщиков.

Таблица 5.7

Твердость сплавов, наплавленных намораживанием

Материал образцов	Твердость, HRC	
	в плоскости, параллельной поверхности теплопровода	в плоскости, перпендикулярной поверхности теплопровода
Сормайт-1	49,5	47,0
Смесь ФБХ-6-2	56,0	53,0
Сплав из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. сормайта-1	60,5	57,5
Сплав из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. ПГ-ХН80СРЗ	50,0	47,5

При просмотре шлифов на микроскопе, условно можно разделить поверхность наплавленного слоя на две фазы: светлую и темную. Результаты измерения микротвердости для наиболее характерных износостойких сплавов представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Микротвердость структурных составляющих сплавов, наплавленных намораживанием

Материал образцов	Интервалы микротвердости, ГПа	
	светлой фазы	темной фазы
Сплав из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. сормайта-1	7,8–8,4; 10,0–11,4; 14,0–16,5; 17,5–18,6; 19,7–22,4	3,1–4,1; 5,1–6,0
Сормайт-1	9,9–11,2; 12,9–13,9	3,1–4,8; 5,2–6,3;
ПГ-ФБХ-6-2	10,8–15,0	5,0–6,3

Из табл. 5.8 видно, что структурные составляющие светлой фазы, по сравнению со второй фазой, имеют более высокую микротвердость, присущую карбидам, боридам и силицидам. Наличие структурных составляющих микротвердостью выше 10 ГПа, наряду

с пластичной матрицей, предполагает высокую сопротивляемость таких сплавов абразивному изнашиванию [13].

Интервал значений микротвердости темной фазы сплавов находится в одинаковых пределах, равных 3,1–4,8 и 5,1–6,3 ГПа. Микротвердость, равная 3,0–4,8 ГПа, присуща ледобуриту, состоящему из аустенита и цементита. Микротвердость, равная 5,0–6,3 ГПа, присуща смеси из ледобурита и цементита. Для выявления наличия карбидов, силицидов, интерметаллидов и других структурных составляющих проводился фазовый анализ.

*Фазовый анализ.* Качественным фазовым анализом исследуемых сплавов установлено наличие металлических карбидных и интерметаллидных фаз. Наплавленные намораживанием хромистые чугуны представляют собой конгломерат твердых и пластичных фаз, когерентно связанных между собой. К пластичным фазам относится аустенит. В зависимости от состояния сплава и условий съемки аустенит проявляется наиболее интенсивно либо на собственных линиях, либо дифференцированно на составляющие  $\alpha$ -Fe и Ni. В табл. 5.9 представлены результаты фазового анализа наплавленных намораживанием сплавов.

Таблица 5.9

Результаты фазового анализа наплавленных намораживанием сплавов

Наименование сплава	Бреговский угол рентгеновской липии, 20°	Интенсивность рентгеновской липии, мм	Фаза, соответствующая рентгеновской липии
Сплав из 80 мас. ч. смеси KBX и 20 мас. ч. сормайт-1	50°43'	7	$\gamma$ -Fe (аустенит)
	52°13'	28	$\alpha$ -Fe
	44°31'	14	CrB
	41°55'	12	Cr <sub>3</sub> B <sub>2</sub>
	31°49'	50	Cr <sub>3</sub> B <sub>1</sub>
	28°35'	22	Cr <sub>2</sub> B
	61°31'	16	Fe <sub>3</sub> C
100°00'	9	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> ; Fe <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	
Сормайт-1	50°25'	7	$\gamma$ -Fe (аустенит)
	52°25'	40	$\alpha$ -Fe
	61°55'	18	Ni
	31°49'	14	Cr <sub>3</sub> B <sub>1</sub>
	46°13'	38	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
	100°37'	18	Fe <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>

Твердыми фазами сплавов, как свидетельствуют данные табл. 5.9, являются карбиды, силициды хрома и железа. Наряду с пластичными фазами, которые служат матрицей по отношению к твердым фазам, такое их сочетание в одном сплаве при когерентной связи между ними обеспечивает высокий уровень абразивной износостойкости наплавленному сплаву.

Фазовый состав металлопокрытий, полученных диффузионным намораживанием, зависит преимущественно от химического состава и технологических режимов их нанесения. Фазовый состав исследованных износостойких высокохромистых чугунов характеризуется в основном двухкомпонентными соединениями элементов Fe, Cr, C, а также, в некоторых случаях, – Mn, Si и B.

Двухкомпонентные соединения формируют структуру замороженного сплава, определяют весь комплекс его физико-механических и триботехнических свойств. Такие соединения, как Fe<sub>3</sub>C, CrC<sub>2</sub>, CrC<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, FeCr, CrB, Cr<sub>3</sub>B<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, Cr<sub>2</sub>B увеличивают твердость и износостойкость, снижают пластичность и вязкость наплавленного сплава. Наличие во всех образцах аустенитной фазы, обладающей пластичностью и вязкостью, позволяет снизить хрупкость наплавленного сплава.

*Микрорентгеноспектральный анализ.* Микрорентгеноспектральному анализу подвергалась зона перехода от основного металла к наплавленному металлопокрытию. При просмотре под микроскопом этой зоны сплавления на шлифах установлено, что граница раздела из неметаллических материалов отсутствует. Зона сплавления в данном случае состоит из совокупности пограничных объемов основного и наплавленного металла. Между ними образуется монолитное соединение (см. рис. 5.80).

Наличие диффузионного взаимодействия замороженного сплава с основой исследовалось с помощью микроанализатора фирмы «Камека». Микрорентгеноспектральный анализ распределения хрома и никеля в биметалле выполнялся на образцах, замороженных сплавом, состоящим из 80 мас. ч. смеси KBX и 20 мас. ч. сормайт-1. Содержание этих легирующих элементов в присадочном сплаве составляло соответственно 42,9 и 0,96 %. В заготовке (основе) до наплавки хром и никель отсутствовали. Как показали результаты микрорентгеноспектрального анализа (см. рис. 5.81), имели место диффузионные процессы хрома и никеля в поверхностный слой заготовки со стороны замороженного слоя. Глубина диффузии хрома и никеля за время диффузионного намораживания и охлаждения образцов составляла около 2–4 мкм.



Наряду с этим, по мере перехода от основного металла к замороженному, наблюдается резкое увеличение концентрации легирующих элементов (хрома и никеля). Это свидетельствует о том, что столь малая глубина диффузии (2–4 мкм) не вызывает существенного перераспределения легирующих элементов в наплавленном сплаве.

На рис. 5.81 представлены кривые «концентрация–расстояние», записанные на микроанализаторе при исследовании зоны сплавления в биметалле стальная основа–высоколегированный хромистый чугун, которые показывают, что в наплавленном сплаве хром и никель по толщине слоя распределяются сравнительно равномерно.

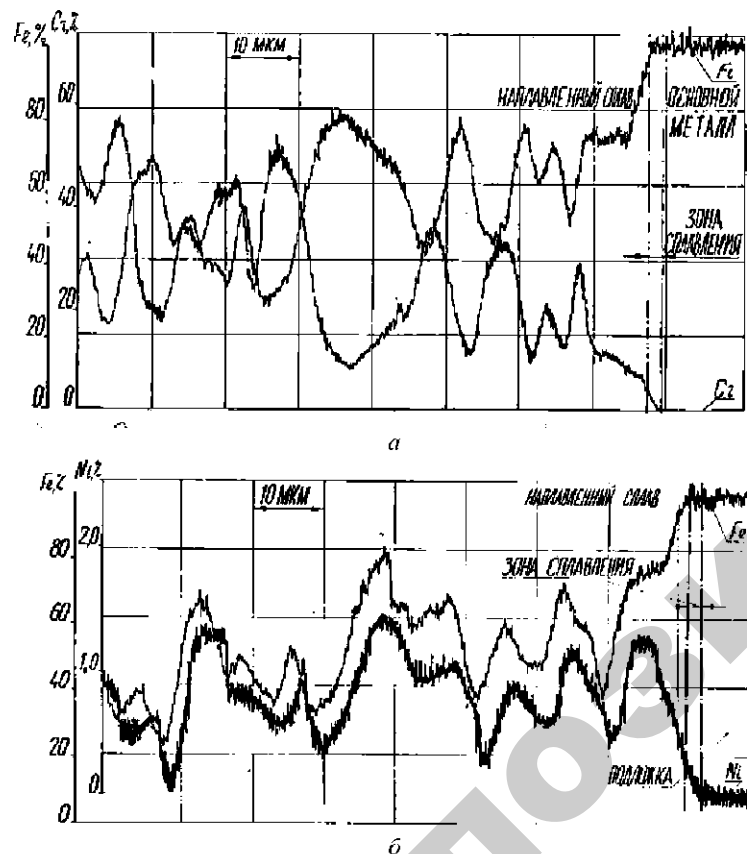


Рис. 5.81. Характер распределения концентрации хрома (а) и никеля (б) в биметалле, полученном диффузионным намораживанием (основа – сталь 45; наплавленный материал – сплав из 80 мас. ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. сормаита-1)

Содержание хрома в наплавленном сплаве колеблется в пределах до 43,0 % (по массе), никеля – до 1,0 % (по массе). Полученные результаты хорошо согласуются с данными химического и спектрального анализов.

Незначительная глубина диффузионного слоя, на которую в основу проникают легирующие элементы при диффузионном намораживании, позволяет сохранить наплавленный сплав без существенных изменений химического состава по сравнению с исходным. Это означает, что механические свойства, а также его эксплуатационные характеристики максимально сохраняются.

**Работоспособность.** Работоспособность наплавленных намораживанием материалов оценивалась по результатам лабораторных испытаний образцов на абразивную износостойкость сравнительным стендовым и эксплуатационным испытанием деталей.

Абразивная износостойкость изучалась при трении образцов о закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 17367-71) и трении об абразивную прослойку. В качестве эталона принималась отожженная сталь 45. Результаты лабораторных испытаний на абразивное изнашивание, а также состояние материала образцов, их химическая обработка и твердость представлены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Результаты лабораторных испытаний различных материалов на абразивное изнашивание

Материал, состояние, термическая обработка и твердость образцов	Относительная износостойкость (ε) при трении	
	об абразивную прослойку	о закрепленные частицы
Сталь 45, отожженная. 143–149 НВ	1.0	1.0
Сталь 65Г, объемная закалка. 56–61 HRC	1.8	1.7

Окончание табл. 5.10

Материал, состояние, термическая обработка и твердость образцов	Относительная износостойкость ( $\epsilon$ ) при трении	
	об абразивную прослойку	о закреплённые частицы
Сормайт-1 (ПР-С1), газопламенная наплавка, 47–52 HRC	2,7	3,1
Сормайт-1 (ПР-С1), литье, 48–51 HRC	–	3,2
Сормайт-1 (ПР-С1), диффузионное намерзание, 48–51 HRC	3,0	3,4
Сплав 80 мас.ч. смеси КБХ и 20 мас. ч. сормайта-1, диффузионное намерзание, 59–61 HRC	7,4	7,2
Сплав ПР-С27, диффузионное намерзание, 52–56 HRC	5,4	5,8
Сплав ПГ-ФБХ-6-2, диффузионное намерзание, 55 HRC	4,2	4,7
Сплав 75 мас. ч. ПР-С27 и 25 мас. ч. ПГ-ФБХ-6-2, диффузионное намерзание, 54 HRC	5,1	5,4
ПГ-УС25, диффузионное намерзание, 56 HRC	5,2	5,5

Приведенные в табл. 5.10 данные свидетельствуют о наиболее высокой износостойкости сплавов, легированных хромом. Чем больше содержится хрома и углерода в сплаве, тем более высокая его износостойкость. Наличие хрома и углерода в наплавленных сплавах предполагает образование карбидов, обеспечивающих им высокий уровень абразивной износостойкости

Для испытанных образцов на абразивную износостойкость производились исследования поверхности трения. На рис. 5.82 представлены снимки этих поверхностей, демонстрирующих, что механизм абразивного изнашивания для исследуемых материалов (закаленная сталь и твердый сплав) проявляется по-разному. Так, например, на поверхности трения стальных образцов (рис. 5.82, а, б) видны следы прямого разрушения – микрорезания. Продольные риски, имеющиеся на поверхности трения, совпадают с направлением относительного перемещения образцов. Известно, что микро-

твердость кварца значительно превышает микротвердость закаленной стали, поэтому при определенных условиях возможно прямое разрушение этого материала. Наряду с проявлениями микрорезания, на поверхности трения видны отдельные следы хрупкого разрушения.

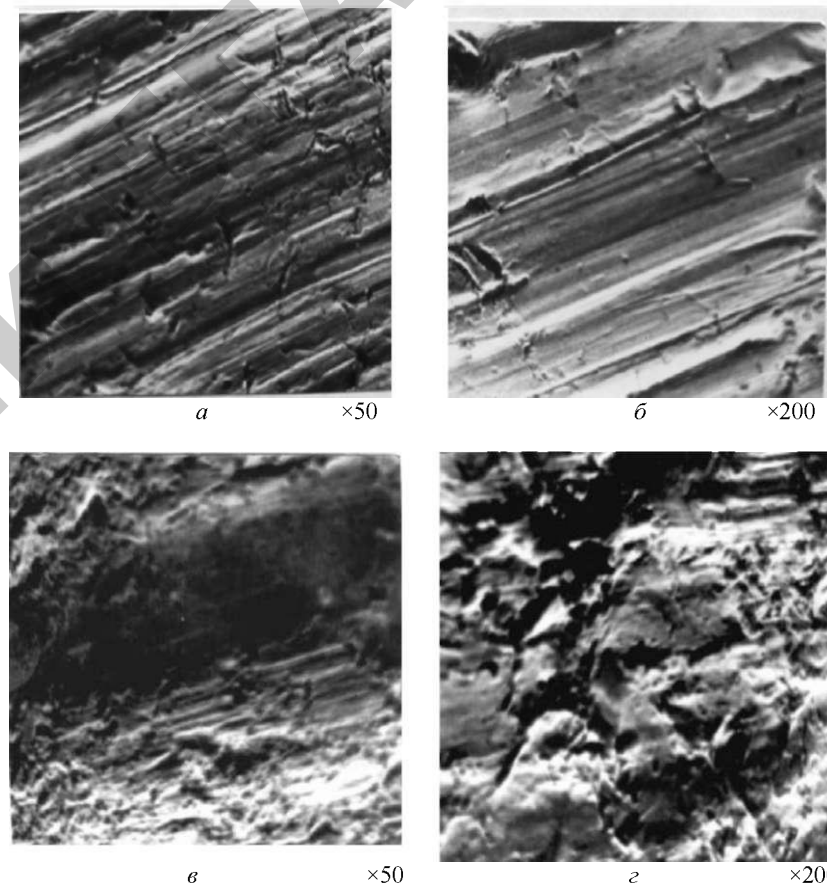


Рис. 5.82. Виды поверхности трения образцов (после лабораторных испытаний при трении об абразивную прослойку):

И все же, судя по снимкам поверхности трения, преобладающим видом является микрорезание – один из самых интенсивных видов абразивного изнашивания. Иная картина наблюдается при абразив-

ном изнашивании образцов, наплавленных высокохромистым сплавом (80 мас. ч. КБХ и 20 мас. ч. сормаита-1). Следы прямого разрушения (микрорезания) наблюдаются лишь на небольших участках поверхности трения (рис. 5.82, в, г). Предполагается, что эти участки соответствуют расположению матрицы сплава, микротвердость которой ниже по сравнению с микротвердостью кварца. Наиболее характерным для данного сплава является хрупкое разрушение. Следует отметить также, что при исследовании поверхностей трения этого сплава не обнаружены следы хрупкого разрушения в результате скалывания или выкрашивания значительных объемов. Хрупкое разрушение наблюдается лишь в микрообъемах.

Проведенный комплекс исследований физико-механических характеристик сплавов, наплавленных диффузионным намораживанием, позволил установить наличие анизотропии их свойств. Это подтвердилось при испытании ударной вязкости (см. табл. 5.6), твердости (см. табл. 5.7) и их абразивной износостойкости (см. табл. 5.10). Так, максимум твердости достигается со стороны внешней поверхности металлопокрытия. Большие значения ударной вязкости образцов имели место при приложении удара перпендикулярно направлению продвижения фронта затвердевания.

Результаты испытаний на абразивное изнашивание свидетельствуют также, что износостойкость зависит от состояния материала образца. Так, например, износостойкость сормаита-1, в виде отливки или наплавленного газопламенным способом, ниже по сравнению с сормаитом-1, наплавленным намораживанием. Если обозначить износ образцов из сормаита-1, наплавленного намораживанием и испытанного при трении о закрепленные частицы, равным 100 %, то износ образцов из этого же материала, полученных литьем, составил 105 %, а образцов, наплавленных газопламенным способом, – 110 %. С точки зрения достижения повышенной абразивной износостойкости сормаита-1 (в зависимости от исходного состояния: литье, газопламенная наплавка или наплавка намораживанием), предпочтительным является сплав, наплавленный намораживанием.

Возникает вопрос о причинах, обеспечивающих анизотропию абразивной износостойкости. Влияние на абразивную износостойкость технологического процесса формирования металлопокрытия неоднократно отмечено в работах исследователей. Величина относительной износостойкости сплава номинально одинаковой марки, в зависимости от технологического процесса его нанесения на поверхность образца, может значительно изменяться. Каждому способу нанесения металлопокрытия

соответствует определенное структурное состояние. А оно, в свою очередь, предопределяет работоспособность металлопокрытия. Поэтому для успешного применения твердосплавных металлопокрытий необходимо, чтобы химический состав и структурное их состояние соответствовали эксплуатационным условиям.

Твердость поверхности трения образцов, изготовленных из сормаита-1, составляет 47–52 HRC. Она практически одинаковая во всех трех случаях их изготовления (литье, газопламенная наплавка, наплавка намораживанием). Различие значений их относительной износостойкости показывает, что интегральная твердость неоднородно определяет влияние на абразивную износостойкость многофазных сплавов. Однако способ достижения твердости существенно влияет на относительную износостойкость. При изучении микростроения образцов исследуемых сплавов были установлены принципиальные различия между ними. Структура образцов, наплавленных сормаитом-1 газопламенным способом, а также полученных литьем, представляет собой крупные разупорядоченные первичные карбиды в ледебуридной основе (рис. 5.83).

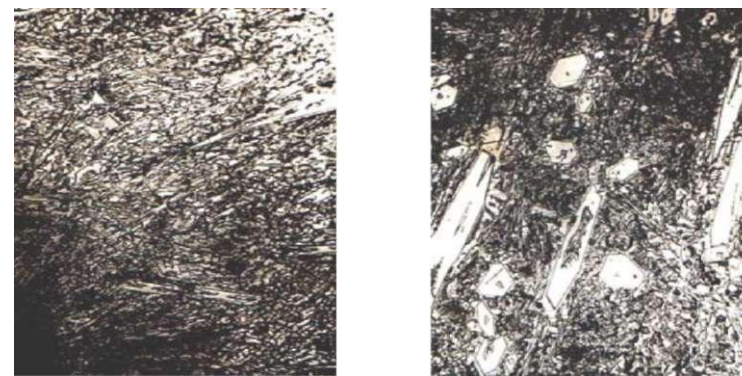


Рис. 5.83. Микроструктура сормаита-1 ( $\times 200$ ):

а – в литом состоянии; б – наплавленного газопламенным способом

Принципиально иная структура сормаита-1, наплавленного намораживанием из расплава (рис. 5.84). Для этих образцов присуще столбчатое строение металла. Первичные карбиды хрома и силициды железа преимущественно располагаются перпендикулярно поверхности тепловода. Со стороны внешней поверхности слоя, в плоскости, параллельной поверхности тепловода, кристаллы карбидов и силицидов выделяются в виде многоугольников, сце-

ментированных пластичной матрицей. Такая столбчатая структура – результат односторонне направленного теплоотвода. Направленное строение сплава, предназначенного для работы в абразивной среде, наиболее предпочтительно. Расположение твердой фазы в виде игл, столбчатых кристаллов по толщине слоя преимущественно нормально к поверхности трения затрудняет их разрушение. Разрушение слоя происходит, главным образом, в микрообъемах.

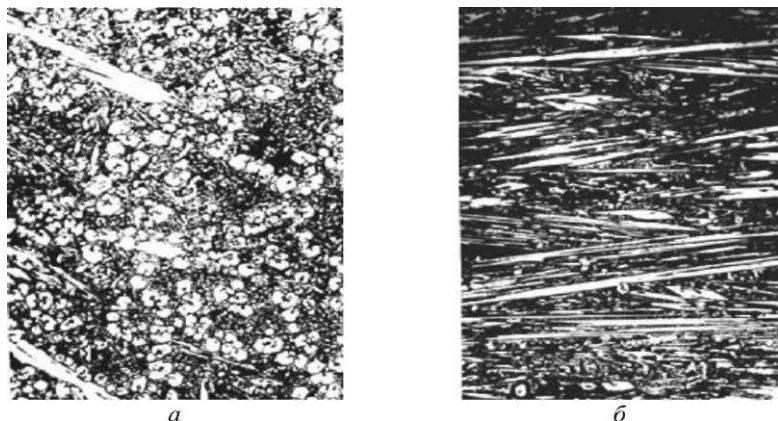


Рис. 5.84. Микроструктура наплавленного диффузионным намораживанием сормайтa-1 ( $\times 200$ ):

*a* – со стороны внешней поверхности покрытия;  
*б* – перпендикулярной ей плоскости

Крупнозернистость, разупорядоченность карбидов в наплавленном газопламенным способом или литом сормайте-1 не обеспечивает им высокой стойкости в абразивной среде. В таких покрытиях возможно скалывание слоя и выкрашивание твердых составляющих в отдельности, причем в значительных объемах, что существенно сказывается на величине износа.

Результаты испытаний на абразивное изнашивание и структурный анализ образцов из сормайтa-1 свидетельствуют о том, что металлопокрытия, полученные диффузионным намораживанием, имеют свои характерные особенности и являются предпочтительными по сравнению с литым сормайтoм-1 или наплавленным газопламенным способом. Эти преимущества обеспечиваются направленным формированием служебных свойств наплавленному диффузионным намораживанием покрытию.

Приведенные результаты абразивной износостойкости позволяют заключить, что при диффузионном намораживании комплексно сочетаются конструктивные, технологические и триботехнические факторы долговечности почворежущих элементов. Высокий уровень ударной вязкости и абразивной износостойкости высокохромистых сплавов наряду со столбчатой структурой, когда главные оси кристаллов перпендикулярно направлены к поверхности трения, создают необходимые предпосылки эффективного применения как самого сплава, так и способа его нанесения при изготовлении и восстановлении деталей, работающих в абразивной среде.

Стендовые сравнительные (серийных и экспериментальных изделий) испытания на абразивную износостойкость проводились для зубьев борон БЗС-603 и лап культиваторов. Испытания изделий проводились на 8-позиционной установке роторного типа. Линейная скорость перемещения испытываемых изделий на установке по почвенному каналу составляла 2,8 м/с. На стенд устанавливались одноименные детали с различными вариантами упрочняющих технологий.

Результаты стендовых испытаний приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11

*Линейный износ (мм) зубьев борон в зависимости от наработки в ходе стендовых испытаний на абразивную износостойкость*

Наработка, ч	Линейный износ (мм) испытываемых изделий						серийные
	экспериментальные, упрочненные диффузионным намораживанием износостойкими сплавами					УС-25 + термообработка	
	ФБХ-6-2	ФБХ-6-2 + термообработка	С-27	С-27 + термообработка	УС-25		
6,7	0,25	0,1	1,35	0,25	0,3	0,15	2,7
20,1	0,9	0,2	1,85	1,15	2,7	0,4	5,05
33,5	1,15	1,1	2,5	1,55	3,5	1,75	8,7
46,9	1,6	1,4	3,1	2,85	5,9	2,9	11,1
60,3	1,8	1,6	3,45	3,05	7,1	3,7	13,2

Как видно из данных, приведенных в табл. 5.11, все зубья борон, упрочненные диффузионным намораживанием высокохромистыми чугунами, имеют абразивную износостойкость выше в два раза и более, чем серийные изделия. Среди наплавленных зубьев борон наибольшей аб-

разивной износостойкостью обладают детали, упрочненные сплавом ФБХ-6-2. Их износостойкость в 8 раз выше серийных образцов.

Испытываемые серийные и восстановленные лапы (табл. 5.12) имеют одинаковую исходную форму и размеры. Изношенный почворезущий профиль лап восстановлен наращиванием сплава С-1 намораживанием на заготовку. Как показывают результаты испытаний, линейный износ серийных лап превышает этот показатель для восстановленных изделий в 2–3 раза. Некоторое нарастание интенсивности линейного износа по мере увеличения наработки объясняется уплотнением абразивной массы в почвенном канале.

Таблица 5.12

*Результаты линейного износа (мм) в ходе стендовых испытаний рыхлительных (котьевидных) лап культиваторов КИС-4 на абразивную износостойкость*

Тип испытываемых изделий	Наработка, ч					
	6,4	12,8	19,2	32,0	44,8	57,6
Серийные	0,38	0,78	1,37	2,02	4,27	4,5
Экспериментальные (восстановленные намораживанием сплава С-1 на заготовку)	0,18	0,37	0,58	0,78	1,47	2,41

Это происходит по мере увеличения площади контакта затылочной фаски с абразивной массой и под действием возрастающих динамических нагрузок в зоне трения.

Сравнительным эксплуатационным испытаниям подвергался целый ряд почворезущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин. В качестве эталонных принимались детали, изготовленные по базовой технологии. Экспериментальные партии деталей изготавливались с применением диффузионного намораживания погружением в расплав и износостойкого сплава или намораживания на заготовку. Испытания проводились в различных регионах СНГ (Белорусская, Калининская, Поволжская, Львовская, Прибалтийская МИС, КубНИИТиМ, объекты мелиоративного строительства, опорные пункты НПО «ВИСХОМ»). К числу испытываемых деталей относились: ковшовые зубья мелиоративных экскаваторов, зубья борон, оборотные рыхлительные лапы чизельных культиваторов, плужные долотообразные лемехи, долота плугов, зубья экскаваторов, лапы машин для внесения

в почву жидких комплексных удобрений, сошники сеялок, рыхлительные лапы культиваторов.

В качестве эталонных деталей принимались изделия, изготовленные по базовой технологии, освоенной заводами-изготовителями. Для большинства этих изделий (кроме лап УЛП и зубьев ЭТР-134) почворезущие профили изготавливались из монометалла с использованием традиционных методов термической обработки: закалка + отпуск (либо нормализация).

Отличительной конструкторской особенностью экспериментальных деталей являлся их биметаллический режущий профиль, независимо от исходной формы его сечения (клинообразного, прямоугольного и т. д.). На стальную основу почворезущего профиля с применением диффузионного намораживания погружением наносился слой высокохромистого чугуна (С1, С27, ФБХ-6-2, КБХ или их композиции). При восстановлении изношенных деталей, как правило, использовался способ диффузионного намораживания на заготовку. В этом случае износостойким высокохромистым чугуном выполнялись исходные форма и размеры изделий.

Сведения о работоспособности монометаллических и биметаллических почворезущих профилей рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин по результатам их сравнительных эксплуатационных испытаний, представлены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

*Результаты сравнительных эксплуатационных испытаний почворезущих профилей рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин, подвергнутых различным способам их упрочнения*

Наименование детали	Индекс по каталогу	Тип образца	Способ упрочнения почворезущего профиля	Износостойкий сплав	Коэффициент относительной износостойкости
Зуб ковша мелиоративного экскаватора	ЭТЦ-201-0801-005	Эталонные	Закалка + отпуск	–	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	80 м. ч. КБХ+20 м. ч. С-1	2,0

Продолжение табл. 5.13

Наименование детали	Индекс по каталогу	Тип образца	Способ упрочнения почворезущего профиля	Износостойкий сплав	Коэффициент относительной износостойкости
Лапа машины для внесения ЖКУ	УЛП - 00628	Эталонные	Электродуговая наплавка	ПП-125	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПР-С27	3,0–3,5
		Восстановленные	ДН на заготовку	ПР-С27	2,0–2,5
Зуб бороны	БЗС-603	Эталонные	Закалка + отпуск	–	1,0 1,8–2,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПГ-ФБХ-6-2	
Зуб бороны	БЗС-603У	Эталонные	Нормализация	–	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПГ-ФБХ-6-2	Не менее 3,5
Лапа обратная КШП-8	Тип 6.7	Эталонные	Закалка + отпуск	–	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПР-С27	3–4
Лапа обратная КЧН-5,4	КЧ-01.00.005	Эталонные	Закалка+ отпуск	–	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПР-С27	1,9
		Экспериментальные	ДН на заготовку	ПР-С27	4,25
Лемех (долотообразный) носок	ОР ПНЧ С-01.792А	Эталонные	Закалка+ отпуск	–	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПГ-ФБХ-6-2	1,5–2,0
Лапа рыхлительная КПС-4	Тип 7	Эталонные	Закалка+ отпуск	–	1,0
		Восстановленные	ДН на заготовку	ПР-С27	2,0–2,4

Окончание таблицы 5.13

Наименование детали	Индекс по каталогу	Тип образца	Способ упрочнения почворезущего профиля	Износостойкий сплав	Коэффициент относительной износостойкости
Сошник ссылки СЗУ-3.6	СЗУ-3.6	Эталонные	–	–	1,0
		Восстановленные	ДН на заготовку	ПР-С27	2,0–2,2
Зуб экскаватора ЭТР-134	ЭТР-134	Эталонные	Электродуг. напл.	Ж-Т-620	1,0
		Экспериментальные	ДН на заготовку	ПГ-ФБХ-6-2	1,3–1,5
Зуб экскаватора ЭТЦ-258	ЭТЦ-258	Эталонные	Закалка + отпуск	–	1,0
		Восстановленные	ДН на заготовку	ПР-С1	2,0–2,6
Долото плуга ППП-7-40	ПГ-03.00.002	Эталонные	Закалка + отпуск	–	1,0
		Экспериментальные	ДНПРМ	ПР-С27	2,9

Как видно из приведенных в табл. 5.13 данных, наработка до предельного состояния биметаллических почворезущих профилей для всех исследуемых вариантов изделий превышает этот показатель изделий с монометаллическими профилями. Результаты эксплуатационных испытаний на машиноиспытательных станциях подтвердили высокий уровень работоспособности ПРЭ с биметаллическими почворезущими профилями.

## 5.6. Применение лазерных технологий

### 5.6.1. Лазерное модифицирование

В настоящее время лазерная технология прочно заняла свои позиции в промышленности ведущих стран мира. Быстрыми темпами наращивается выпуск лазерного оборудования. Ведущие автомобильные фирмы, например, широко используют эту современную технологию как в мелкосерийном, так и в массовом производстве.

Использование лазерных установок позволяет сократить время перехода производства на выпуск новых изделий без снижения качества и производительности технологического процесса, эффективно заменить традиционные методы термообработки и сварки, а также значительно повысить культуру труда. Универсальность лазерной техники позволяет успешно использовать ее и в автоматических линиях, и в производстве малых серий. Несмотря на высокую стоимость, лазерная техника во многих технологических процессах оказывается более эффективной за счет снижения себестоимости продукции и повышении ее качества.

Технологические методы обеспечения заданного ресурса деталей и узлов машин в машиностроении являются наиболее эффективными в процессах изготовления, обработки и нанесения защитных покрытий. Они позволяют повысить точность изготовления деталей и сборки узлов машин, а также обеспечить оптимальное для данных условий эксплуатации состояние поверхностного слоя.

Поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному воздействию. Потеря деталию своего служебного предназначения и ее разрушение в большинстве случаев начинается с поверхностного слоя, например, возникновение и развитие усталостной трещины, коррозии, эрозии, износа и др.

Перспективными являются методы упрочнения и восстановления деталей машин с использованием концентрированных источников энергии, позволяющие создавать на рабочей поверхности покрытия с заданными свойствами. Как правило, это достигается совокупностью нескольких методов, например, газотермическое напыление и последующее лазерное оплавление и др. (рис. 5.85).

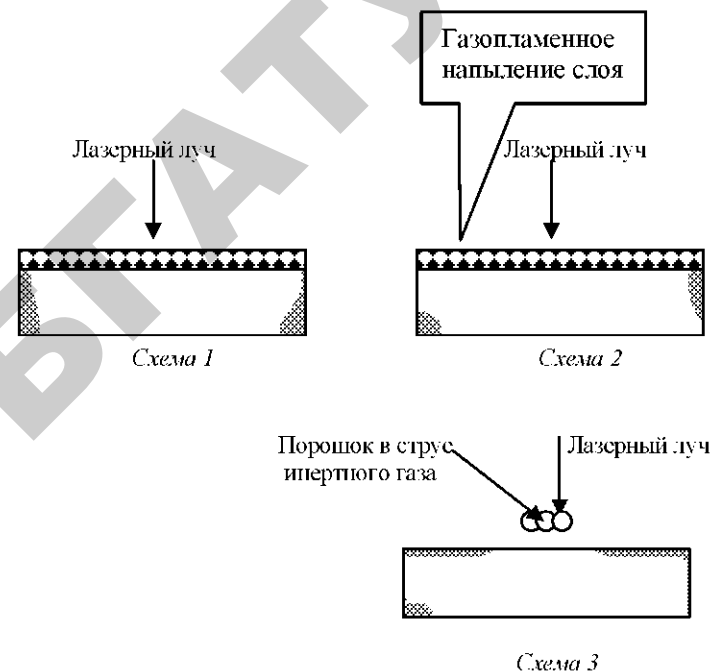


Рис. 5.85. Схемы создания модифицированных слоев с использованием лазерного луча:

схема 1 – шликерная обмазка; схема 2 – предварительное газотермическое напыление; схема 3 – одновременная подача порошка

Применение технологических лазеров обусловлено возможностями сфокусированного лазерного излучения: бесконтактность и локальность воздействия, минимальная зона термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения, снижение уровня остаточных напряжений, отсутствие коробления, повышение дисперсности структуры и т. д.

Оплавление поверхностного слоя при такой обработке обеспечивает возможность лазерной наплавки, лазерного легирования и модифицирования (как промежуточного процесса между наплавкой и легированием) поверхностного слоя элементами, наносимыми на поверхность в виде шликерной обмазки, напыленного покрытия, инъекцией порошка в ванну расплава, наведенную лазерным лучом. Процесс

лазерного легирования происходит путем конвективного массопереноса в жидкой ванне и диффузионного перераспределения легирующих элементов. В условиях лазерного легирования, в отличие от обычной ХТО, можно обеспечить очень высокое насыщение матрицы легирующим элементом на значительную глубину (до 1 мм) за короткое время. Введение различных легирующих элементов при лазерной обработке приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик материала (твердость, контактная прочность, износостойкость, жаропрочность и др.).

Этот метод позволяет создавать широкий спектр легированных поверхностных слоев в зависимости от конкретных условий эксплуатации. По сравнению с ранее известными способами (например, цементация, азотирование, борирование), модификация поверхности легированием при локальном лазерном нагреве и высоких скоростях плавления и затвердевания обладает рядом преимуществ: экономией легирующего материала, минимальным объемом последующей механической обработки, отсутствием деформации деталей и необходимостью последующей термической обработки, достаточно хорошим воспроизводством. В целом, метод лазерного легирования дает возможность насыщать поверхностные слои деталей простыми и сложными компонентами, формировать широкий спектр легированных поверхностных структур (от твердых растворов до сложных дисперсных композитов), получать трибологически оптимальные композиты. Так как метод предполагает расплавление поверхности, то во многих случаях требуется последующая механическая обработка. В последние годы в лаборатории лазерной обработки материалов ФТИ НАН Беларуси накоплен большой опыт по лазерной наплавке, легированию и модифицированию различных сталей и сплавов [18–20]. В качестве легирующих материалов использовались порошки металлов, неметаллов, карбидов, боридов, силицидов и др. Введение различных легирующих элементов при лазерной обработке приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик материала деталей. Изменение физико-механических свойств при лазерном легировании обусловлено изменением химического состава и структурно-фазового состояния материала. В связи с этим считается перспективным применение метода лазерного легирования-модифицирования для упрочнения быстроизнашивающихся поверхностей деталей широкой номенклатуры, в частности, ножей кормоуборочных комбайнов.

Ножи с.-х. машин работают в сложнейших условиях. Они испытывают износ трением, абразивный износ и ударные нагрузки. Поэтому

материал, используемый для их изготовления, должен обладать высокой прочностью и пластичностью, а также высокими износо- и коррозионной стойкостью, стойкостью к ударному воздействию [21].

Ножи кормоуборочных машин, изготовленные из традиционно применяемых конструкционных промышленных нелегированных марок сталей типа 40Х, 65Г, обладают высоким сопротивлением ударной вязкости и изгибающим нагрузкам, если их термически обработать с образованием бейнитной структуры, но тогда они имеют недостаточную твердость режущей кромки, что снижает их износостойкость и ресурс работы. Повышение износостойкости режущей части путем нанесения покрытий газотермическими методами увеличивает сопротивление ножей к износу, но хрупкость покрытий не позволяет использовать их в условиях воздействия высоких ударных и изгибающих нагрузок и наличия в почвах инородных тел типа камней, металлических предметов и др., которые попадают в рабочую зону и приводят к появлению зазубрин, сколов, трещин, а затем к поломке.

Изучение опыта ведущих зарубежных фирм, изготавливающих ножи с.-х. машин, показало, что ими также используются среднеуглеродистые легированные стали с улучшенной или закаленной и отпущенной структурой, режущая часть ножей при этом подвергается упрочнению путем применения методов обработки концентрированными потоками энергии (лазерной, плазменной, комбинированной обработки и др.). Ресурс работы ножей, закупасных за рубежом и изготовленных ведущими немецкими фирмами *Claas, Lund* и др. для кормоуборочных комбайнов, в несколько раз выше отечественных.

Поэтому в задачу данного исследования входила разработка качественных недорогих отечественных ножей, по эксплуатационным характеристикам сравнимых с зарубежными аналогами.

Исследования были выполнены на образцах стали пониженной прокаливаемости 60ПП толщиной 8 мм с лазерным модифицированием режущей поверхности ножей [22, 23]. Внедрение сталей пониженной прокаливаемости обещает быть перспективным и связано с такими преимуществами этих сталей, как возможность бездеформационной закалки на мартенсит при охлаждении, низкая себестоимость в сочетании с высокими прочностными и пластическими свойствами и возможность получения в них дифференцированного распределения свойств по сечению изделий. Получение такого распределения свойств на традиционно применяемых для этих целей сталях затруднено. После объемной или индукционной закалки ножи из них закалываются насквозь, и твердость по сечению равномерная, с небольшим повышением к поверхности примерно на 2–3 единицы HRC.



Стали пониженной прокаливаемости типа 60ПП строго регламентируются по примесям во избежание сквозной прокаливаемости. Прокаливаемость стали 60ПП характеризуется «идеальным критическим диаметром», величина которой находится в пределах 8 мм [24]. Это позволяет получать на поверхности изделий путем закалки твердые слои глубиной несколько миллиметров в сочетании с пластичной сердцевиной.

Известно, что эксплуатационные свойства изделий формируются в процессе их изготовления и определяются не только химическим составом стали, но и свойствами, полученными в процессе технологической и термической обработок.

Так как технология изготовления ножей предусматривает использование листовой стали и предполагает предварительные операции формообразования: высежку или вырезку заготовки прямоугольной формы, пазов или отверстий для крепления и загиб, необходимо было исследовать структуру и состояние поверхности после окончательного изготовления изделия нужной конфигурации. Задача же последующей термической обработки заключалась в нагреве заготовок со скоростью, обеспечивающей быстрое достижение оптимальной температуры закалки по всему сечению, и охлаждение со скоростью, необходимой для формирования оптимальной структуры поверхности и сердцевины, а также обеспечение стабильного контролируемого процесса нагрева и охлаждения детали. Нагрев стали 60ПП проводили в интервале 820–850 °С в печи сопротивления. Охлаждение осуществлялось быстроскучившей водой с использованием специально сконструированного спрейерного устройства для обеспечения необходимой скорости охлаждения [25].

Исследование микроструктуры стали проводили металлографическим методом с помощью оптического микроскопа «Neophot». Травление осуществлялось 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте, либо реактивом Марбле, содержащем 1,5 г  $\text{CuSO}_4$ , 1,5 г пикриновой кислоты, 10 мл  $\text{HCl}$ , 50 мл этилового спирта. Легированные и упрочненные слои изучали на шлифах поперечных сечений. Твердость измеряли, используя микротвердомер ПМТ-3 и твердомер Роквелла.

Поверхностное упрочнение ножей и лазерное модифицирование производилось на  $\text{CO}_2$  установке непрерывного действия «Комета-2» с выходной мощностью 1 кВт. Ударную вязкость измеряли на образцах без надреза размером 10×10×56 мм, используя маятниковый копер. Удар наносили как со стороны модифицированного слоя, так и с противоположной.

Металлографический анализ структуры листа в состоянии поставки показал, что она состоит из перлита и феррита по границам бывших зерен аустенита. Соотношение эвтектоидной и ферритной составляющих примерно 85:15, балл зерна – 5–6. На поверхности листа имеется слой глубиной ~ 0,2–0,3 мм со структурой феррита, по-видимому, получающийся в процессе изготовления листа и обусловленный обезуглероживанием поверхностного слоя.

После нагрева и закалки структура поверхностного закаленного слоя представляет собой мартенсит, глубина и дисперсность которого определяются параметрами нагрева и охлаждения, твердость изменяется в пределах 48–62 HRC.

Переходный слой характеризуется смешанной структурой мартенсита и троостосорбита с постепенным увеличением содержания троостосорбита в направлении сердцевины детали. Твердость сердцевины детали определяется соотношением фаз, дисперсностью структурных составляющих и колеблется в пределах 28–45 HRC.

Наряду с указанными составляющими, в структуре деталей всегда присутствует некоторое количество остаточного аустенита (~ 3–5 %), влияющее на твердость закаленного слоя и сердцевины.

Опыты показали, что увеличение времени пребывания заготовки при нагреве в интервале температуры выше 700 °С и температуры закалки приводит к стабилизации аустенита, возрастанию его количества в структуре при последующем охлаждении (до ~ 5–8 %) и снижению твердости. С увеличением температуры закалки растет и средний размер аустенитного зерна, причем интенсивный рост происходит при температурах выше 900 °С. Таким образом, оптимальной температурой закалки является 830–850 °С. Что касается времени нагрева, то оно должно быть минимально возможным для нагревания детали до оптимальной температуры.

При нагреве заготовок под закалку и нагревах в процессе формообразования происходит дополнительное окисление поверхностного слоя с увеличением глубины обезуглероженного слоя. Глубина его в готовых изделиях иногда достигала 0,5 мм. В результате последующей термической обработки на поверхности закаленных ножей присутствуют слои: сначала обезуглероженный, со структурой феррита, затем – со структурой малоуглеродистого мартенсита и затем – только мартенсита, соответствующего концентрации твердого раствора аустенита в стали (0,6 % С). Между ними существуют переходные зоны, содержащие смесь рядом прилегающих структурных составляющих. Степень искаженности кристаллической решетки малоуглеродистого мартенсита меньше, следовательно, ниже его твердость. Характер изменения твердости по сечению соответствует изменению микроструктуры.

Твердость феррита – 14–18 HRC, малоуглеродистого мартенсита – 32–35 HRC, мартенсит с концентрацией углерода 0,6 % имеет твердость 45–62 HRC.

Испытания опытной партии ножей для кормоуборочного комбайна «Jaguar» из стали 60ПП с использованием технологии формообразования, применяемой в КУПП «Березарайагросервис», закаленных по различным режимам для получения мартенсита на режущей кромке ножей, соответствующего твердостям 45–48; 48–50; 50–52; 55–58 HRC, проведенные в лабораторных условиях ударом, имитирующим работу ножей при попадании в агрегат камней и других жестких предметов, позволили определить оптимальную твердость, прочность и достаточную вязкость, чтобы обеспечить высокое сопротивление ударным и изгибающим нагрузкам и исключить хрупкое выкрашивание кромки ножа в процессе работы.

Для повышения износостойкости, режущую кромку ножей подвергали лазерному модифицированию. Для этого была разработана технология нанесения специальных порошкообразных смесей тугоплавких карбидов  $Cr$  и  $W$ , боридов и других элементов на различной связке с целью получения износостойких покрытий, и разработан технологический процесс лазерной обработки с оплавлением нанесенных слоев.

После анализа полученных данных твердости, качества обработанной поверхности и сформированных слоев, их глубины, а также глубины зоны термического влияния были выбраны составы порошков для модифицирования и режимы лазерной обработки. По выбранным режимам были обработаны и испытаны опытные ножи для кормоуборочного комбайна «Jaguar».

На рис. 5.86 приведена микроструктура поперечного сечения ножа из стали 60ПП, упрочненного лазерным модифицированием и имеющего на поверхности обезуглероженный слой глубиной порядка 0,2 мм. Видно, что наличие на поверхности заготовки обезуглероженного слоя приводит к образованию слоистой структуры в процессе дальнейшей термической обработки и лазерного модифицирования. Граница слой–подложка частично подплавляется и характеризуется когерентной переходной структурной зоной, в которой интенсифицируются все механизмы диффузии, в том числе и конвективное движение в жидкой фазе. Это приводит к растворению железа в материале основы слоя, образованию раствора замещения легирующих элементов, поступающих из аустенита в слой, и изменению состава аустенита приграничной зоны под-

ложки, а именно – к уменьшению концентрации углерода вследствие того, что углерод стремится вступить в реакцию с карбидообразующими элементами и при наличии готовых центров кристаллизации откладывается на них.



×250

0,1 мм

Рис. 5.86. Микроструктура поперечного сечения ножа кормоуборочного комбайна «Jaguar» из стали 60ПП

В результате на границе слой–подложка виден слой малоуглеродистого аустенита, превращенного в мартенсит в смеси с некоторым количеством остаточного аустенита с пониженной твердостью, глубина его порядка 1–2 мкм. Затем следуют чередующиеся слои подложки: ферритный, мартенситный и сорбитотрооститный с переходными зонами между ними, в которых присутствует смесь соответствующих структурных составляющих смежных зон. В зависимости от режимов обработки и глубины обезуглероженного слоя, изменяются глубина слоев и распределение твердости.

Наличие мягкого феррита под наплавленным слоем и малоуглеродистого мартенсита, который следует за термически неупрочняемым ферритным, прежде чем образуется термически упрочненный, более темно травящийся твердый мартенсит, отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках стали, снижая их.

Анализ микроструктуры преждевременно вышедших из строя ножей из стали 60ПП показал, что преимущественными местами зарождения трещин могут быть кромки отверстий. При металлографическом исследовании на их поверхности в ряде случаев были обнаружены мелкие трещины, по контуру выходящие на поверхность и распространяющиеся по границам зерен ферритного окисленного слоя, обедненного углеродом. Поэтому для получения качественных бездефектных режущих кромок на лезвиях ножей необходимо удалить обезуглероженный слой.

На рис. 5.87 приведены результаты изменения твердости поперечного сечения ножа из стали 60ПП, закаленного на мартенсит с твердостью ~ 50–52 HRC и с предварительно снятым обезуглероженным слоем перед операцией лазерного модифицирования. Там же нанесены данные изменения твердости после аналогичной обработки и низкого отпуска (180 °С, 2 ч).

Видно, что твердость упрочненного мартенсита в зоне, претерпевшей перекристаллизацию и термическую закалку, достигает 13 000 МПа. В зоне, подвергнутой нагреву ниже температуры  $A_{c1}$  (интервал 0,35–0,45 мм), твердость снижается до 4500 МПа. На глубине ~ 0,02 мм от границы подложки быстрое снижение твердости происходит вследствие обогащения аустенита легирующими элементами из расплавленного слоя и образования твердого раствора замещения, что сопровождается возникновением растягивающих напряжений, а также связывания углерода из приповерхностной зоны и образования карбидов  $Cr$  и  $W$ . Последние откладываются на имеющихся готовых центрах кристаллизации (включениях карбидов), либо образуются в приграничной зоне, где происходит частичное оплавление подложки. Упрочненный в результате перекристаллизации аустенит с концентрацией углерода 0,6 %, расположенный глубже, приобретает мелкодисперсную структуру с твердостью ~ 70–72 HRC.

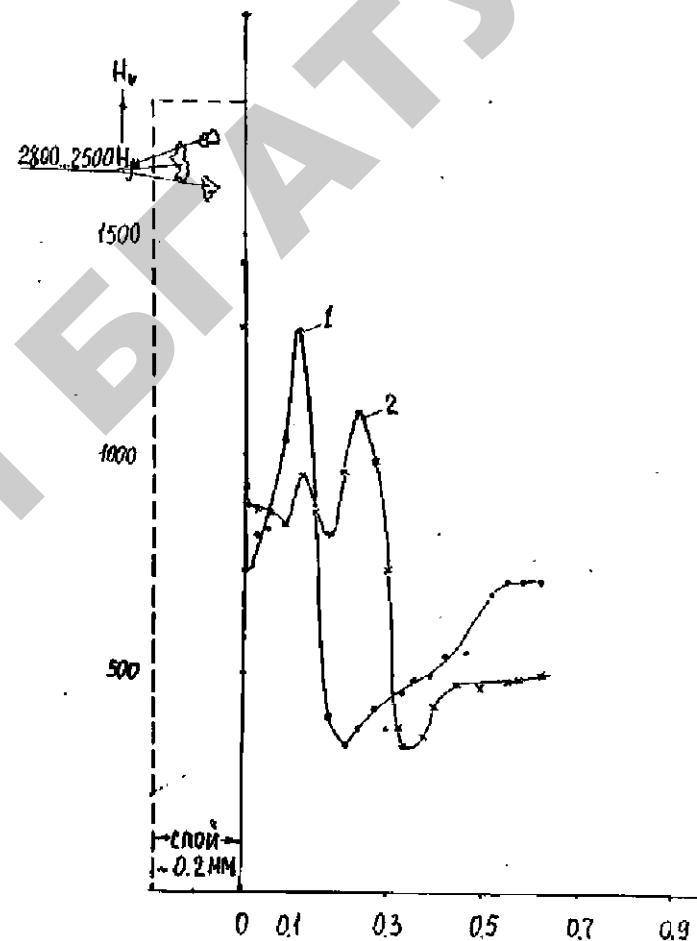


Рис. 5.87. Изменение твердости по поперечному сечению ножа кормоборочного комбайна «Jaguar» из стали 60ПП с лазерным модифицированием:  
1 — без отпуска; 2 — с отпуском

Проведенный дополнительный низкий отпуск уменьшает падение твердости в приграничном слое вследствие частичного снятия растягивающих напряжений, но при этом снижается твердость упрочненного мартенсита из-за уменьшения степени тетрагональности решетки и релаксации напряжений (рис. 5.87, кривая 2).

Глубина зоны термической перекристаллизации при принятых параметрах лазерной обработки составляет ~ 0,3 мм. Вслед за ней

следует зона отпуска, связанная с релаксацией напряжений и возвратных явлений в мартенсите, и снижением твердости глубиной ~ 0,1–0,25 мм.

Суммарная упрочненная зона, полученная лазерным модифицированием и перезакалкой, составляет ~ 0,5–0,6 мм и образует как бы упрочненный (быстро закристаллизованный) мелкокристаллический каркас, увеличивающий конструкционную прочность.

Наличие когерентной тонкой переходной смягчающей зоны на границе слой–подложка увеличивает адгезионные свойства наплавленного слоя и оказывает положительные влияния на сцепляемость слоя с подложкой, уменьшая напряжения скалывания при приложении ударных воздействий.

Заваривание дефектов на поверхности в процессе лазерной обработки приводит к устранению концентраторов напряжений и повышает ударную вязкость. Сравнительные испытания на ударную вязкость образцов без надреза показали, что работа ударного разрушения со стороны упрочненных слоев глубиной 0,1–0,2 мм возрастает примерно в 2 раза по сравнению с образцами аналогичных сталей, не подвергавшихся лазерному модифицированию.

На основании проведенных экспериментальных данных и опытных испытаний разработаны технология изготовления ножей измельчителей для кормоуборочного комбайна «Jaguar» из стали 60ГП и техпроцессы термической обработки и лазерного модифицирования режущей части.

Наличие очень твердых частиц в наплавленном слое увеличивает износостойкость режущих кромок. В условиях эксплуатации происходит более быстрое изнашивание неупрочненной стороны режущей кромки, что уменьшает затупление ножа, имитируя эффект самозатачивания в процессе работы.

### 5.6.2. Лазерная наплавка

В промышленности существует достаточно много методов наплавки и нанесения покрытий, однако ни один из них не позволяет решить всю совокупность задач, которые ставит современное машиностроение. Традиционные методы наплавки и нанесения покрытий обладают определенными недостатками, из которых можно отметить следующие: недостаточная адгезионная прочность слоя; значительное перемешивание наплавляемого слоя и основы и, как следствие, низкие механические свойства; существенное тепловое воздействие и связанные с этим деформации и коробления. Приме-

нение лазерного излучения является перспективным также в технологии наплавки износостойких покрытий. При этом обеспечивается высокая прочность сцепления покрытия с основой вследствие частичного проплавления и минимального теплового воздействия на обрабатываемое изделие. Появляется реальная возможность создания износостойких слоев на поверхностях деталей, изготовленных из недорогих и недефицитных марок сталей и сплавов. Кроме того, использование энергии лазера позволяет восстанавливать отдельные изношенные места с повышением физико-механических свойств поверхности. При этом процесс осуществляется таким образом, что основа подплавляется минимально, а свойства покрытия определяются в основном свойствами присадочного материала. Преимущества метода:

- подбор соответствующего состава наплавленного слоя и специальных добавок позволяет добиваться необходимых свойств наплавленной поверхности;
- локальность процесса нагрева позволяет осуществлять наплавку как малых, так и достаточно протяженных поверхностей при чередовании нанесения порошкового слоя и его лазерного оплавления;
- высокая прочность сцепления покрытия–подложка за счет взаимодействия материала и подложки в жидкой фазе;
- минимальное подплавление основы и отсутствие деформации и короблений на прецизионных деталях.

В зависимости от вида детали можно проводить лазерное оплавление предварительно нанесенного покрытия или непосредственно лазерную наплавку при подаче в зону лазерного нагрева присадочного материала в виде порошка или проволоки. При этом обеспечиваются высокое качество наплавленного слоя, высокая прочность его сцепления вследствие металлургической связи с основой и минимальное тепловое воздействие на обрабатываемую деталь.

При легировании идет расплавление тонкого слоя присадочного материала и металла основы и их интенсивное перемешивание для получения заданного состава поверхностного слоя. При лазерной наплавке процесс ведут с минимальным перемешиванием с основой (до 10–15 %), обеспечивая металлургическую связь, когда состав и свойства поверхностного слоя практически полностью определяются составом и структурой присадочного материала после лазерной обработки.

Лазерная наплавка при оплавлении покрытий описывается тепловой задачей нагрева и плавления двухслойной (и более) среды

с учетом гидродинамических процессов теплопереноса, когда плавление идет от поверхностного слоя к материалу основы. При газопорошковой наплавке механизм другой: основную роль играют процессы нагрева и плавления инжесктируемых частиц порошкового сплава в ванну расплава, наведенную лазерным лучом.

*Присадочные материалы.* Возможность получения любых материалов в форме порошков способствует широкому их использованию в процессах лазерного модифицирования, легирования и наплавки. Применяются металлические, керамические, композитные и другие порошки.

При выборе требуемого материала для покрытия необходимо учитывать общие требования, определяющие качественные параметры покрытий. Основным условием является согласование физико-химических свойств материала с мощностью распылителя, составом и свойствами применяемых газов, местом ввода порошка, совместимостью с подложкой, другими технологическими параметрами процесса.

Для процесса лазерного легирования, как правило, применяются тонкодисперсные порошковые материалы фракцией до 10 мкм, позволяющие получать равномерные по толщине шликерные обмазки легирующих компонентов. С увеличением фракции порошка разнотолщинность увеличивается, что в итоге влияет на качество легирования.

Из порошковых материалов для легирования используются:

- чистые металлы: молибден, хром, ванадий, титан и др.;
- неметаллы: кремний, бор, углерод;
- керамические материалы представлены нитридами, карбидами,

боридами металлов переходных групп; рядом самофлюсующихся сплавов на основе никеля и кобальта.

Такой широкий спектр легирующих материалов объясняется различными физико-механическими свойствами, предъявляемыми к поверхностным слоям: от коррозионной стойкости до сопротивления абразивному изнашиванию и т. д.

В машиностроении легирование применяется для упрочнения рабочих (сопрягаемых) поверхностей, и материалами для него могут быть бор, углерод, карбид бора, борид никеля и хрома, а также газовые среды – азот, углекислый газ, аргон, метан.

Поиски новых составов порошков и методов их изготовления привели к созданию большого количества материалов для покрытий различного назначения. Однако многие из них не исследованы, а для других отсутствуют рекомендации, технические условия, не организовано их массовое производство.

Порошки хромоникелевых самофлюсующихся сплавов нашли широкое применение в области наплавки, в том числе и лазерной. По granulометрическому составу они делятся на пять классов, из которых для лазерной наплавки используются второй и третий с размерами частиц соответственно 40–100 и 100–160 мкм. Выпускаемые порошки сплавов на основе никеля производятся методом восстановления и распыления. Каждая частица этих сплавов представляет собой соединение разнородных металлов. Восстановленные порошки содержат меньше примесей, чем распыленные. Однако последние имеют лучшую текучесть.

Для нанесения промежуточных слоев связи, восстановления размеров изношенных деталей, получения износостойких слоев на различных деталях машин и механизмов рекомендуются экзотермически реагирующие порошки, образующие соединения никеля с алюминием: ПТ-Ю5Н, ПТ-Ю10Н, ПТ-ЮНХ15(16)СР2(3).

Сфероидизированный порошок сплава на никелевой основе, например, ПГ-12Н-01 используется для получения покрытий на деталях из углеродистых и нержавеющей сталей и чугунов, имеющих низкий коэффициент трения и твердость 35–40 НRC. Допустимая рабочая температура – 1070 К.

*Способы предварительного нанесения присадочных материалов.*

Для процесса лазерного легирования применяют шликерные обмазки на основе спирта, ацетона, лака, которые наносятся кистью, окуномисом, распылением. Порошки относительно крупных фракций наносятся газотермическим напылением. Широко применяются газопламенный, плазменный, детонационный способы напыления, в том числе и для лазерной наплавки.

Преимущества газопламенного нанесения состоят в высокой производительности процесса, локальности обработки, в незначительном термическом влиянии на подложку, возможности нанесения покрытий на изделия больших размеров.

Технологический процесс газопламенного нанесения, в основном, состоит из трех этапов:

- нагрев поверхности детали до 200–250 °С;
- нанесение подслоя, который даст основу, необходимую для наложения основного покрытия;
- нанесение основного покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами.

Плазменное напыление используют для нанесения покрытий на трущиеся поверхности деталей типа вала, шейки колчатого вала, постелей и блоков двигателей, направляющих колонок и втулок штампов и др.

Детонационный способ нанесения порошковых покрытий основан на использовании энергии детонации в газах. При этом способе порошок наносится взрывом ацетиленокислородной смеси, обеспечивающим скорость частиц порошка 800–900 м/с. Существенным преимуществом является умеренный нагрев обрабатываемой детали – не выше 250 °С.

Следует отметить, что газопламенный способ напыления покрытий для последующей лазерной обработки не уступает плазменному и детонационному, а в ряде случаев превосходит их по производительности процесса напыления, относительной несложности в обслуживании оборудования, мобильности процесса.

### 5.6.3. Лазерная закалка

Лазерная закалка перспективна для изделий, долговечность которых лимитируется износостойкостью и сопротивлением усталости, особенно если закалка другими методами затруднена вследствие сложности конфигурации детали и возможности ее значительного коробления.

Метод основан на использовании высоких скоростей нагрева поверхностного слоя до температур, превышающих температуры фазовых превращений, и последующего высокоскоростного охлаждения путем теплоотвода с поверхности в основную массу металла. Может являться финишной операцией, так как не изменяет геометрию детали и обеспечивает повышение твердости на 2–3 единицы HRC по сравнению с максимально возможными методами стандартной термообработки. Лазерная обработка без оплавления не изменяет шероховатость поверхности и практически не меняет распределение легирующих элементов в поверхностном слое.

*Лазерное технологическое оборудование.* В большинстве своем работы проводились на созданном в ФТИ НАН Беларуси лазерном технологическом комплексе «Комета-УНИЛАМ», который включает в себя лазерную технологическую установку «Комета-2» с длиной волны непрерывного излучения  $\lambda = 10,6$  мкм и максимальной выходной мощностью 1 кВт, автоматизированный манипулятор «УНИЛАМ» и вращательный модуль, управляемые системой ЧПУ «Сфера-36» (рис. 5.88).



Рис. 5.88. Лазерный технологический комплекс «Комета-УНИЛАМ»

Ниже представлены основные технические данные лазерной технологической установки «Комета-2».

Длина волны излучения, мкм	9,2–10,8
Диаметр лазерного луча, мм, не более	45
Угол расходимости лазерного луча, рад, не более	$5 \cdot 10^{-3}$
Эксплуатационная мощность излучения, кВт	1
Плавное регулирование мощности, Вт	200–1200
Относительная нестабильность мощности, %, не более	10
Расход газов, м <sup>3</sup> /ч:	
гелий технический	0,031
смесь азота технического и кислорода	
в соотношении 90% и 10%	0,022
двуокись углерода	0,003
Расход охлаждающей воды, л/мин	12

Лазерная технология упрочнения была апробирована для различного рода ножей и дисков. Для модифицирования, например, ножей кормоуборочных комбайнов использовался метод предварительного нанесения и последующего лазерного оплавления износостойкого покрытия. Для предотвращения короблений деталей в процессе обработки из-за их нагрева была изготовлена специализированная оснастка для обработки в воде. Техоснастка для лазерной обработки включала в себя магнитную плиту, ванну с охлаждающей жидкостью.

дающей жидкостью, упоры, ограничители, зажимы и другие приспособления. Детали типа дисков закреплялись в программируемом вращателе на основе планшайбы. Основная задача техоснастки состояла в надежности крепления, обеспечении быстрого съема-установки деталей при их поточной обработке, горизонтальности упрочняемых участков, дополнительного теплоотвода при нагреве деталей.

Была также обеспечена возможность подачи (при необходимости) в зону обработки инертного газа – аргона и сдува паров модифицирующих материалов с целью защиты попадания их в фокусирующий объектив.

Изготовленная техоснастка была апробирована при лазерном модифицировании опытных образцов и показала свою работоспособность для всего указанного выше спектра деталей. На рис. 5.89 продемонстрирована установка лазерного модифицирования дисков бороны.



Рис. 5.89. Установка лазерного модифицирования дисков бороны

По результатам исследований предложены марки сталей (60ПП, 30ХГСА, 9ХФ) и покрытий для изготовления деталей ножей типа измельчителей кормоуборочных машин, РСК, ИРК, косилок, куку-

рузных жаток, дообрезки ботвы, дисков сеялок и борон, работающих при отличающихся условиях, с целью достижения необходимого уровня эксплуатационных характеристик.

На основе проведенных мероприятий разработаны технологические процессы лазерного поверхностного упрочнения указанных деталей.

Оптимизация указанных процессов проводилась по следующим направлениям:

- подготовка поверхности деталей;
- скоростные режимы лазерной обработки;
- режимы охлаждения деталей в процессе лазерной обработки;
- влияние режимов термического отпуска деталей.

Для большинства деталей осуществлены предварительные полевые испытания, а для ножей кормоуборочного комбайна «Jaguar-840», ротационных косилок КРН-2.1 (рис. 5.90), дообрезки ботвы свеклоуборочного комбайна КСН-6 (рис. 5.91), сегментных ножей кукурузных жаток «Champion-360» (рис. 5.92) и ПКК-02 на Бел-МИСе завершены приемочные полевые испытания.



Рис. 5.90. Упрочненные ножи ротационных косилок КРН-2.1 после предварительных испытаний

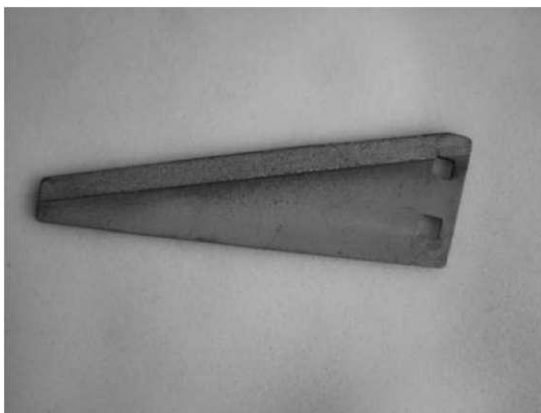


Рис. 5.91. Нож свеклоуборочного комбайна КСН-6



Рис. 5.92. Сегментные ножи к кукурузной жатке «Champion-360»

В результате полевых испытаний установлено, что износ, например, упрочненных ножей дообрезки ботвы к свеклоуборочному комбайну КСН-6 при общей наработке 170 га составил не более 1 мм. Таким образом, оценка показывает, что упрочненные ножи могут иметь ресурс в 7–10 раз более высокий. При этом отмечается, что качество обрезки ботвы также было значительно выше.

Полевые испытания сегментных ножей к кукурузным жаткам показали следующее. Так, по износу опытные образцы к жатке «Champion-360» не уступали оригинальным образцам – свидетелям. В то же время последние демонстрировали большую склонность к поломке зубьев при соприкосновении с посторонними предмета-

ми (камнями). Это связывается с большей исходной твердостью, и соответственно, с более низкой ударной вязкостью ножей немецкой фирмы-производителя. Крупные поломки, проходящие через границу упрочнения ТВЧ, вызваны низким сопротивлением материала  $\sigma_b$  в неупрочненной части ножей. Кроме того, отмечено, что на данной жатке опытные ножи изнашиваются неравномерно: до середины – с одной стороны, далее – с другой. Это связано со спецификой их крепления на жатке. Рекомендовано такие ножи также упрочнять или проводить их полное двустороннее упрочнение.

В конечном итоге установлено, что ресурс работы изготовленных по разработанной технологии ножей комбайна «Jaguar-840», кукурузной жатки «Champion-360» и ротационных косилок на наших полях может не только не уступать зарубежным аналогам, например, немецких фирм *Lund, Kemper* и *Krone*, но и превосходить их. При этом ресурс работы изготовленных ножей косилок в 2–3 раза выше, чем у серийно выпускаемых ОАО «Бобруйскагромаш». Сделан вывод, что организация выпуска упрочненных деталей позволит получить значительный экономический эффект по линии импортозамещения. В частности, ПО «Гомсельмаш» для кормоуборочного комбайна КВК-800 сегодня закупает ножи измельчителя в Германии по цене приблизительно 50 долларов за один нож. УО «БГАТУ» в кооперации с Физико-техническим институтом НАН Беларуси разработали технологию изготовления таких ножей с применением метода лазерного модифицирования (рис. 5.93).



Рис. 5.93. Ножи к кормоуборочному комбайну КВК-800

Опытная партия ножей передана для проведения полевых испытаний. По оценке специалистов, их стоимость может быть почти в 2 раза ниже.



## 5.7. Применение плазменных технологий

### 5.7.1. Плазменная закалка

Необходимым условием прогресса промышленного производства, дальнейшего роста ВВП, выполнения программы импортозамещения является совершенствование технологических процессов поверхностной обработки материалов. Поэтому трудно переоценить значение разработки новых способов модифицирования поверхности стали и сплавов с использованием в качестве теплового источника концентрированных потоков энергии лазерного излучения и плазменного факела.

Общим для этих методов является подвод тепловой энергии в заданную точку поверхности, последовательный нагрев соседних точек в результате относительного перемещения теплового пучка, скоростное охлаждение нагретого слоя за счет теплоотвода во внутренние слои заготовки или детали. Такой способ нагрева и охлаждения позволяет изменять структуру и свойства поверхностных слоев только в заданных участках детали, то есть в результате его проведения высокая твердость поверхностных слоев сочетается с высокой вязкостью внутренних объемов, что позволяет упрочнять и восстанавливать изношенные поверхности и увеличивать сроки эксплуатации деталей машин и механизмов в 2 раза и более.

Плазменная струя в качестве теплового источника обладает преимуществами перед инфракрасными лазерами, прежде всего, по причинам экономическим. Кроме того, здесь не требуется сложной оптико-механической системы транспортировки лазерного луча. В то же время мощность дуги, создаваемая плазменным факелом, может достигать 4–6 кВт, то есть близка к аналогичной характеристике при лазерной обработке. Скоростной плазменный нагрев поверхности позволяет получать те же эффекты модифицирования структуры и свойств материала, что и лазерный нагрев.

*Плазменное упрочнение стали 65Г.* В ФТИ НАН Беларуси были проведены исследования по изучению возможности упрочнения стали 65Г методом плазменного воздействия с применением технологического комплекса, состоящего из модернизированной промышленной плазменной установки «Киев-4М» [26–28], автоматизированного координатного стола, обеспечивающего транспортировку плазматрона относительно обрабатываемой поверхности, и системы управления технологическими процессами на базе современного контроллера типа LSMC-3.

Исследования проводились на образцах из указанной стали толщиной 8 мм. Изучали микроструктуру, глубину, распределение твердости по сечению шлифов, качество упрочненных поверхностей. Измерение твердости проводилось на приборе ПМТ-3, микроструктуру исследовали на микроскопе «Ncorpho» на шлифах в поперечном сечении образцов в центральной части упрочненной дорожки.

С целью оптимизации параметров плазменного термического упрочнения изучалось влияние следующих параметров: мощности плазменной дуги, расстояния между срезом сопла плазматрона и обрабатываемой поверхностью, скорости движения плазматрона, расхода плазмообразующего газа (аргона), расстояния между упрочняемыми дорожками. Например, скорость перемещения плазматрона составляла 30–50 мм/с, расход плазмообразующего газа варьировался в пределах 4,0–7,0 л/мин, расстояние до обрабатываемой поверхности составляло ~ 10 мм, уровень тока плазменной дуги составлял 80–100 А при напряжении 38 В.

Изменения микроструктуры стали 65Г в исходном состоянии, подвергнутой плазменной обработке, приведено на рис. 5.94. По глубине упрочнения отчетливо наблюдается образование нескольких структурных зон различной микротвердости. На поверхности находится зона расплавления, состав которой соответствует составу стали (0,65 % С). При быстром охлаждении происходит ее кристаллизация в игольчатый мартенсит с дисперсностью игл 5–15 мкм. За ней следует зона перекристаллизованного в твердом состоянии аустенита в мартенсит. В микроструктуре этих слоев наблюдается присутствие остаточного аустенита, количество которого колеблется от 20 % и зависит от глубины закаленного слоя. Далее следует слой троостита, где твердость снижается и зависит от объемного содержания присутствующих фаз, затем в структуре появляется сорбит. Область расположения появляющегося сорбита определяется центральными участками бывших аустенитных зерен, характеризуется меньшей дисперсностью ферритных и цементитных составляющих в них по сравнению с трооститом и обладает меньшей твердостью. Твердость в этой области также зависит от объемного количества присутствующих фаз. Далее, по мере углубления внутрь образца, на стыке границ бывших аустенитных зерен появляется феррит, и его количество постепенно возрастает. Структура остается феррито-сорбитной и затем плавно переходит в феррито-перлитную. Суммарная твердость снижается до исходной. Исходная структура представляет собой смесь ферритных и перлитных зерен с объемной долей каждой фазы ~ 50×50 %.

Зависимость глубины упрочнения и твердости стали 65Г от скорости перемещения плазмотрона и расстояния между упрочняемыми дорожками

Скорость перемещения, мм/с	Глубина упрочненной зоны, мм	Ширина дорожки, мм	Твердость, МПа
37	0,80	4,8	9500
43	0,75	4,5	9200
46	0,60	2,5	9100
50	0,50	1,5	8000

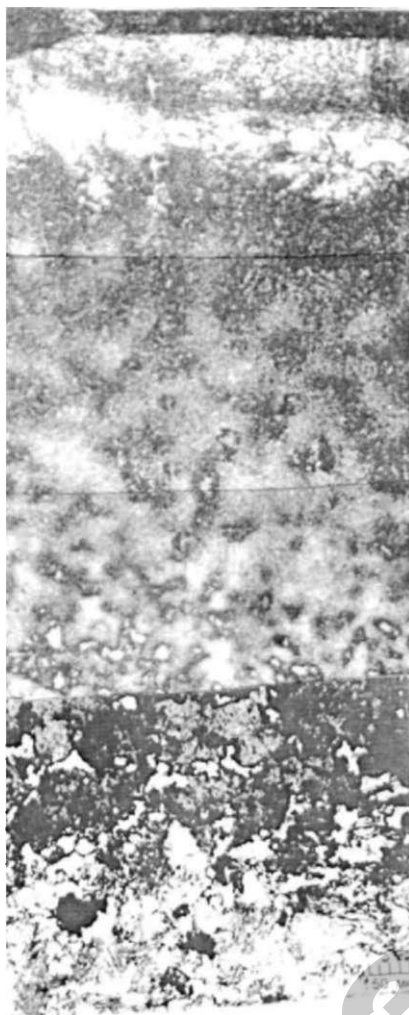


Рис. 5.94. Изменение микроструктуры стали 65Г по глубине после плазменной обработки

Характер распределения твердости, глубина и ширина упрочненных плазмой образцов получены для 4 скоростей: 37; 43; 46; 50 мм/с при постоянных значениях других параметров и приведены в табл. 5.14 и на рис. 5.95. Данные получены для образцов сталей, предварительно подвергнутых объемной закалке и отпуску по рекомендованным режимам.

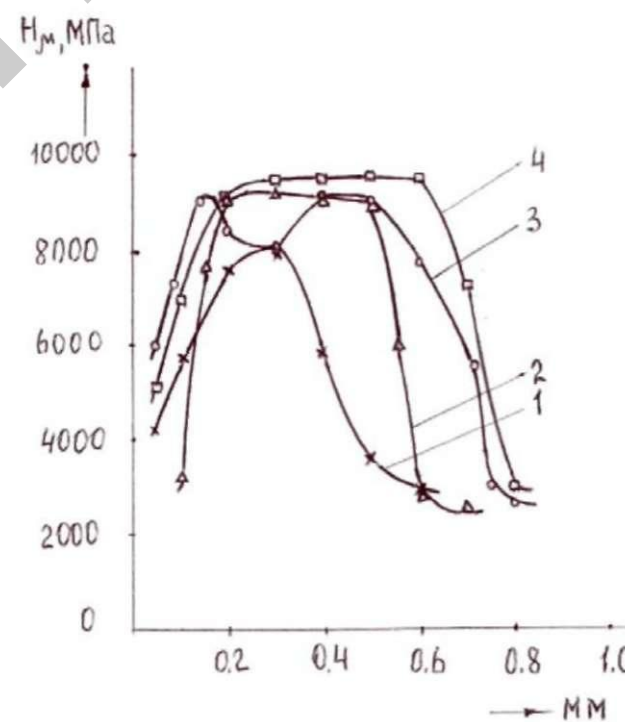


Рис. 5.95. Зависимость глубины упрочнения и твердости стали 65Г от скорости перемещения плазмотрона (мм/с): 1 – 50; 2 – 46; 3 – 43; 4 – 37

Влияние расхода плазмообразующего газа на глубину упрочнения, твердость упрочненной зоны исследованы для 7 режимов работы плазматрона также на образцах, предварительно подвергнутых аналогичной обработке (объемная закалка + отпуск). Режимы работы и полученные результаты глубины упрочненной зоны и твердости приведены в табл. 5.15.

Таблица 5.15

*Глубина и твердость упрочненных зон стали 65Г при различных режимах обработки поверхности*

Режим	Расход Ar, л/мин	Глубина упрочненной зоны, мм	Твердость, МПа	Линейная скорость, мм/с	Расстояние между дорожками, мм
1	7	0,60–0,65	11 500	50	5
2	5	0,72–0,75	11 000	50	3
3	5	0,75–0,78	10 500	50	4
4	5	0,80–0,85	9600	40	4
5	5	1,50–1,52	12 100	35	4
6	5	1,50–1,52	11 100	35	4
7	4,7	0,70–0,80	9000	50	4

Как следует из экспериментальных данных, наибольшая глубина закаленной зоны для стали 65Г имела место при режимах 5, 6 и составляла 1,5 мм. Указанные режимы могут быть использованы для упрочнения рабочих поверхностей деталей с.-х. машин из стали 65Г методом плазменного термического упрочнения, при этом достигаемая твердость значительно превышает твердость, получаемую объемной закалкой. Данные проведенных экспериментов с образцами из стали 65Г использовались при упрочнении рабочих поверхностей деталей с.-х. машин, в частности для плазменной закалки лемехов-копачей свеклоуборочного комбайна КСН-6, дисков борон, сеялок, оборотных и стрелчатых лап и др.

Влияние исходного структурного состояния на упрочнение стали 30ХГСА плазменной струей было исследовано перед плазменной обработкой на эффект упрочнения, глубину получаемых слоев, твердость и износостойкость обработанных изделий [29]. Образцы из стали в различном исходном состоянии (сыром, закаленном и закаленном с отпуском) были подвержены плазменному упрочнению по двум режимам.

Один режим средний, другой – более интенсивный. Оценивали также влияние толщины подложки. Для этого аналогичной упрочняющей обработке подвергали образцы разной толщины (10 и 3 мм). Для исследований был взят пруток Ø40 мм. В исходном состоянии твердость образцов составляла 17–20 HRC.

Часть образцов подвергли объемной закалке в печи сопротивления (нагрев до 860 °С с последующим охлаждением в воде). При этом их твердость составила 50–51 HRC; половина закаленных образцов была отпущена при температуре 250 °С в течение одного часа с последующим быстрым охлаждением в воде, и получена твердость порядка 40–45 HRC. Образцы обработаны плазмой по 2 режимам.

Параметры первого режима:

- ток – 80 А,
- линейная скорость движения плазматрона – 1000 мм/мин,
- расход плазмообразующего газа Ar – 5 л/мин.

Параметры второго режима обработки аналогичны, различие в линейной скорости перемещения плазматрона. В этом режиме она была 900 мм/мин.

Влияние толщины образцов оценивали, сравнивая данные обработки образцов толщиной 10 и 3 мм.

Структура стали в исходном сыром состоянии – феррито-перлитная, после объемной закалки – мартенситная, объемной закалки и отпуска – отпущенный мартенсит. В обоих случаях в мартенсите присутствует некоторое количество остаточного аустенита. В отпущенном состоянии его количество немного меньше.

После плазменной обработки образцов всех состояний структура слоистая. На поверхности видна зона фазовой перекристаллизации, в которой находится более мелкодисперсный мартенсит с остаточным аустенитом, далее следует зона отпуска с постепенным переходом структурных составляющих к исходной структуре.

Характер упрочнения и распределение твердости по глубине образцов толщиной 10 мм из стали 30ХГСА приведены на графике (рис. 5.96).

Видно, что на поверхности образцов для всех состояний стали наблюдается интенсивное увеличение твердости (примерно до глубины 0,2 мм). Далее наблюдаются достаточно равномерный характер изменения твердости со значениями, более низкими для среднего режима плазменного воздействия, и интенсивное снижение твердости на границе перекристаллизованной зоны и зоны, нагретой ниже температуры  $A_{c1}$  и подвергнутой отпуску. Видно также, что наибольшее упрочнение испытывают образцы в состоянии закалка + отпуск. В них выше твердость, но меньше глубина упрочненной зоны.

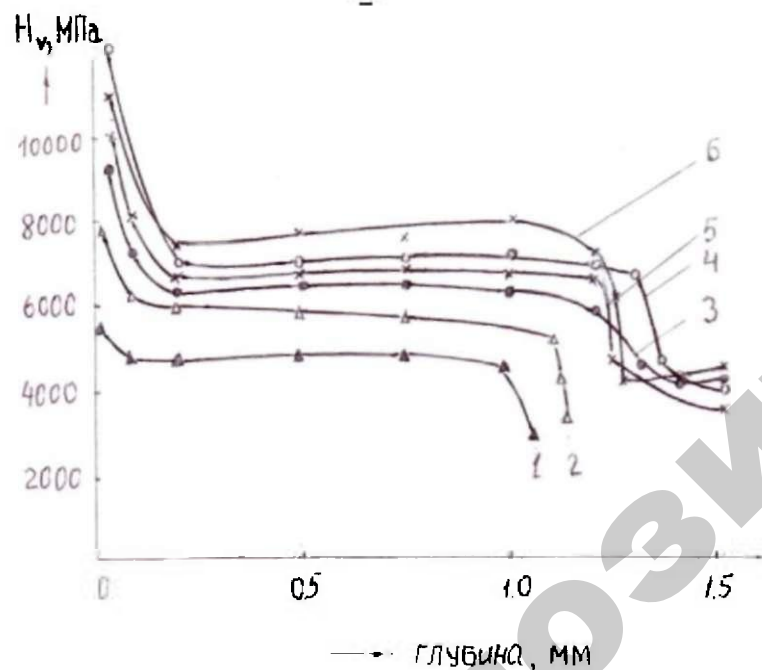


Рис. 5.96. Распределение твердости по глубине образцов толщиной 10 мм из стали 30ХГСА:  
1, 2 – исходное состояние; 3, 4 – закаленное состояние; 5, 6 – отпущенное состояние; (1, 3, 5 – режим I; 2, 4, 6 – режим II)

На рис. 5.97 приведены сравнительные данные распределения твердости по глубине образцов разной толщины (10 и 3 мм) в закаленном и закаленном с отпуском состояниях после плазменной обработки. Из приведенных данных видно, что для обоих исходных состояний значения твердости для массивных образцов выше, но у них меньше глубина упрочнения, что объясняется прогревом тонких образцов на большую глубину и последующим большим снижением твердости перекристаллизованного мартенсита вследствие отпуска.

При плазменном упрочнении стали в поверхностных слоях образцов всех состояний образуется перекристаллизованный мартенсит. Особенности упрочнения сплавов при быстрых нагревах связаны с тем, что  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ , превращения в них протекают в неравновесных условиях в отличие от традиционных методов термического упрочнения, использующих медленный нагрев либо изотермическую выдержку для достижения температуры закалки [30, 31].

При быстром нагреве отсутствует выдержка, необходимая для протекания  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, растворения карбидов с последующим перераспределением углерода и легирующих элементов. Образуемый аустенит имеет различную концентрацию растворенных атомов углерода и легирующих элементов в отличие от равномерного (гомогенного) распределения, как это имеет место при медленном печном нагреве.

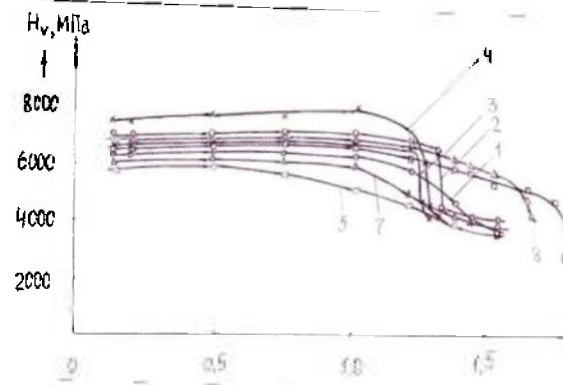


Рис. 5.97. Распределение твердости по глубине образцов разной толщины из стали 30ХГСА после плазменной обработки:  
1, 2 – закаленное состояние, образец массивный; 3, 4 – отпущенное состояние, образец массивный; 5, 6 – закаленное состояние, образец тонкий; 7, 8 – отпущенное состояние, образец тонкий; (1, 3, 5, 7 – режим I; 2, 4, 6, 8 – режим II)

Увеличение скорости нагрева приводит к смещению процесса начала образования аустенита в область высоких температур и, как следствие, уменьшению концентрации углерода, необходимой для устойчивости образования зародыша аустенита; скорость зарождения резко увеличивается, что ограничивает рост зерен и приводит к измельчению аустенитного зерна к моменту окончания  $\alpha \rightarrow \gamma$  фазового превращения [32, 33].

Плазменный нагрев обеспечивает высокую плотность потока энергии на поверхности и скорость нагрева  $\sim 10^2 - 10^4$  °C/с, что позволяет в большей степени наследовать дефекты исходной структуры по сравнению с печным или индукционным. При равных условиях нагрева перед началом перекристаллизации в образцах с исходной структурой перлит + феррит аустенит менее однороден по составу, чем в образцах с состоянием предварительно закаленном и отпущенном.

Зарождение и скорость роста аустенитных зерен при нагреве в таких образцах будут значительно отличаться; отличаются также процессы наследования дефектов кристаллической структуры. От величины зерна аустенита, количества наследованных дефектов строения, степени и равномерности пересыщения твердого раствора, стабильности структурных составляющих будут зависеть искажения кристаллической решетки, дисперсность и уровень возникающих напряжений в перекристаллизованном слое мартенсита.

Поскольку все эти параметры в выбранных состояниях образцов отличаются, различным будет и уровень упрочнения образцов.

В образцах с исходной перлитно-ферритной структурой быстрый нагрев приводит к тому, что в них будут образовываться области аустенита с различной степенью легированности. В областях, образованных на месте зерен феррита, концентрация легирующих элементов и углерода будет ниже, чем в участках, где располагались перлитные колонии. Релаксационные процессы в этих областях будут осуществляться по разным механизмам. В областях с большей степенью легированности преобладающим механизмом уменьшения внутренних напряжений будет зарождение и рост рекристаллизованных зерен, что вызовет измельчение ферритных зерен при  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращении и будет способствовать образованию более мелких зерен аустенита; при охлаждении их образуется более мелкодисперсный мартенсит.

Области с меньшим содержанием углерода и легирующих элементов испытают  $\alpha \rightarrow \gamma$  и обратное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение в мартенсит

преимущественно бездиффузионным путем. Естественно, уровень искажения кристаллической решетки мартенсита, возникающие напряжения в этих областях будут ниже, меньше будет и общее упрочнение.

Изменение микроструктуры образцов стали 30ХГСА с исходным состоянием перлит + феррит при плазменном упрочнении без оплавления поверхности можно проследить на образцах (рис. 5.98).

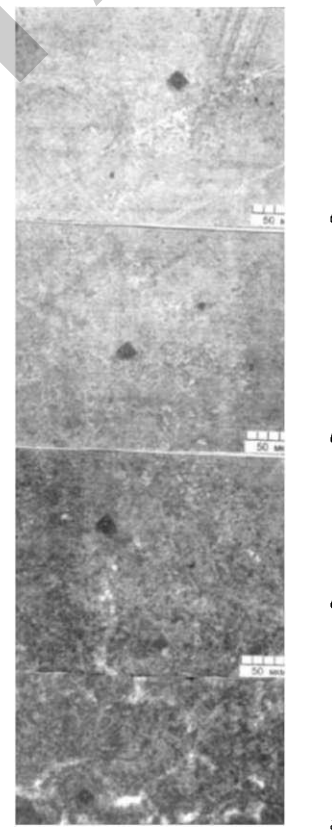


Рис. 5.98. Изменение микроструктуры стали 30ХГСА при плазменном упрочнении ( $\times 400$ )

На поверхности структура представляет собой мартенсит мелкодисперсной морфологии, образованный при перекристаллизации аустенита с различной степенью пересыщения легирующими эле-

ментами и углерода с некоторым содержанием аустенита остаточного. Области аустенита, где располагались ферритные зерна при быстром нагреве перед  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращением, содержали меньшее количество легирующих элементов и углерода, и образованный перскристаллизованный мартенсит в них также имел более низкое их содержание; в нем ниже искажения кристаллической решетки по сравнению с областями аустенита, образованными на местах, где располагались перлитные колонии (рис. 5.98, а, б).

В структуре появляется троостит (более темнотравящаяся составляющая). Его количество возрастает по мере углубления, структура становится мартенсито-трооститной, затем она становится мартенсито-троосто-сорбитной (рис. 5.98, в).

Еще ниже, на стыках бывших аустенитных зерен и границах, появляется светлая составляющая – феррит (рис. 5.98, г). Количество феррита также возрастает по мере углубления с постепенным уменьшением количества мартенсита и переходом к исходной перлитно-ферритной структуре. Твердость в областях следует за изменением микроструктуры. Ее величина определяется количественным объемным соотношением присутствующих фаз.

В исходных образцах с закаленной структурой предварительная закалка с печного нагрева уже привела к образованию сильно напряженного и искаженного мартенсита с высокой плотностью дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций и др.), а в образцах с исходной структурой он обладает большей стабильностью по сравнению с мартенситом закалки, так как известно, что при отпуске мартенсита происходит уменьшение внутренних напряжений путем частичного их снятия и перераспределения дефектов кристаллического строения (переползания и скольжения дислокаций, выстраивания их в стенки с образованием полигональных структур, дробления блоков мозаики и др.) [31].

При быстром плазменном нагреве этих образцов (при одинаковых скоростях нагрева) наблюдается бездиффузионный механизм  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, и в исходных образцах с мартенситной структурой образуется аустенит более гомогенного состава, чем в образцах с перлитно-ферритной структурой.

Заместного перераспределения концентрации легирующих элементов и углерода в них также не успевает произойти, при этом аустенит наследует дефекты кристаллического строения, сформированные предшествующей объемной печной закалкой и закалкой с отпуском в образцах с отпущенным мартенситом. Быстрый плаз-

менный нагрев этих образцов сдвигает начало бездиффузионного  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения в них также в сторону более высоких температур, но для образцов с исходной структурой мартенсита закалки она будет ниже, чем для образцов более стабильного состояния закалка + отпуск; обратное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение осуществляется также бездиффузионным путем. В результате этого искаженность кристаллической решетки, возникающие напряжения и уровень дефектности перскристаллизованного мартенсита для исходного состояния закалка + отпуск будут выше, больше будет и интенсивность их упрочнения по сравнению с образцами с исходным закаленным состоянием.

На образцах малой толщины (3 мм), как закаленном, так и отпущенном, после плазменной обработки наблюдается меньшее упрочнение перскристаллизованного слоя. Значения твердости в них ниже, чем у более массивных, так как тонкие образцы прогреваются быстрее и на большую глубину, то есть при одинаковых условиях обработки на тонких образцах наблюдается дополнительное снижение твердости из-за протекания в большей мере отпускных явлений вследствие большего прогрева образцов во время обработки при формировании смежных упрочняющих дорожек.

Более интенсивное упрочнение образцов на поверхности ~ 0,2 мм можно объяснить растворением газов и искажениями кристаллической решетки, которые усиливаются неравновесным поглощением и активностью газовой плазменной струи, что также подтверждается резким снижением значений твердости после проведения дополнительного отпуска после плазменного воздействия. Таким образом, на основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

– для получения максимально возможного упрочнения необходимо осуществить предварительную термическую обработку, которая обеспечила бы мелкое зерно аустенита к началу  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения с более стабильным структурным состоянием исходной фазы в сочетании с многочисленными источниками дефектов и других несовершенств кристаллического строения (вакансий, благоприятной блочной структурой, высокой плотностью дислокаций и т. д.).

– закономерности процесса структурообразования при закалке после воздействия концентрированных потоков энергии подчиняются общим законам структурообразования, описываемым диаграммой состояния железо–углерод.

– глубина упрочненных структурных зон при плазменном воздействии зависит от параметров нагрева и определяется механизмами и кинетикой фазовых переходов в неравновесных состояниях;

– меняя параметры нагрева (время выдержки, скорость нагрева), можно управлять степенью гомогенности и размером зерен аустенита к моменту начала  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, а меняя параметры охлаждения, – управлять дисперсностью мартенсита при обратном  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении, следовательно, и свойствами.

### 5.7.2. Плазменная наплавка

Плазменная наплавка является одним из эффективных способов, позволяющих наносить металл разных химсостава и толщины, и выполняется с помощью плазмотронов. В плазмотроне вначале зажигается так называемая дежурная дуга, которая горит между вольфрамовым электродом и медным водоохлаждаемым соплом в газовой среде. В качестве плазмообразующих газов чаще всего применяется аргон или азот. Дежурная дуга выдувается из канала сопла в виде газового пламени. Для зажигания основной плазменной дуги прямого действия газовым пламенем дежурной дуги касаются основного металла. Происходит перенос дуги с сопла на основной металл. Температура внутри столба дуги при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона достигает 20 000 °С и более.

Для осуществления процесса наплавки электродную проволоку подают в зону плазменной дуги, металл электрода плавится и переносится на деталь. В качестве наплавляемого материала могут использоваться не только порошки металлов, но и неметаллов. Это позволяет наносить на подложку керамические материалы. К достоинствам плазменной наплавки относятся возможность регулирования температуры нагрева металла, высокая производительность процесса, высокое качество наплавленного металла.

С целью повышения долговечности такого рода деталей для с.-х. машин, улучшения качества обработки почвы в ряде организаций, в частности, в НТК «ИЭС им. Е.О. Патона», ОАО «ВИСХОМ», в течение последних лет выполнены исследования по выявлению оптимальных параметров, способствующих повышению износостойкости, выполнению агротехнических требований и улучшению биологических свойств почвы. Отмечено, что самозатачивание лезвия возможно осуществить расположением износостойкого слоя на наружной стороне, например, диска бороны. При этом используется взаимодействие тяговой и поперечной составляющих реакции почвы на относительно менее износостойкий материал основы.

В частности, в НТК «ИЭС им. Е.О. Патона» создана установка УА-130 и разработана технология наплавки режущих кромок дисковых ножей культиваторов. В качестве метода наплавки использовалась дуговая наплавка электродной самозащитной проволокой ПП-АН-192  $\varnothing 2,2-2,6$  мм, толщина наплавленного слоя металла системы Fe-Cr-Ni с твердостью 54–63 HRC составляла 2,5–3,0 мм. Номинальный сварочный ток составлял ~ 400 А. В ОАО «ВИСХОМ» на кромки дисков бороны проводилась плазменная наплавка толщиной 1,5–1,6 мм износостойких твердых сплавов типа ПГ-ФБХ-6-2, ПР-ФБЮ-1-4. Ток наплавки составлял 160–180 А, напряжение – 35–50 В.

Несмотря на то, что и в том и в другом случае отмечается эффект повышения износостойкости дисков культиваторов, можно предположить о невысокой эффективности примененных методов к деталям такого рода. Во-первых, речь идет о тонких режущих кромках дисков, а наплавляются достаточно толстые для этих условий слои. Это приводит к расплавлению таких кромок и изменению их поперечных геометрических размеров вследствие наплавки, что будет отражаться на энергозатратах при обработке почвы. Во-вторых, значительный нагрев деталей при использовании указанных методов наплавки (токи 160–400 А) будет приводить к значительному отпуску материала основы. Это, в свою очередь, не будет являться оптимальным, с точки зрения износостойкости детали в целом, а предложенная технология – с точки зрения экономической эффективности.

В этой связи для деталей с достаточно тонкими рабочими кромками (0,5 мм и тоньше) предлагается не наращивать дополнительно износостойкий слой, а проводить упрочнение материала вглубь, в крайнем случае, осуществлять дополнительное модифицирование поверхностного слоя небольшой толщины (200–300 мкм). Для этого предлагается использовать более «щадящие» энергетические режимы лазерного, плазменного или комбинированного воздействия. Кроме того, при выполнении операций такой обработки предлагается осуществлять интенсивное водяное охлаждение обратной стороны детали. Так как геометрические размеры рабочих зон деталей практически изменяться не будут, то не нужна будет их последующая механическая обработка.

*Рекомендации по плазменной обработке быстроизнашивающихся деталей рабочих органов сельхозмашин. Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что для деталей типа стрельчатых*

лап и дисков борон целью упрочнения является не только повышение износостойкости рабочей поверхности, но и создание условий для самозатачивания режущей кромки. В то же время наконечники анкерных сошников должны обладать в основном высокой износостойкостью. И наконец, рабочие кромки противорежущих брусьев (пластин), помимо высокой износостойкости, должны противостоять значительным ударным нагрузкам, вызываемым попаданием в измельчающий аппарат инородных предметов, в основном, камней. В конечном итоге, все это необходимо принимать во внимание при выборе как метода, схемы и режима упрочнения, так и наплавочного материала, в первую очередь, его свойств и цены.

При высоких скоростях нагрева и охлаждения, характерных для источников энергии с высокой плотностью мощности, сталей со структурой легированного мартенсита и остаточного аустенита, измельчается начальное зерно аустенита, из которого образуется высокодисперсный мартенсит. Образование в структуре быстрозакаленного высокодисперсного мартенсита, в сочетании с повышенным содержанием остаточного аустенита, обеспечивает более высокие твердость и прочность с достаточно высоким уровнем вязкого разрушения.

Эффект упрочнения в значительной степени зависит от содержания углерода в стали, скоростей нагрева и охлаждения, теплопроводности материалов.

При обработке изделий высокоэнергетическими источниками нагрева с оплавлением поверхности и использованием легирования повышается твердость наплавленного слоя и упрочненных зон, возрастает глубина упрочнения, что способствует повышению износостойкости обрабатываемых деталей и гарантирует повышение эксплуатационных свойств обработанных изделий.

Долговечность работы сменных деталей рабочих органов с.-х. машин типа глубокорыхлителей, оборотных и стрельчатых лап, плоских и сферических дисков лушительников, дисков борон, наконечников анкерных сошников, работающих в условиях интенсивного ударно-абразивного износа, определяется комплексным сочетанием свойств, из которых необходимыми определяющими являются высокие износ- и ударная стойкость.

Обычные традиционные методы не позволяют получать необходимый комплекс свойств на традиционных марках сталей, применяемых для изготовления этой номенклатуры деталей (65Г, 40Х и др.).

Для получения необходимого комплекса эксплуатационных характеристик и обеспечения достаточного уровня свойств к использованию предлагаются методы высокоэнергетического воздействия на металл (лазерный, плазменный и комбинированный).

Суть методов заключается в том, что, воздействуя на металл потоками энергии высокой плотности, на обычных недорогих традиционных марках сталей возможно получать слоистое строение, характеризующееся мелкодисперсным структурным состоянием с плавным переходом слоев, когерентно связанных с основой исходного металла.

Упрочненные слои обладают высокой твердостью (60–70 HRC), ударной вязкостью (80–220 Дж/см<sup>2</sup>), сцепляемостью с подложками и трещиностойкостью.

Повышение трещиностойкости обусловлено тем, что увеличивается степень дисперсности мартенсита, а критическое сопротивление хрупкому разрушению обратно пропорционально размеру зерна.

Кроме того, наличие нескольких слоев с различными структурными составляющими изменяет микромеханизм разрушения. Трещины, распространяющиеся из твердого и более хрупкого закаленного слоя, тормозятся при переходе в относительно мягкий и пластичный слой отпуска. Все это способствует повышению эксплуатационных характеристик упрочненных таким образом изделий.

Выполненные исследования показали, что степень упрочнения, глубина упрочненных слоев, распределение твердости по глубине и ширине зоны воздействия существенно зависят от методов обработки, технологических режимов, исходного состояния и особенностей фазовых и структурных превращений в сталях различного состава.

Для каждой стали существуют оптимальные режимы обработки высокоэнергетическими воздействиями и оптимальные исходные состояния металлоизделий, предшествующие поверхностному упрочнению.

Исследование влияние параметров плазменной обработки на размеры зоны упрочнения – глубину и ширину на образцах из различных сталей (60ПП, 65Г) и чугуна показали следующее (в порядке значимости при постоянном диаметре сопла):

- ток дуги;
- расход плазмообразующего газа;



- расстояние между соплом плазмотрона и изделием;
- скорость сканирования.

При этом установлено, что влияние тока дуги на размеры зоны плазменного воздействия почти на порядок сильнее влияния других параметров плазменной обработки. Следовательно, ток дуги может служить основным регулирующим параметром процесса плазменной обработки. Глубина зоны упрочнения является более чувствительной характеристикой по сравнению с шириной этой зоны примерно в 2 раза.

Параметры, по которым осуществляется выбор оптимальных режимов, располагаются в следующем порядке:

- глубина зоны упрочнения;
- ширина зоны упрочнения;
- скорость линейного перемещения, определяющая производительность процесса обработки;
- погонная энергия дуги, в значительной степени определяющая термические деформации изделия;
- скорость охлаждения зоны обработки, влияющая на структуру закаленной зоны.

В экспериментах была использована технология плазменной обработки (закалки, наплавки) дугой прямого действия с глубоким оплавлением обрабатываемой поверхности. Это позволило получить глубокие упрочненные слои за счет сварочного (наплавленного) валика при глубине оплавления до 1,5 мм и слоя закалки в твердом состоянии. Диски борон с самого края рабочей части обрабатывались с незначительным оплавлением поверхности, что было связано с малой толщиной материала на вершине клина. Технологически это достигалось за счет достаточно большой линейной скорости перемещения поверхности детали относительно неподвижного плазмотрона.

Для упрочнения стрельчатых лап (рис. 5.99), изготавливаемых из стали 65Г, и наконечников анкерных сошников (рис. 5.100), изготавливаемых из серого чугуна, рекомендовано комплексное упрочнение.



Рис. 5.99. Стрельчатая лапа с упрочненной рабочей частью



Рис. 5.100. Наконечник анкерного сошника с упрочненной рабочей частью

В этом случае перспективно сочетание плазменной или аргонодуговой наплавки износостойкого сплава на торцы изделий для получения глубоких упрочняющих кромок (5,0–5,5 мм) с твердостью 60–62 HRC и последующей плазменной обработки с оплавлением поверхности с получением суммарных упрочненных слоев глубиной до 2–3 мм с твердостью 62–70 HRC.

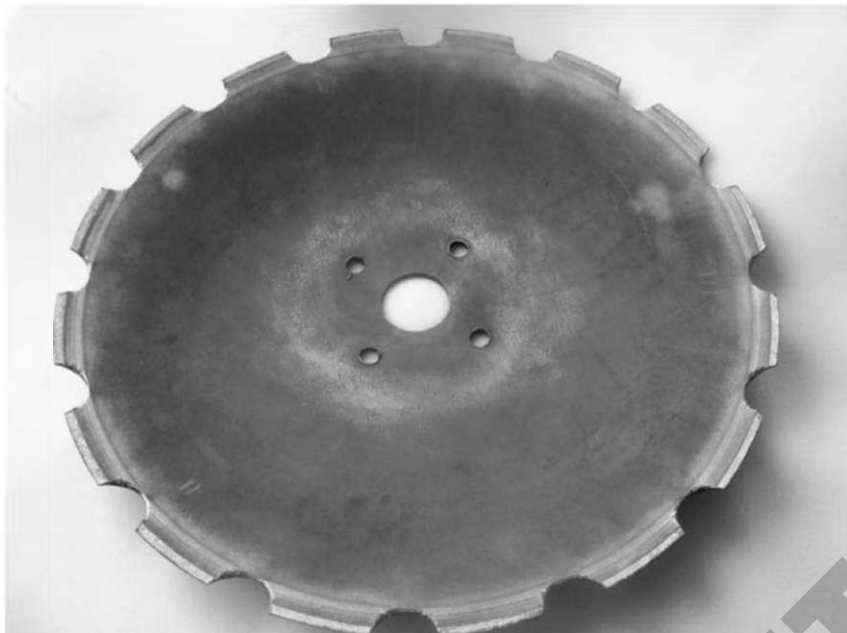


Рис. 5.101. Диск лущильника с комбинированным упрочнением рабочей части

Для упрочнения дисков лущильников и борон, изготавливаемых из стали 65Г, может быть рекомендована также лазерная обработка режущей части по периферии и последующая плазменная обработка с получением упрочненных слоев с твердостью 60–65 HRC (рис. 5.101).

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Одинг И.А. Известия АН СССР. ОТН, № 12, 1948 г.
2. Котрелл А. Х. Дислокации и пластические течения в кристаллах. М. : Металлургиздат, 1958.

3. Бетенья Г. Ф. Восстановление и упрочнение почворезущих элементов диффузионным намораживанием износостойкими сплавами. Минск : БГАТУ, 2003.

4. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки. М. : Машиностроение, 1976.

5. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963.

6. Баландин Г.Ф., Васильев В. А. Физико-химические основы литейного производства. М. : Машиностроение, 1971.

7. Бетенья Г. Ф. [и др.]. Способ получения биметаллических изделий намораживанием на заготовку. А.С. СССР, № 1416266. Бюлл. изобретений. 1988, № 30.

8. Бетенья Г. Ф. Восстановление и упрочнение почворезущих элементов диффузионным намораживанием износостойкими сплавами. Минск : БГАТУ, 2003.

9. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства. М.-Свердловск, 1954.

10. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. М. : Машиностроение, 1979.

11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высшая школа, 1967.

12. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1959.

13. Бетенья Г. Ф. Прочность сцепления наплавленного металла методом намораживания с основой. Улучшение эксплуатационных качеств тракторов и сельхозмашин : сб. науч. трудов, вып. 37. Горки, 1978.

14. Бетенья Г. Ф. Способ получения биметаллических изделий намораживанием. А.С. СССР, № 1282957. Бюлл. изобретений. 1987, № 2.

15. Бетенья Г. Ф. [и др.]. Рекомендации по упрочнению и восстановлению почворезущих элементов наплавкой намораживанием. М., 1991.

16. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности сельскохозяйственных машин (эксперименты, практика, рекомендации). М. : ЦОПКБ ВИМ, 1993.

17. С. Prakash and R. Voller. On the numerical solution of continuum mixture model equation describing binary solid-liquid phase change [J]. Numer. Heat Transfer, Part B, 1989.

18. Астапчик С. А., Голубев В. С., Маклаков А. Г. Лазерные технологии : возможности и перспективы обработки деталей и инструмента. 2004, № 2 // Тяжелое машиностроение.

19. Астапчик С. А. [и др.]. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. Минск : Белорусская наука, 2008.

20. Астапчик С. А., Голубев В. С., Маклаков А. Г. Лазерные макротехнологии и оборудование, разработанные в ФТИ НАН Беларуси : сб. трудов XV науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века». Севастополь, 2008.

21. Машиностроение : энциклопедия. М. : Машиностроение, 2002. Т. IV–16.

22. Гуринович В. И. [и др.]. Применение стали 60ПП в качестве материала для изготовления ножей сельскохозяйственных кормоуборочных машин : сб. IV Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 19–21 октября 2009.

23. Гуринович В. И. [и др.]. Структура и свойства стали пониженной прокаливаемости 60ПП, подвергнутой воздействию высококонцентрированных источников : матер. Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 15–17 сентября 2010.

24. Шепеляковский К. З. Конструкционные стали пониженной прокаливаемости. 1960, № 12 // МиТОМ.

25. Бетсия Г. Ф. [и др.]. Ресурсо- и энергосберегающие технологии и материалы для изготовления и упрочнения деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин : сб. докл. Межд. науч.-практ. конф. «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК». Минск, 2009.

26. Голубев В. С. [и др.]. Применение модернизированной плазменной установки «Киев-4М» для упрочнения стальных поверхностей : сб. трудов МНТК. СПб., 2008.

27. Голубев В. С. [и др.]. Поверхностное упрочнение стальных поверхностей на модернизированной установке плазменной резки «Киев-4М» : сб. матер. III Междун. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 2008.

28. Гуринович В. И. [и др.]. Поверхностное термическое упрочнение стали 65Г методом плазменного воздействия : сб. IV Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 19–21 октября 2009.

29. Гуринович В. И. [и др.]. Влияние исходного структурного состояния на упрочнение стали 30ХГСА плазменной струей : матер.

Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 15–17 сентября 2010.

30. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

31. Лещинский Л. К. [и др.]. Структура и свойства наплавленного металла и углеродистых сталей, упрочненных плазменной струей. 1985, № 11 // Сварочное производство.

32. Лещинский Л. К. [и др.]. Плазменное поверхностное упрочнение. Киев : Техника, 1990.

33. Гуляев А. П. Металловедение. М. : Металлургия, 1986.

## РАЗДЕЛ 6

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

#### 6.1. Технологические регламенты изготовления деталей повышенной работоспособности

Технологические регламенты разрабатывались согласно рекомендациям [1, 2]. При этом учитывались методические подходы, изложенные в [3, 4].

Технологические регламенты изготовления ДРОМ основываются на использовании стального проката, производимого металлургическими предприятиями СНГ [5]. Для изготовления ДРОМ 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, наплавка) и лазерные (закалка, модифицирование, наплавка) технологии; технология диффузионного намораживания износостойкими сплавами. Перечисленные технологии являются высокопроизводительными, экологически чистыми и отвечают требованиям по энерго- и ресурсосбережению. Они являются базовыми при изготовлении ДРОМ.

Решение практических вопросов по применению отечественной технологии изготовления ДРОМ нового поколения, направленных на инновационный путь развития современного производства изделий на основе избранных приоритетов, базируется на потенциале сотрудничества научных коллективов с заводами-изготовителями и обеспечивает приоритетные преимущества и конкурентоспособность производимой продукции: качество, высокая производительность труда, экономическая эффективность.

Разработанные технологии производства ДРОМ гарантированно будут в ближайшие 10–15 лет конкурентоспособными и будут обладать коммерческой перспективой.

Разработанные технологии производства конкурентоспособных ДРОМ направлены на радикальное повышение эксплуатационных свойств изделий.

Как показывают результаты исследований на всех этапах разработки (выбор материала, получение заготовок, эксплуатационные испытания, приемочные испытания на объектах аккредитованного центра ГУ «БелМИС», испытания на твердость, вязкость разрушения, изгиб, ударный изгиб, износостойкость [6–8] и др.), обеспечиваются высокие показатели ресурса изделий.

Технологические регламенты изготовления базовых деталей приведены в приложениях 1–3. При оформлении технологических регламентов учитывались требования стандартов ЕСТД. Технологии изготовления нового поколения, использованные при оформлении технологических регламентов, являются экологически чистыми и защищены патентами [9–17].

В качестве примера приводится технологический регламент изготовления лемехов ППН.8.30/50-30П и ППН.8.30/50-30П-01 корпусов плугов. На эти изделия утверждены технические условия ТУ ВУ 100185315.007-2010 [18].

#### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛЕМЕХА ППН.30/50-301 ИЗ КРУГА Ø53 Н12 ГОСТ 2590-83 СТАЛЬ 60ПП ТУ 14-1-1926-76 РФ**

##### 1. Общие требования

1.1. Из каждой партии поставки профилированного проката круга отрезать два (три) образца длиной 12–14 мм. Заклеймить образцы и прокат круга одним порядковым номером. В заводской лаборатории провести анализ микро- и макроструктуры, химического состава металла, термообработать (закалка + низкий отпуск) образцы. Получить разрешение на выдачу профилированного проката круга в заготовительный цех.

1.2. Число операций и порядок обработки тех или иных поверхностей, отверстий и других конструктивных элементов, входящих в черновые и чистовые операции, число и порядок слесарных операций по зачистке заусенцев, очистке поверхности от окалины и притуплению острых кромок не регламентируется и устанавливается из условия обеспечения безопасности работ, а также для улучшения условий выполнения последующих операций.

1.3. Величина припуска для операций механической обработки устанавливается с учетом технических требований чертежа. Выполнение последующей операции не должно вызывать деформацию и искажение заготовки, появление дополнительных внутренних напряжений.

1.4. Заготовительную операцию по отрезке заготовок из круга выполнять из расчета минимальных потерь материала.

1.5. Операцию формирования профильной поверхности лемеха производить после нагрева при заданной температуре.

1.6. Операции объемного термического модифицирования (нагрев, закалка, низкий отпуск), связанные с термической обработкой, следует осуществлять в соответствии с технологическими параметрами и их режимами в пределах установленных отклонений.

1.7. Выбор охлаждающей среды, способа ввода заготовки в зону охлаждения проводить согласно рекомендациям, приведенным в описании технологического процесса объемного термического модифицирования.

## 2. Технические требования

2.1. Эскиз лемеха ППН.30/50-301А (рис. 7.1).

2.2. Материал – прокат горячекатаный из стали конструкционной углеродистой с пониженной прокаливаемостью марки 60ПП (ТУ 14-1-1926-76 РФ) (допускается марка стали 40 ПП).

2.3. Термически обрабатывать лемех с охлаждением водяным душем.

2.4. Твердость поверхности должна быть не менее 53–57 HRC в местах испытаний согласно чертежу.

2.5. Лицевая поверхность долота должна быть чистой и гладкой без расслоений и окалины.

2.6. Положение плоских сторон отверстий выполнять согласно чертежу.

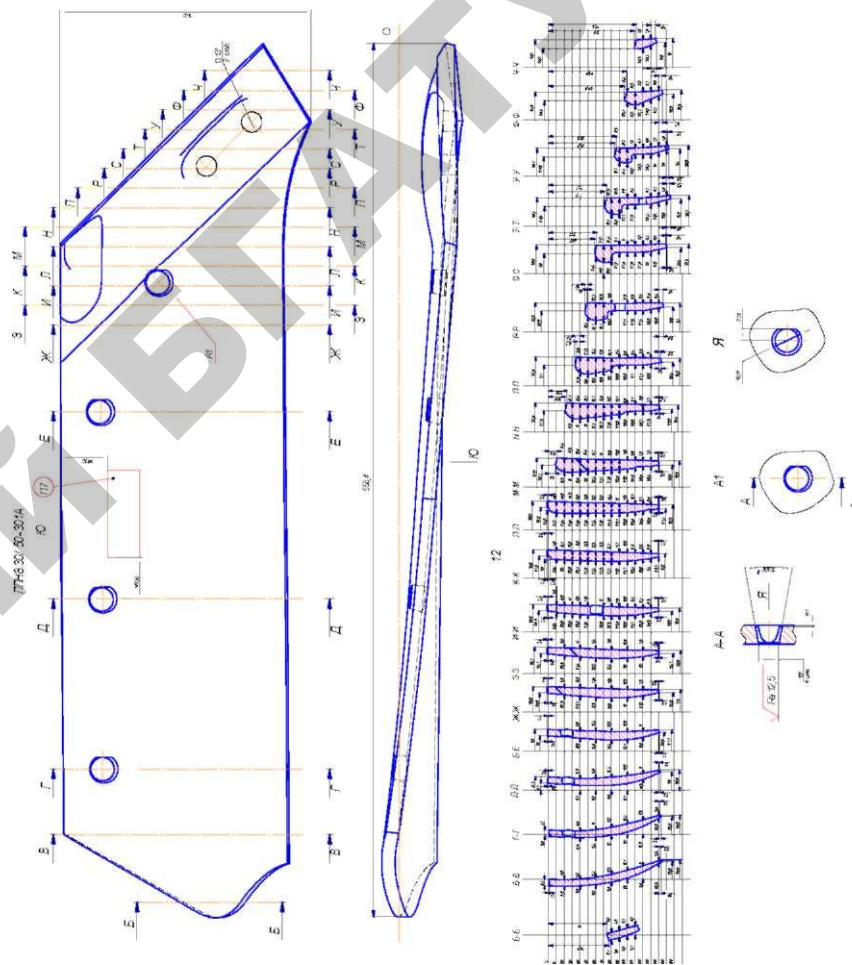


Рис. 6.1. Эскиз лемеха ППН.30/50-301А

## 3. Технологический маршрут изготовления лемеха ППН.30/50-301

3.1. Отрезка образцов-свидетелей.

3.2. Контроль исходного материала.

3.3. Термическая обработка. Выполняется по заключению центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ).

3.4. 005. Транспортная. (По разрешению ЦЗЛ доставить прокат в заготовительное отделение.)

3.5. 010. Отрезная. (На ленточно-отрезном станке порезать прокат длиной 6000 мм Ø53 Н12 на заготовки длиной 130 мм.)

3.6. 015. Термическая. (В индукторе печи индукционного нагрева нагреть заготовку Ø53×130 до температуры пластического деформирования 1473 К.)

3.7. 020. Гибочная. (В штампе для гибки заготовки гидравлического пресса усилием 300 т гнуть заготовку под углом 45° на длине 65 мм.)

3.8. 025. Прессовая. (В штампе многоручьевом на гидравлическом прессе усилием 700 т выполнить горячее пластическое деформирование заготовки для получения поковки.)

3.9. 030. Термическая. (В печи электрической сопротивления с максимальной температурой нагрева – 1573 К нагреть поковку до температуры пластического деформирования – 1473 К.)

3.10. 035. Прессовая. (В штампе многоручьевом на прессе гидравлическом усилием 700 т выполнить формирование отверстий, клеймение и гибку поковки.)

3.11. 040. Термическая. (В печи сопротивления нагреть заготовку до закалочной температуры – 1103 К.)

3.12. 045. Термическая. (В спрейере модуля для термической обработки охладить заготовку водяным душем.)

3.13. 050. Термическая. (В печи электрической сопротивления произвести отпуск деталей при температуре 433–453 К в течение 1–1,5 ч с последующим охлаждением на воздухе.)

3.14. 055. Контрольная. (Измерить твердость поверхности детали в соответствии со схемой измерений чертежа и ТУ на лемех.)

3.15. 060. Транспортная. (Доставить детали на дробеструйную обработку.)

3.16. 065. Дробеструйная. (Очистить детали от окалины и других загрязнений на дробеструйной установке.)

3.16. 070. Транспортная. (Доставить детали в окрасочное отделение.)

3.17. 075. Окрасочная. (Красить детали согласно техническим условиям и чертежу на лемех.)

3.18. 080. Упаковочная. (Упаковать детали согласно техническим условиям на лемех.)

3.19. 085. Транспортная. (Доставить упакованные детали на склад готовой продукции.)

#### 4. Технические условия проведения регламентируемых операций изготовления долота ППН.30/50-301

4.1. 015. Термическая. В индукторе печи индукционного нагрева нагреть заготовку Ø53×130 до температуры пластического деформирования 1473 К. (Допускается нагрев заготовки в печи электрической СНО-4-8-2.5/6ИЗ с карборундовыми нагревателями, обеспечивающими температуру нагрева металла до 1573 К.)

4.2. 020. Гибочная. В штампе для гибки заготовки гидравлического пресса ПГ-300 гнуть заготовку под углом 45° на длине 65 мм. (Допускается использование кривошипного пресса того же усилия.)

4.3. 025. Прессовая. В штампе многоручьевом на гидравлическом прессе ПГ-700 выполнить горячее пластическое деформирование заготовки для получения поковки. Первый ручей штампа – вытяжка проката в плоскую заготовку. Вторым ручей – формирование скосов под углом 20° на двух торцах с внутренней стороны заготовки; третьим ручей – обсечка контура с устранением облоя и образованием уступа согласно чертежу. То же для изготовления поковки в зеркальном изображении (по чертежу ППН.8.30/50-301-001).

4.4. 030. Термическая. В печи электрической сопротивления СНО-4-8-2.5/6ИЗ с максимальной температурой нагрева – 1573 К нагреть поковку до температуры пластического деформирования – 1473 К.

4.5. 035. Прессовая. В штампе многоручьевом на прессе гидравлическом ПГ-700 выполнить формирование отверстий, клеймение и гибку поковки. Первый ручей штампа – пробивка отверстий Ø16 мм; вторым ручей – высадка конуса под углом 15° Ø18,5 в четырех отверстиях Ø16 мм и клеймение согласно требованиям чертежа и техническим условиям; третьим ручей – гибка лемеха по профилю сечений согласно чертежу. Контроль по шаблонам лемешно-отвальной поверхности корпуса плуга. Подготовку лекал штампов прямого и зеркального вида лемеха производить по эталону – образец *Kverneland 073/004*. То же для изготовления детали в зеркальном изображении (по чертежу ППН.8.30/50-301-001).

4.6. 040. Термическая. В печи сопротивления СНО-4-8-2.5/6ИЗ, предпочтительнее – с защитной средой, нагреть заготовку до закалочной температуры – 1103 К.

4.7. 045. Термическая. В спрейере модуля для термической обработки охладить заготовку водяным душем (давление – 0,4 МПа, температура – 291–308 К).

4.8. 050. Термическая. В печи электрической сопротивления СНО-4-8-2.5/6ИЗ произвести отпуск деталей при температуре 433–453 К в течение 1–1,5 ч с последующим охлаждением на воздухе.

4.9. 050. Контрольная. Измерить твердость поверхности детали в соответствии со схемой измерений чертежа и техническими условиями на лемех. Допускается использование прибора «Импульс-2М», не разрушающего контроля прочности и твердости металлических изделий.


## **6.2. Практические результаты освоения технологий изготовления деталей**

Ведущая роль в освоении и выпуске ДРОМ нового поколения принадлежит машиностроительным предприятиям: РУП «Минский завод шестерен» (освоение изготовления долот, грудей отвалов, лемехов, полевых досок); РУП «Кузнечный завод тяжелых штамповок» (изготовление лево- и правостороннего лемеха); ОАО «Брестский электромеханический завод» (изготовление дисков к агрегатам типа АППМ-4, сменных ножей глубокорыхлителя ГР-70 и др.); ДП «Минойтовский РЗ» (изготовление оборотных долот); ОАО «Дрогичинский ТРЗ» (изготовление долот, лемехов и др.); КУПП «Березарайагросервис» (изготовление ножей измельчающих аппаратов, лемехов-копачей); ОАО «Минский райагросервис» (изготовление зубьев роторных борон, сегментных ножей кукурузных жаток и др.); ОАО «Бобруйскагромаш» (изготовление косилочных ножей, ножей измельчителей соломы и др.); ОАО «Бобруйсксельмаш» (изготовление дисков сошников сеялок и др.); ОАО «Оршаагропромаш» (изготовление стрелчатых и оборотных лап); ОАО «Лидаагропромаш» (изготовление дисков сошников сеялок и др.); ОАО «Лидсельмаш» (изготовление косилочных ножей, оборотных рыхлительных лап и др.). Высокий комплекс механических свойств ДРОМ нового поколения (таблица) достигается совмещением различных средств воздействия на структуру (температура аустенизации, продолжительность нагрева, термическое и деформационное воздействие, высокая скорость охлаждения и явления фрагментации продуктов мартенситного превращения получением биметаллической конструкции режущей части с применением технологий диффузионного намораживания, плазменной и лазерной наплавки).

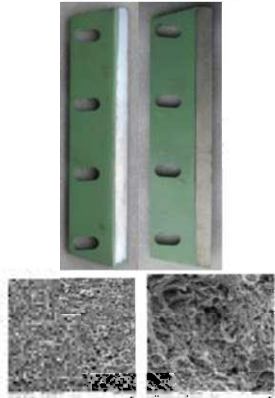
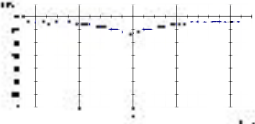
## Технология упрочнения деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники

Оборотное долото плуга	Характеристики	Преимущества	Эффективность	Внедрение
	<p>Освоение отечественного производства оригинальных, конкурентоспособных и взаимозаменяемых изделий с импортными фирмы <i>Kverneland</i> для использования на корпусах № 9 тракторных плугов.</p> <p>Твердость – 56–60 HRC</p> <p>Прочность – 1500–2000 МПа</p> <p>Ударная вязкость – не менее 1 МДж/м<sup>2</sup></p> <p>Ресурс – 50 га</p>	<p>При производстве оборотных долот применяются наукоемкие технологии с использованием проката из стали 60ПП и специальной термической обработки</p>	<p>Ресурс оборотных долот отечественного производства равнозначен оригинальным импортным аналогам.</p> <p>Стоимость одного комплекта оборотных долот отечественного производства на 20–25 % ниже стоимости импортных изделий</p>	<p>Разработчиком технологии производства изделий является УО «БГАТУ». Технология производства оборотных долот осваивается ДП «Минойтовский РЗ», ПРУП «МЗШ» ПО «МТЗ»</p>

Продолжение таблицы

Лемех плуга	Характеристики	Преимущества	Эффективность	Внедрение
	<p>Освоение отечественного производства конкурентоспособных и взаимозаменяемых лемехов нового поколения к корпусам тракторных плугов типа ПШО 5-40 и др.</p> <p>Твердость – 56–60 HRC</p> <p>Прочность – 1500–2000 МПа</p> <p>Ударная вязкость – не менее 1 МДж/м<sup>2</sup></p> <p>Ресурс – 50 га (при условии проведения испытаний в соответствии с требованиями СТБ 1388-2003). <b>Протокол приемочных испытаний № 203 Б 1/1-2009г.</b></p>	<p>При производстве лемехов применяются отечественные наукоемкие технологии с использованием проката из стали 60ПП и специальной термической обработки</p>	<p>Стоимость лемехов нового поколения не превышает стоимости оригинальных изделий производства фирмы <i>Kverneland</i></p>	<p>Разработчиком технологии производства изделий является УО «БГАТУ». Технология производства лемехов реализуется ОАО «КЗТШ», ПРУП «МЗШ» ПО «МТЗ»</p>



Нож измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна	Характеристики	Преимущества	Эффективность	Внедрение
 <p data-bbox="295 667 742 721">Морфология вязкого излома после испытаний на ударную вязкость (<math>\times 20\,000</math>)</p>  <p data-bbox="247 857 790 907">Распределение твердости по толщине опытных образцов ножей измельчающих аппаратов</p>	<p data-bbox="885 268 1061 873">Освоение отечественного производства конкурентоспособных и взаимозаменяемых изделий с импортными оригинальными фирмы <i>Clas</i> для использования на кормоуборочных комбайнах «Jaguar-840(850)». Твердость режущей части – 56–60 HRC Прочность – 1500–2000 МПа Ударная вязкость – не менее 1 МДж/м<sup>2</sup>; Ресурс – 20 тыс. т</p>			<p data-bbox="1332 268 1444 761">Разработчиками технологии производства изделий являются УО «БГАТУ» и ГНУ ФТИ НАН Беларуси. Изготовителем изделий является КУПП «Березарайагросервис»</p>

Нож роторной косилки	Характеристики	Преимущества	Эффективность	Внедрение
	<p data-bbox="534 1366 750 1892">Освоение отечественного производства оригинальных, конкурентоспособных и взаимозаменяемых изделий с импортными для использования на роторных косилках. Твердость – 45–48 HRC Прочность – 1200–1500 МПа Ударная вязкость – не менее 0,6 МДж/м<sup>2</sup> Ресурс – 10 га. (Протокол приемочных испытаний №044 Д 1/1-2010.)</p>	<p data-bbox="774 1422 989 1814">При производстве ножей роторных косилок применяются отечественные наукоемкие технологии с использованием новых материалов для основы изделий, лазерной резки, поперечно-клиновой прокатки, объемно-термического модифицирования и лазерной наплавки</p>	<p data-bbox="1013 1422 1204 1848">Ресурс ножей роторных косилок отечественного производства равен значен оригинальным импортным аналогам. Стоимость одного комплекта ножей роторных косилок отечественного производства на 25–30 % ниже стоимости импортных изделий</p>	<p data-bbox="1236 1422 1436 1848">Разработчиками технологии производства изделий являются УО «БГАТУ», ГНУ «ФТИ НАН Беларуси». Технология производства ножей роторных косилок осваивается ОАО «Дрогичинский ТРЗ», ОАО «Бобрыйскагромап», ОП ГНУ «ФТИ НАН Беларуси»</p>

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 1. Изд. 5-е. М. : Машиностроение, 2001.
2. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2. Изд. 5-е. М. : Машиностроение, 2001.
3. Поляк М. С. Технология упрочнения : в 2 т. Т. 1. М. : Машиностроение, 1995.
4. Поляк М. С. Технология упрочнения: в 2 т. Т. 2. М. : Машиностроение, 1995.
5. Справочник по черному металлопрокату. Минск : Дзэкс, 2004.
6. Исследование разрушения для инженерных расчетов М. : Машиностроение, 1977.
7. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб: ГОСТ 14019-2003.
8. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
9. Рабочий орган почвообрабатывающих машин (варианты): пат. 7466 Респ. Беларусь, МПК 7 А 01В 15/00, 21/00, 23/00, С22С 38/02, 38/56/В. Н. Дашков, И. И. Хилько, Г. Ф. Бетня, Ю. Н. Бельдэйко (BY); В. П. Лобозов, С. И. Никитин, А. А. Кузнецов (RU); заявители: РУНИП «Институт механизации сельского хозяйства Национальной академии наук Беларуси» (BY); ЗАО «ТЕХМАШ» (RU). № а 20020039; заявл. 18.01.2002; опубл. 28.06.2005 2 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.
10. Рабочий орган высокой надежности и абразивной износостойкости: пат. 4216 Респ. Беларусь МПК 7 А01D 34/00, а01В 76/00/Г. Ф. Бетня, Д. П. Литовчик, И. С. Сушко, Г. И. Анискович, В. И. Дазыба, Н. В. Шгуро, М. М. Казак, Ю. В. Титишев, А. Д. Четкин, В. Е. Косович, П. А. Декевич (BY); заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (BY). № и 20070420; заявл. 12.06.2007, опубл. 15.11.2007 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

11. Изделие с самозатачивающимся биметаллическим почворежущим профилем: пат. 1590 Респ. Беларусь, МПК 7 А 01В 15/00/Г. Ф. Бетня, В. С. Ивашко, Г. И. Анискович, Н. А. Зайко, А. В. Кривцов, И. С. Сушко (BY); С. И. Никитин (RU); И. И. Хилько (BY); А. А. Кузнецов (RU); С. К. Карпович, М. М. Казак (BY); заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (BY). № и 20030442; заявл. 20.10.2003; опубл. 30.09.2004 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

12. Технологический модуль для закалки деталей: пат. 2139 Респ. Беларусь, МПК 7 С21D 1/00/Г. Ф. Бетня, Д. П. Литовчик, А. В. Кривцов, Н. А. Зайко (BY); заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (BY). № и 20040601; заявл. 17.12.2004; опубл. 16.05.2005 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

13. Стан поперечной и продольной прокатки для получения сложнопрофильных изделий с заостренными лезвиями: пат. 3885 Респ. Беларусь МПК 7 В 21D 26/00/А. Н. Давидович, С. С. Поплавский, Г. Ф. Бетня, А. Е. Бусель, А. С. Вошкат, В. П. Делендик, В. А. Давидович (BY); заявитель Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (BY). № и 20070192; заявл. 20.03.2007; опубл. 30.10.2007 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

14. Полевая доска плуга: пат. 3817 Респ. Беларусь, МПК 7 А01В 15/00/Г. Ф. Бетня, Д. П. Литовчик, П. А. Десевич, В. Е. Коссович; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (BY). № и 20070057; заявл. 30.01.2007; опубл. 30.08.2007 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

15. Долото плуга: пат. 3808 Респ. Беларусь, МПК 7 А01D 15/00/Г. Ф. Бетня, Д. П. Литовчик, И. С. Сушко; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (BY). № и 20070086; заявл. 06.02.2007; опубл. 30.08.2007 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

16. Способ упрочнения металлических изделий методом намораживания: пат. 11544 Респ. Беларусь, МПК 7 В22D 19/08, С23С 2/00/Г. Ф. Бетня, А. В. Алифанов, В. М. Голуб,

Д. П. Литовчик; заявитель Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (ВУ). № а 20070867; заявл. 10.07.2007; опубл. 28.02.2009 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

17. Спрейер для быстрого охлаждения плоских деталей: пат. 2208 Респ. Беларусь, МПК 7 С21D 1/00/Г. Ф. Бетень, Д. П. Литовчик, А. В. Кривцов, Н. А. Зайко; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (ВУ). № и 20040601; заявл. 17.12.2004; опубл. 30.09.2005 // Дзяржаўны рэестр карысных мадэляў / Нацыянальны цэнтр інтэлектуальнай уласнасці.

18. Лемехи ППН.8.30/50-301/ П, ППН.8.30/50-301П-01 корпусов плугов: Технические условия ТУ ВУ 100185315.007-2010. №ГР 030232 от 25.10.2010. Минск : БГАТУ, 2010.

## РАЗДЕЛ 7

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

#### 7.1. Методика оценки экономической эффективности

Методологическая последовательность экономической оценки производства (изготовления) сменных быстроизнашивающихся рабочих органов почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин (далее – новых изделий) приведена на основе разработанного экономико-математического аппарата, включающего соответствующие расчетные формулы и установленные зависимости [1].

Данная экономическая оценка основана на определении стоимости реализации единицы нового изделия для соответствующей прогнозной производственной программы за установленный период времени.

Стоимость реализации нового изделия ( $C_{\text{изд}}$ ) рекомендуется определять по следующей формуле:

$$C_{\text{изд}} = C_{\text{изг}}^{\text{ед}} \left( 1 + \frac{P_{\text{рп}}}{100\%} \right) \left( 1 + \frac{\text{НДС} + N_{\text{рмф}}}{100\%} \right), \quad (7.1)$$

где  $C_{\text{изг}}^{\text{ед}}$  – себестоимость изготовления единицы нового изделия, тыс. руб./ед.;

$P_{\text{рп}}$  – оптимальный уровень рентабельности реализуемой продукции (новых изделий), %;

НДС – размер ставки налога на добавленную стоимость, %;

$N_{\text{рмф}}$  – размер ставки налога в республиканский и местные фонды, %.

Зависимость по определению себестоимости изготовления одного изделия представлена в следующем виде:

$$C_{\text{изг}}^{\text{ед}} = \frac{C_{\text{изг}}}{Q}, \quad (7.2)$$

где  $C_{\text{изг}}$  – валовые издержки на изготовление партии новых изделий ( $Q$ ), тыс. руб.;

$Q$  – прогнозная производственная программа новых изделий за установленный промежуток времени, ед./год (ед./кв., ед./мес.).

Валовые издержки ( $C_{\text{изг}}$ ) включают условно постоянные и переменные издержки:

$$C_{\text{изг}} = C_{\text{пер}} + C_{\text{пост}}, \quad (7.3)$$

где  $C_{\text{пер}}$  – переменные издержки на изготовление партии новых изделий ( $Q$ ) за установленный промежуток времени, тыс. руб.;

$C_{\text{пост}}$  – условно постоянные издержки на изготовление партии новых изделий ( $Q$ ) за установленный промежуток времени, тыс. руб.

В свою очередь, переменные издержки на изготовление партии новых изделий ( $Q$ ) за установленный промежуток времени включают следующие статьи затрат:

$$C_{\text{пер}} = C_c + C_{\text{р.п.}} + N_{\text{з.п.}} + C_{\text{э.р.}} + C_{\text{р.о.}}, \quad (7.4)$$

где  $C_c$  – затраты на формирование запасов сырья за установленный промежуток времени, тыс. руб.;

$C_{\text{р.п.}}$  – затраты на оплату труда рабочего персонала за установленный промежуток времени, тыс. руб.;

$N_{\text{з.п.}}$  – затраты, связанные с отчислениями на налогообложение заработной платы, тыс. руб.;

$C_{\text{э.р.}}$  – затраты на энергоресурсы за установленный промежуток времени, тыс. руб.;

$C_{\text{р.о.}}$  – затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования (зданий) за установленный промежуток времени, тыс. руб.

Затраты на формирование запасов сырья ( $C_c$ ) состоят из затрат на формирование запасов по всем наименованиям сырья согласно технологии изготовления новых изделий:

$$C_c = \sum_{i=1}^m C_c^i, \quad (7.5)$$

где  $i$  – номер соответствующего наименования сырья;  
 $m$  – общее количество наименований сырья согласно технологии изготовления нового изделия;

$C_c^i$  – затраты на формирование запасов по  $i$ -му наименованию сырья за установленный промежуток времени, тыс. руб.

Причем, зависимость по их определению, в случае, если издержки по формированию первого заказа сырья покрываются за счет кредитных ресурсов (см. формулы (7.18), (7.19)), имеет следующий вид:

$$C_c = \sum_{i=1}^m C_c^i - C_{з.с.}, \quad (7.6)$$

где  $C_{з.с.}$  – затраты на закупку первой партии сырья, тыс. руб.

При этом затраты на формирование запасов по  $i$ -му наименованию сырья за установленный промежуток времени ( $C_c^i$ ) рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$C_c^i = P_i S_i + C_{xp,i}^e \frac{q_o^i}{2} + C_{oi}^e \frac{S_i}{q_o^i}, \quad (7.7)$$

где  $P_i$  – цена за единицу  $i$ -го наименования сырья (без НДС), тыс. руб./ед.;

$S_i$  – необходимое количество  $i$ -го наименования сырья на изготовление партии новых изделий ( $Q$ ) за установленный промежуток времени, ед./год (ед./кв. и т. д.);

$C_{xp,i}^e$  – затраты на хранение единицы  $i$ -го наименования сырья в течение периода времени изготовления партии новых изделий ( $Q$ ), тыс. руб./ед.год (тыс. руб./ед.кв.) и т. д.);

$q_o^i$  – оптимальный размер заказа  $i$ -го наименования сырья, ед.;

$C_{oi}^e$  – транспортные и связанные с ними расходы (погрузка, разгрузка) на выполнение одного заказа по  $i$ -му наименованию сырья, тыс. руб.

Формула по определению оптимального размера заказа по  $i$ -му наименованию сырья ( $q_o^i$ ) имеет следующий вид:

$$q_o^i = \sqrt{2 \cdot \frac{C_{oi}^e S_i}{C_{xp,i}^e + E P_i}}, \quad (7.8)$$

где  $E$  – коэффициент эффективности финансовых вложений за период времени потребления величины ( $S_i$ ), 1/год (1/кв. и т. д.).

Коэффициент ( $E$ ) может варьировать в следующих пределах:

1. Минимальный размер составляет величину, соответствующую депозитному проценту за период времени потребления величины ( $S_i$ ). Так, например, установленный период – один месяц. Следовательно, депозитный процент за месяц, при 12%-м годовом, составит 1%. В этом случае коэффициент ( $E$ ) равен 0,01 с размерностью 1/мес. (1%/100%);

2. Максимальный размер определяется достигнутым уровнем рентабельности готовой продукции и устанавливается в случае возможности интенсивного наращивания производственной программы новых изделий. Его величину в соответствии с выбранным анализируемым периодом необходимо определять по следующей формуле:

$$E = \frac{P_{пр}}{d \cdot 100\%} D, \quad (7.9)$$

где  $d$  – количество повторений в течение года установленного периода времени, необходимого для изготовления партии новых изделий ( $Q$ );

$D$  – количество оборотов готовой продукции в течение года. Определяется в зависимости от среднего периода времени пребывания готовой продукции на складе ( $t_1$ ) до момента реализации. Так, если  $t_1 = 14$  дней, то количество оборотов ( $D$ ) составит 26 (365/14).

Например, достигнутый среднегодовой уровень рентабельности реализуемых новых изделий составляет 12%, установленный период времени – один месяц; количество оборотов готовой продукции в течение года – 12. Следовательно, в данном случае коэффициент ( $E$ ), в отличие от первого пункта, равен 0,12 с размерностью 1/мес.

Затраты на оплату труда рабочего персонала за установленный промежуток времени ( $C_{р.л.}$ ) рекомендуется рассчитывать по следующей зависимости:

$$C_{р.л.} = 3 n N, \quad (7.10)$$

где 3 – размер среднемесячной заработной платы одного рабочего, тыс. руб./чел.;

$n$  – минимально необходимое число рабочих в соответствии с технологией изготовления новых изделий для обеспечения прогнозной производственной программы за установленный промежуток времени, чел.;

$N$  – количество месяцев в установленном периоде времени, мес.

Зависимость по определению затрат, связанных с отчислениями на налогообложение заработной платы ( $H_{з.п.}$ ), имеет следующий вид:

$$H_{з.п.} = C_{р.л.} \frac{(K_{с.з.} + K_{з.} + K_{ч.п.} + K_{о.с.})}{100\%}, \quad (7.11)$$

где  $K_{с.з.}$  – размер ставки налога, отчисляемого в фонд социальной защиты, %;

$K_{з.}$  – размер ставки налога, отчисляемого в фонд содействия занятости, %;

$K_{ч.п.}$  – размер ставки чрезвычайного налога, %;

$K_{о.с.}$  – величина отчислений по обязательному страхованию, %.

Затраты на энергоресурсы рассчитываются, исходя из величины потребления и тарифов на их использование для производства одного нового изделия, а также прогнозной производственной программы за установленный промежуток времени ( $Q$ ):

$$C_{эп.} = Q \sum_{j=1}^l (V_j P_j), \quad (7.12)$$

где  $j$  – номер соответствующего наименования энергоресурса;

$l$  – общее количество наименований энергоресурсов, предусмотренных технологией изготовления новых изделий;

$V_j$  – объем потребления  $j$ -го наименования энергоресурса для изготовления одного нового изделия, кВт·ч (кг, л, м<sup>3</sup>);

$P_j$  – размер тарифа (без НДС) на использование  $j$ -го наименования энергоресурса для изготовления одного нового изделия, тыс.руб./кВт·ч (тыс. руб./кг, тыс. руб./л, тыс. руб./м<sup>3</sup>).

В свою очередь, затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования (зданий) рассчитываются по нормативам отчислений от амортизируемой стоимости оборудования (зданий):

$$C_{р.о.} = \sum_{k=1}^z \left( B_k \frac{R_{ГОРК}}{d \cdot 100\%} \right), \quad (7.13)$$

где  $k$  – номер наименования оборудования (зданий);

$z$  – количество наименований оборудования (зданий) согласно технологии изготовления изделия;

$B_k$  – амортизируемая стоимость (включая монтаж и наладку)  $k$ -го наименования оборудования (зданий), тыс. руб.;

$R_{ГОРК}$  – величина годовых нормативных отчислений на техническое обслуживание и ремонт  $k$ -го наименования оборудования (зданий), %.

Условно постоянные издержки ( $C_{пост.}$ ) на изготовление партии новых изделий ( $Q$ ) за установленный период времени включают следующие статьи затрат:

$$C_{пост.} = C_a + C_{п.к.} + C_n, \quad (7.14)$$

где  $C_a$  – отчисления на амортизацию оборудования (зданий) за установленный период времени, тыс. руб.;

$C_{п.к.}$  – затраты, связанные с платежами по кредиту за установленный период времени, тыс. руб.;

$C_n$  – накладные расходы, тыс. руб.

Сумма амортизационных отчислений ( $C_a$ ) за установленный период времени рассчитывается, исходя из величины амортизируемой стоимости и годовой нормы амортизационных отчислений оборудования (зданий), по ниже приведенной формуле:

$$C_a = \sum_{k=1}^z \left( B_k \frac{A_k}{d \cdot 100\%} \right), \quad (7.15)$$

где  $A_k$  – годовая норма амортизационных отчислений  $k$ -го наименования оборудования (зданий), %.

Зависимость по определению затрат, связанных с платежами по кредиту за установленный период времени ( $C_{п.к.}$ ), имеет следующий вид:

$$C_{п.к.} = \sum_{p=1}^L \left[ \frac{B_k}{L} + \frac{\left( B_k - \frac{B_k}{L}(p-1) \right) \cdot \frac{\Pi_c}{12}}{100\%} \right], \quad (7.16)$$

где  $p$  – порядковый номер платежа по кредиту;

$L$  – количество ежемесячных выплат до полного погашения кредита;

$B_k$  – величина привлекаемых кредитных ресурсов, тыс. руб.;

$\Pi_c$  – годовая ставка за пользование кредитными ресурсами, %.

Следует отметить, что в случае, если установленный период времени (по числу месяцев), необходимый для изготовления партии новых изделий ( $Q$ ), меньше количества ежемесячных выплат до полного погашения кредитам ( $L$ ), затраты ( $C_{п.к.}$ ) определяются, как сумма ежемесячных платежей за данный установленный период времени.

Величину привлекаемых кредитных ресурсов ( $B_k$ ) в случае отсутствия свободных денежных средств рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$B_k = \sum_{k=1}^z B_k + O, \quad (7.17)$$

где  $O$  – минимально необходимый (оптимальный) размер оборотного капитала, тыс. руб.

При этом размер оборотного капитала предлагается определять по следующей формуле:

$$O = C_{з.с.} + C_{о.г.п.} + C_{д.з.} + C_{н.р.}, \quad (7.18)$$

где  $C_{о.г.п.}$  – затраты, связанные с оборотом готовой продукции на складе, тыс. руб.;

$C_{д.з.}$  – прогнозная дебиторская задолженность, тыс. руб.;

$C_{н.р.}$  – затраты, обусловленные непредвиденными расходами, тыс. руб.

Зависимость по определению затрат на закупку первой партии сырья ( $C_{з.с.}$ ), если принять во внимание формулу (7), имеет следующий вид:

$$C_{з.с.} = \sum_{i=1}^m (q_o^i P_i + C_{oi}^e). \quad (7.19)$$

Затраты, связанные с оборотом готовой продукции на складе ( $C_{о.г.п.}$ ), рекомендуется рассчитывать по следующей формуле:

$$C_{о.г.п.} = \frac{Q}{T} P_a t_1, \quad (7.20)$$

где  $T$  – установленный период времени, за который осуществляется изготовление партии новых изделий ( $Q$ ), дней;

$P_a$  – рыночная цена за аналогичное изделие, тыс. руб.;

$t_1$  – период пребывания готовой продукции на складе ( $t_1 \approx 7-14$  дней).

Размер прогнозной дебиторской задолженности рассчитывается, исходя из среднего срока оплаты счетов с учетом существующей практики расчетов с потребителями новых изделий, по формуле:

$$C_{д.з.} = \frac{Q}{T} P_a t_2, \quad (7.21)$$

где  $t_2$  – средний срок оплаты счетов потребителями новых изделий ( $t_2 \approx 5-10$  дней).

Затраты, обусловленные непредвиденными расходами ( $C_{н.р.}$ ), определяются из опыта работы или экспертным путем.

Накладные расходы, включающие общехозяйственные и общепроизводственные затраты, в том числе, заработную плату инженерно-технических работников, рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$C_{н.р.} = \frac{C_{р.п.} \cdot H}{100\%}, \quad (7.22)$$

где  $H$  – процент накладных расходов, учитывающий общехозяйственные и общепроизводственные расходы ( $H \approx 100-200\%$ ).

Важным показателем для экономической оценки технологии производства нового изделия является срок окупаемости (лет) инвестиций в основные фонды ( $T_{окп.}$ ), который в соответствии с представленным экономико-математическим аппаратом рекомендуется определять по следующей зависимости:

$$T_{окп.} = \frac{\sum_{k=1}^z B_k}{\left( \left( C_{изд.} \cdot Q - C_{изг.} \left( 1 + \frac{HДС}{100\%} \right) \right) \left( 1 - \frac{H_{пр.}}{100\%} \right) + C_a \right) d}, \quad (7.23)$$

где  $H_{пр.}$  – размер ставки налога (налогов) на прибыль, %.

Анализ зависимости (23) показывает, что срок окупаемости инвестиций в основные фонды обратно пропорционален себестоимости изготовления, которая, в свою очередь, включает затраты, связанные с платежами по кредиту. Однако то обстоятельство, что размер привлеченных кредитных ресурсов в процессе реализации проекта сокращается, обуславливает уменьшение валовых издержек. Следовательно, при неизменной цене реализации новых изделий и прочих равных условиях с течением времени величина годовой прибыли производства будет расти, а срок окупаемости – сокращаться. Поэтому расчет данного показателя будет тем точнее, чем более длителен установленный период времени, взятый для анализа.

После определения стоимости реализации нового изделия ( $C_{изд.}$ ) в соответствии с предлагаемой технологией изготовления, весьма важно определить экономическую эффективность использования данной продукции по сравнению с лучшими аналогами. Для этого требуется осуществить сбор необходимой информации на базе проведенных испытаний (табл. 7.1).

Технико-экономические показатели нового и существующих аналогов изделия

Наименование показателя	Ед. измерения	Новое изделие	Существующие аналоги	
		Маркировка	№ 1 (маркировка)	№ 2 (маркировка)
Цена единицы (с НДС)	тыс. руб.			
Средний ресурс изделия до предельного износа	га			
Трудоемкость работ по монтажу и обслуживанию изделия за весь срок службы	час			
Средний процент изделий, вышедших из строя, не отработав срок до предельного износа ( $k_1$ )	%			

В качестве оценочного показателя экономической эффективности использования изделия рекомендуется применять зависимость по определению удельных затрат потребителя от использования изделия в расчете на один гектар ( $C_n$ ):

$$C_n = \frac{(C_{изд.} + t_{м.о.} \cdot 3_c) \left( 1 + \frac{k_1}{100\%} \right)}{R}, \quad (7.24)$$

где  $t_{м.о.}$  – трудоемкость работ по монтажу (замене) и обслуживанию изделия за весь срок службы, ч;

$3_c$  – часовая оплата труда слесаря с учетом косвенных налогов на заработную плату, тыс. руб./ч;

$k_1$  – средний процент изделий, вышедших из строя до отработки срока предельного износа, %;

$R$  – средний ресурс изделия до предельного износа, га.

Данные, полученные в результате расчета, сводятся в табл. 7.2. На их основании осуществляется сравнительная экономическая эффективность использования нового и уже существующих аналогов изделия.



Таблица 7.2

Сравнительная экономическая эффективность нового и существующих аналогов изделия

Наименование показателя	Ед. измерения	Новое изделие	Существующие аналоги	
		Маркировка	№ 1 (маркировка)	№ 2 (маркировка)
Удельные затраты потребителя на использование изделия	тыс. руб./га			
Степень снижения затрат нового изделия по сравнению с существующими аналогами (+/-)	%	-		

Примечание: + – положительный экономический эффект, - – отрицательный экономический эффект.

## 7.2. Себестоимость изготовления сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин

Разработанная методика апробирована при расчете экономической оценки эффективности производства при изготовлении долота оборотного ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01).

Определение себестоимости изготовления долота оборотного ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01). Себестоимость его изготовления зависит от характера применяемой технологии. Технология изготовления долота включает выполнение следующих операций: транспортная (покупка, доставка и хранение необходимых материальных ресурсов); заготовительная (плазменный раскрой листовой стали); термическая и прокатная (индукционный нагрев с последующим формированием лезвийной части заготовки в прокатном стане); термическая и прессовая (индукционный нагрев с последующей прошивкой крепежных отверстий); термическая и закалочная (нагрев заготовки в камерной печи и закалка в закалочном модуле); термическая (отпуск в печи); дробеструйная; контрольная

Рассчитаем себестоимость изготовления долота ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01) в соответствии со следующей исходной информацией:

– финансирование инвестиций – собственные средства предприятия (бюджетное беспроцентное и безвозмездное финансирование);

- годовая производственная программа – 60 000 шт./год;
- месячная производственная программа – 5000 шт./мес.;
- продолжительность рабочего дня – 8 ч/сут.;
- количество рабочих дней в году – 250 дн./год;
- материал заготовки – листовая сталь 60ПП (6000×1500×12 мм) Волгоградского металлургического завода «Красный октябрь»;
- поставщик стали – Торговый дом Волгоградского металлургического завода «Красный октябрь» (г. Москва);
- среднемесячная заработная плата рабочего персонала (с учетом подоходного налога) – 1,4 млн руб.;
- среднемесячная заработная плата подсобного рабочего персонала (с учетом подоходного налога) – 1,0 млн руб.;
- процент накладных расходов – 200 %;
- стоимость единицы необходимого сырья и материалов согласно технологии изготовления (см. табл. 7.5), а также энергоресурсов отражена в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Расход сырья, материалов, энергетических и других ресурсов

Наименование ресурсов	Расход на одно долото	Цена (без НДС) за единицы сырья (ресурсов) на 01.10.2008, тыс. руб./кг	Годовая потребность сырья (ресурсов)	Примечание
Листовая сталь 60ПП	1,35 кг	3,0	95,0 т	Отходы – 17 %
Дробь чугунная (1 мм)	0,050 кг	1,70	3,0 т	–
Силовая электроэнергия	2,355 кВт·ч	255,2 руб./кВт·ч	141,3 МВт·ч	–

1. *Транспортная операция* включает затраты на формирование (покупка + доставка) и хранение запасов листовой стали 60ПП и дроби чугунной (1 мм).

Так, годовые затраты на покупку листовой стали 60ПП согласно исходной информации (см. табл. 7.6) и формуле (7.7) рассчитываются как произведение цены ( $P$ ) за 1 тонну стали (3,0 млн. руб.) на необходимое ее количество для производства 60 000 долот (95 тонн) и составят 285,0 млн руб. (95 тонн · 3,0 млн руб./т).

Затраты на доставку определяются как произведение стоимости одной доставки на их количество в течение года. В свою очередь, количество поставок в течение года зависит от оптимального размера партии поставки, которая определяется по формуле (7.8).

Расчет оптимального размера заказа листовой стали производится с учетом того, что ее доставка будет осуществляться автотранспортом. Для этого, во-первых, определяются транспортные расходы на выполнение одного заказа ( $C_0^e$ ) по доставке листовой стали. По состоянию на 01.10.2008 г., величина тарифной ставки на оказание автотранспортных услуг составляла в среднем 1,6 тыс. руб. за один километр. Следовательно, издержки на выполнение одного заказа из Москвы (1500 км туда и обратно) составят 2400 тыс. руб. (1500 км · 1,6 тыс. руб./км).

Во-вторых, определяются издержки на хранение одной тонны стали в течение года ( $C_{xp}^e$ ). С учетом линейных размеров стального листа (6000×1500 мм), допустимой нагрузки на 1 м<sup>2</sup> пола для складов по хранению металлов (7 т/м<sup>2</sup>), а также ширины проходов и проездов минимально необходимая площадь хранения должна составлять 15 м<sup>2</sup>. Принимая размер затрат на использование 1 м<sup>2</sup> пола в течение одного месяца в пределах 3 тыс. руб. (собственное помещение), рассчитаем издержки на хранение одной тонны стали ( $C_{xp}^e$ ) за год. Они составят 54,0 тыс. руб. (15 м<sup>2</sup> · 3,0 тыс. руб./мес. · 12 мес. : 10 тонн), где 10 тонн – это среднее количество стали, которое будет иметь место на складе.

Приняв величину коэффициента эффективности финансовых вложений ( $E$ ) за период времени, равный одному году, на уровне 0,5 (то есть, предположив возможность дальнейшего наращивания производственной программы новых изделий), определяют оптимальный размер заказа согласно зависимости (7.8):

$$q_0^i = \sqrt{2 \cdot \frac{C_{\alpha}^e S_i}{C_{xp,i}^e + E P_i}} = \sqrt{2 \cdot \frac{2400 \cdot 95}{54 + 0,5 \cdot 3000}} = 17,1 \text{ тонн} \approx 20,0 \text{ тонн.}$$

Приняв во внимание оптимальный размер партии поставки 20 тонн, определяют количество заказов в течение года как отношение годового потребления стали к оптимальному размеру одного заказа. Оно составит 5 заказов (95 тонн/20 тонн). Тогда годовые затраты на доставку стали будут равны 12 млн руб. (2,4 млн руб. · 5 заказов).

Годовые затраты на хранение стали определяются, как произведение затрат на хранение одной тонны стали за год ( $C_{xp}^e = 54$  тыс. руб./год · тонн) и среднего количества стали на складе (10 тонн). Они составят 0,54 млн руб. (54 тыс. руб./год · тонн) · 10 тонн)

Следовательно, издержки на формирование и хранение запасов листовой стали за период времени, равный одному году, в соответствии с формулой (7.7) составят:

$$C_e = 285,0 + 0,54 + 12,0 = 297,54 \text{ млн руб.}$$

Аналогичным образом были рассчитаны затраты на формирование (покупка + доставка) и хранение дроби чугуновой (1 мм). Они составят 5,1 млн руб.

Таким образом, совокупные затраты на формирование (покупка + доставка) и хранение запасов листовой стали 60ПП и дроби чугуновой (1 мм) составят 302,64 млн руб. (297,54 млн руб. + 5,1 млн руб.), или в расчете на одно изделие – 5,044 тыс. руб. (302,64 млн руб./60 000 шт.).

#### 2. Заготовительная – плазменный раскрой листовой стали.

Затраты на проведение заготовительной операции включают расходы на оплату труда оператора плазменной установки («Portal»), издержки на амортизацию, техническое обслуживание и ремонт плазменной установки, а также энергозатраты. Следует подчеркнуть, что данные затраты рассчитываются, исходя из фактической загрузки оборудования и обслуживающего персонала в течение года.

Расходы на оплату труда оператора плазменной установки включают основную заработную плату ( $C_{р.л}$ ) и издержки, связанные с отчислениями на косвенное налогообложение заработной платы ( $H_{з.п}$ ).

Основной размер заработной платы определяют согласно исходным данным и формуле (7.10):

$$C_{р.л} = 1,4 \cdot 1 \cdot 4 = 5,6 \text{ млн руб.,}$$

где 4 – фактическая загрузка оператора на заготовительной операции по раскрою листовой стали для производства долот, мес.

Издержки, связанные с отчислениями на налогообложение заработной платы ( $H_{з.п}$ ), определяют по формуле (7.11):

$$H_{з.п} = 5,6 \cdot \frac{(35,0\% + 1,0\% + 3,0\% + 0,6\%)}{100\%} = 2,217 \text{ млн руб.}$$

Тогда расходы на оплату труда составят 7,817 млн руб. (5,6 млн руб. + 2,217 млн руб.).

Расходы на амортизацию плазменной установки рассчитывают с учетом годовой нормы амортизационных отчислений (10,0 %), балансовой стоимости плазменной установки 316,5 млн руб.) и фактической ее загрузки в течение года по формуле (7.15):

$$C_a = 316,5 \cdot \frac{10\%}{100\%} \cdot \frac{1}{3} = 10,55 \text{ млн руб.},$$

где  $\frac{1}{3}$  – коэффициент, учитывающий фактическую загрузку плазменной установки на заготовительной операции по раскрою листовой стали для производства долот.

Расходы на техническое обслуживание и ремонт плазменной установки определяют с учетом годовой нормы отчислений на техническое обслуживание и ремонт (10 %) и фактической загрузки в течение года по формуле (7.13):

$$C_{po} = 316,5 \cdot \frac{10\%}{100\%} \cdot \frac{1}{3} = 10,55 \text{ млн руб.}$$

Энергозатраты рассчитывают с учетом годовой производственной программы (60 000 долот), потребления электроэнергии на одну заготовку (0,39 кВт·ч) и величины тарифа за электроэнергию (255,2 руб./кВт·ч) по формуле (7.12):

$$C_{op} = 60000 \cdot 0,39 \cdot 255,2 = 5,972 \text{ млн руб.}$$

Таким образом, годовые затраты на проведение заготовительной операции по плазменному раскрою листовой стали будут равны:

$$C_2 = 7,817 + 10,55 + 10,55 + 5,972 = 34,889 \text{ млн руб.},$$

или в расчете на одно изделие – 0,582 тыс. руб. (34,889 млн руб./60 000 шт.).

Аналогично выполняются расчеты по остальным операциям технологического процесса изготовления долота.

Наряду с прямыми затратами на выполнение технологического процесса изготовления долот предприятие несет накладные расходы, которые согласно исходным данным и зависимости (7.22) будут равны:

$$C_{np} = \frac{(5,6 + 8,4 + 8,4 + 14,4 + 7,2 + 8,4 + 2,1) \cdot 200\%}{100\%} = 109,0 \text{ млн руб.},$$

или в расчете на одно изделие – 1,817 тыс. руб.

В табл. 7.4 отражена структура себестоимости изготовления долота ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01) согласно приведенной выше технологии

Таблица 7.4

Структура себестоимости изготовления долота ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01) по состоянию на 01.10.2008 г.

Наименование технологической операции	Размер затрат, тыс. руб.	Доля в общей структуре затрат, %
Транспортная	5,044	48,62
Заготовительная	0,582	5,61
Термическая + прокатная	0,899	8,67
Термическая + прессовая	0,725	6,99
Термическая + закалочная	0,723	6,97
Термическая	0,284	2,74
Дробеструйная	0,241	2,32
Контрольная	0,059	0,57
Накладные расходы	1,817	17,51
Итого:	10,374	100,00

Таким образом, себестоимость изготовления долота ППН.8.30/50-313А в соответствии с исходными условиями (по состоянию на 01.10.2008 г.) составляла 10,374 тыс. руб., а с учетом величины налога на добавленную стоимость (18 %) – 12,24 тыс. руб. В свою очередь, минимальная цена реализации с учетом зависимости (7.1) при величине рентабельности на уровне 15–20 % составляла порядка 14,0–15,0 тыс. руб.

По формуле (7.23) с учетом результатов выполненных расчетов определяют *максимальный срок окупаемости* (лет) инвестиций в основные фонды ( $T_{окп}$ ):

$$T_{\text{опт.}} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{\left( \left( C_{\text{мат.}} \cdot Q - C_{\text{м.а.}} \cdot \left( 1 + \frac{\text{НДС}}{100\%} \right) \right) \cdot \left( 1 - \frac{\Pi_{\text{пр.}}}{100\%} \right) - C_{\text{а.}} \right) \cdot d} = \frac{1122220,0}{\left( \left( 14,0 \cdot 60000 - 622440 \cdot \left( 1 - \frac{18\%}{100\%} \right) \right) \cdot \left( 1 - \frac{24\%}{100\%} \right) - 49474 \right) \cdot 1} = 8,65 \text{ года.}$$

Следует отметить, что полученный максимальный срок окупаемости не предусматривает догрузку оборудования в течение года. Так, например, при производстве долот с производственной программой 60 тыс. штук за год плазменная установка используется лишь 4 месяца в году. В случае максимальной загрузки оборудования в течение года (производство другой товарной продукции) при 8-часовом рабочем дне и при прочих равных условиях срок окупаемости составит 5,8 года.

Для оценки экономической эффективности использования долота ППН.8.30/50-313А необходимо определить удельные затраты потребителя от использования изделия в расчете на один гектар ( $C_{\text{п}}$ ) согласно зависимости (7.24), принимая при этом, что время на замену одного долота составляет 0,1 часа, а часовая оплата труда слесаря с учетом косвенных налогов на заработную плату – 7,0 тыс. руб./ч:

$$C_{\text{п}} = \frac{(C_{\text{мат.}} + C_{\text{м.а.}} \cdot 3) \cdot \left( 1 + \frac{K_1}{100\%} \right)}{R} = \frac{(14,0 + 0,1 \cdot 7,0) \cdot \left( 1 + \frac{0,0\%}{100\%} \right)}{50} = 0,294 \text{ тыс. руб./га.}$$

В табл. 7.5 отражены величины основных экономико-эксплуатационных показателей долота ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01).

Таблица 7.5

*Экономико-эксплуатационные показатели долота ППН.8.30/50-313А (ППН.8.30/50-313А-01) по состоянию на 01.10.2008 г.*

Наименование показателя	Единица измерения	Величина
Себестоимость	тыс. руб.	10,374
Минимальная цена	тыс. руб.	14,0
Производительность технологии	шт./ч	60
Материалоемкость изделия	кг	1,35
Затраты на материал	тыс. руб.	4,96
Энергозатраты на изготовление изделия	кВт·ч	2,355
Наработка изделия до предельного состояния	га	50
Удельные затраты потребителя от использования изделия в расчете на 1 га	тыс. руб./га	0,294

Аналогичные расчетные работы были проведены по лемеху ППН.8.30/50-301. В табл. 7.6 отражены основные экономико-эксплуатационные показатели лемеха ППН.8.30/50-301.

Таблица 7.6

*Экономико-эксплуатационные показатели лемеха ППН.8.30/50-301 по состоянию на 01.10.2008 г.*

Наименование показателя	Единица измерения	Величина
Себестоимость	тыс. руб.	48,291
Минимальная цена	тыс. руб.	66,0
Производительность технологии	шт./ч	15
Материалоемкость изделия	кг	5,0
Затраты на материал	тыс. руб.	35,0
Энергозатраты на изготовление изделия	кВт·ч	8,54
Наработка изделия до предельного состояния	га	50
Удельные затраты потребителя от использования изделия в расчете на 1 га	тыс. руб./га	1,4

Таким образом, предложенная методика позволяет осуществлять оценку эффективности производства и использования сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин, а также другой аналогичной товарной продукции. Анализ номенклатуры, объемов, технического уровня и проблем, связанных с обеспечением сельхозпроизводителей сменными деталями рабочих органов машин, свидетельствует о следующем. Самыми массовыми запасными частями являются сменные детали рабочих органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин (в дальнейшем ДРОМ). Снабженческие организации республики в целях стратегической безопасности комплектуют на своих базах неснижаемый запас изделий. На его создание ежегодно затрачиваются денежные средства свыше 46 млрд руб. (табл. 7.7–7.10), что эквивалентно в долларовом исчислении 15–16 млн долларов США.

Участниками поставки ДРОМ к сельхозпроизводителю являются отечественные предприятия и зарубежные фирмы. Этот большой сегмент экономики (рынка услуг) из-за сравнительно низкого каче-

ства ДРОМ, выпускаемых отечественными предприятиями по традиционным технологиям, в которых за последние многие десятилетия не вносятся существенные улучшения, постепенно замещается импортной продукцией. В сложившихся условиях, когда цена на продукцию отечественного производства приблизилась к стоимости аналогов зарубежного производства, отечественные производители ДРОМ скептически оценивают положение дел по снабжению запасными частями отечественного сельхозпроизводителя. Особенно неэффективно и недальновидно решаются вопросы, связанные с качеством данной продукции. Причин здесь несколько. Во-первых, импортная продукция слабо контролируется на соответствие по качеству. Из-за недостаточного контроля, с целью извлечения максимальных прибылей, завозятся в массовом порядке импортные детали, практически ничем не отличающиеся по качеству от изделий отечественных производителей, произведенных по традиционным технологиям. Во-вторых, многие годы не проводилось целенаправленной работы по техническому перевооружению и дооснащению наукоемких производств (в первую очередь, термических), без которых невозможно решать вопросы повышения качества изделий. В-третьих, что очень важно, не хватает достаточного понимания и знания данной сложной научно-технической проблемы среди управленческого персонала, призванного ее решать на основе достижений научно-технического прогресса последнего десятилетия.

Разработанные и созданные образцы конкурентоспособной продукции сменных ДРОМ являются одной из актуальных задач науки и современного сельскохозяйственного машиностроения. Направленные на решение этой проблемы НИОКТР по заданию 2.1 ГНТП «Белсельхозмеханизация» в 2006–2010 гг., свидетельствуют, что сменные ДРОМ нового поколения являются конкурентоспособными изделиями как на внутреннем, так и на внешнем рынках. Технологии изготовления ДРОМ основываются на использовании стального проката, производимого металлургическими предприятиями СНГ. Технологии изготовления ДРОМ нового поколения являются экологически чистыми и защищены патентами.

*Перечень сменных ДРОМ, их годовой неснижаемый запас и стоимость  
(отечественное производство)*

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Цена, руб.	Суммарная стоимость, тыс. руб.
1. Лемех правый	073004/Р	112 000	89 000	9 968 000
2. Лемех левый	073005/Л	112 000	89 000	9 968 000
3. Доска полевая	073608/09	49 000	52 450	2 570 050
4. Долото правос	053090Р	91 500	13 168	1 204 872
5. Долото левос	063090Л	91 500	13 168	1 204 872
6. Грудь отвала правая	73256	16 000	31 200	499 200
7. Грудь отвала левая	73257	16 000	31 200	499 200
8. Зуб роторной бороны правый	041750000Р	43 000	38 000	1 634 000
9. Зуб роторной бороны левый	041750000Л	43 000	38 000	1 634 000

Продолжение табл. 7.7

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Цена, руб.	Суммарная стоимость, тыс. руб.
10. Лапа оборотная	К2 05.001-01	9000	15 153	136 377
11. Лапа КПЦ	КПЦ 02.402	90 000	4330	389 700
12. Диск бороны	Н.154.00.414	18 000	123 400	2 221 200
13. Нож измельчающего барабана правый	984671	3200	120 000	384 000
14. Нож измельчающего барабана левый	984670	3200	120 000	384 000
15. Диск луцильника	ОТ 45754.223.017	38 000	228 000	8 664 000
16. Нож косилки	КпрН 03.416 КпрН-03441	100 000	3 500	350 000
17. Нож ГР-70 правый	ОТИБ 742193.015А	2000	35 000	70 000
18. Нож ГР-70 левый	ОТИБ 742193.015А-01	2000	35 000	70 000
19. Нож ГР-70 центральный	ОТИБ 742193.016	1000	120 000	120 000
20. Диск сеялки		100 000	28 000	2 800 000
21. Лемех-копач	ХОЛМЕР	2000	199 895	399 790

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Цена, руб.	Суммарная стоимость, тыс. руб.
22. Нож сегментный		2000	120 000	240 000
23. Нож сегментный ПКК	ПКК-0.02	7500	17 000	127 500
24. Нож КСН-6	КСН-6	1500	30 000	45 000
25. Лапа стрелчатая		9000	40 000	360 000
26. Нож для обрезки ботвы	КСН-6	1000	180 000	180 000
<b>ИТОГО:</b>		46 123 761		

Таблица 7.8

*Перечень сменных ДРОМ, их годовой потребности в запасе и стоимость (импортное производство)*

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Цена, руб.	Суммарная стоимость, тыс. руб.
1. Лемех правый	073004/Р	112 000	121 645	13 624 240
2. Лемех левый	073005/Л	112 000	121 645	13 624 240

Продолжение табл. 7.8

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Цена, руб.	Суммарная стоимость, тыс. руб.
3. Доска полевая	073608/09	49 000	96 200	4 713 800
4. Долото правое	053090Р	91 500	23 295	2 131 492
5. Долото левое	063090Л	91 500	23 295	2 131 492
6. Грудь отвала правая	73256	16 000	49 745	795 920
7. Грудь отвала левая	73257	16 000	49 745	795 920
8. Зуб роторной бороны правый	041750000Р	43 000	55 000	2 365 000
9. Зуб роторной бороны левый	041750000Л	43 000	55 000	2 365 000
10. Лапа оборотная	К2 05.001-01	9000	18 320	164 880
11. Лапа КПЦ	КПЦ 02.402	90 000	6200	558 000
12. Диск бороны	Н.154.00.414	18 000	158 000	2 844 000
13. Нож измельчающего барабана правый	984671	3200	234 552	750 566
14. Нож измельчающего барабана левый	984670	3200	234 552	750 566

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Цена, руб.	Суммарная стоимость, тыс. руб.
15. Диск лущильника	ОТ 45754.223.017	38 000	310 000	11 780 000
16. Нож косилки	КпрН 03.416 КпрН-03441	100 000	4500	450 000
17. Нож ГР-70 правый	ОТИБ 742193.015А	2000	45 000	90 000
18. Нож ГР-70 левый	ОТИБ 742193.015А-01	2000	45 000	90 000
19. Нож ГР-70 центральный	ОТИБ 742193.016	1000	154 320	154 320
20. Диск ссытки		100 000	35 000	3 500 000
21. Лемех-копач	ХОЛМЕР	2000	280 000	560 000
22. Нож сегментный		2000	200 000	400 000
23. Нож ПКК	ПКК-0.02	7500	14 000	105 000
24. Лемех КСН-6	КСН-6	15 000	24 000	360 000
25. Лапа стрельчатая		9000	60 000	540 000
26. Нож для обрезки ботвы	КСН-6	1000	210 000	210 000
			ИТОГО:	65 854 436

Таблица 7.9

Перечень изделий и потребность в металлопрокате на годовой неснижаемый запас сменных ДРОМ

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Масса детали, кг	Суммарная потребность, т.
1. Лемех правый	073004/Р	112 000	6,5	728,0
2. Лемех левый	073005/Л	112 000	6,5	728,0
3. Доска полесвая	073608/09	49 000	9,2	450,8
4. Долото правое	053090Р	91 500	1,35	123,5
5. Долото левое	063090Л	91 500	1,35	123,5
6. Грудь отвала правая	73256	16 000	3,5	56,0
7. Грудь отвала левая	73257	16 000	3,5	56,0
8. Зуб роторной бороны правый	041750000Р	43 000	3,2	137,6
9. Зуб роторной бороны левый	041750000Л	43 000	3,2	137,6
10. Лапа оборотная	К2 05.001-01	9000	1,6	14,4
11. Лапа КПЦ	КПЦ 02.402	90 000	0,33	29,7
12. Диск бороны	Н.154.00.414	18 000	16,67	300,1
13. Нож измельчающего барабана правый	984671	3200	1,65	5,3



Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Масса детали, кг	Суммарная потребность, т.
14. Нож измельчающего барабана левый	984670	3200	1,65	5,3
15. Диск луцильника	OT 45754.223.017	38 000	9,47	359,9
16. Нож косилки	КпрН 03.416 КпрН-03441	100 000	0,31	31,0
17. Нож ГР-70 правый	ОТИБ 742193.015А	2000	2,5	5,0
18. Нож ГР-70 левый	ОТИБ 742193.015А-01	2000	2,5	5,0
19. Нож ГР-70 центральный	ОТИБ 742193.016	1000	5,1	5,1
20. Диск ссылки		100 000	2,18	218,0
21. Лемех-копач	ХОЛМЕР	2000	2,4	4,8
22. Нож сегментный		2000	0,85	1,7
23. Нож ПКК	ПКК-0.02	7500	0,85	6,4
24. Лемех КСН-6	КСН-6	15 000	2,4	36,0
25. Лапа стрельчатая		9000	1,2	10,8
26. Нож для обрезки ботвы КСН-6	КСН-6	1000	1,2	1,2
			<b>ИТОГО:</b>	<b>3 580,6</b>

Таблица 7.10

Перечень изделий (с учетом конструктивно подобных) и потребность в металлопрокате на годовой планируемый запас сменных ДРОМ

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Масса детали, кг	Суммарная потребность, т.
1. Лемех правый	073004/Р	112 000	6,5	728,0
2. Лемех левый	073005/Л	112 000	6,5	728,0
3. Доска полевая	073608/09	49 000	9,2	450,8
4. Долото правое	053090Р	91 500	1,35	123,5
5. Долото левое	063090Л	91 500	1,35	123,5
6. Грудь отвала правая	73256	16 000	3,5	56,0
7. Грудь отвала левая	73257	16 000	3,5	56,0
8. Зуб роторной бороны правый	041750000Р	43 000	3,2	137,6
9. Зуб роторной бороны левый	041750000Л	43 000	3,2	137,6
10. Лапа оборотная	К2 05.001-01	9000	1,6	14,4
11. Лапа КПЦ	КПЦ 02.402	90 000	0,33	29,7
12. Диск бороны	Н.154.00.414	18 000	16,67	300,1
13. Нож измельчающего барабана правый	984671	3200	1,65	5,3

Продолжение табл. 7.10

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Масса детали, кг	Суммарная потребность, т.
14. Нож измельчающего барабана левый	984670	3200	1,65	5,3
15. Диск лушильника	ОТ 45754.223.017	38 000	9,47	359,9
16. Нож косилки	КпрН 03.416 КпрН-03441	100 000	0,31	31,0
17. Нож ГР-70 правый	ОТИБ 742193.015А	2000	2,5	5,0
18. Нож ГР-70 левый	ОТИБ 742193.015А-01	2000	2,5	5,0
19. Нож ГР-70 центральный	ОТИБ 742193.016	1000	5,1	5,1
20. Диск ссылки		100 000	2,18	218,0
21. Лемех-копач	ХОЛМЕР	2000	2,4	4,8
22. Нож сегментный		2000	0,85	1,7
23. Нож ПКК	ПКК-0.02	7500	0,85	6,4
24. Лемех КСН-6	КСН-6	15 000	2,4	36,0
25. Лапа стрельчатая		9000	1,2	10,8
26. Нож для обрезки ботвы КСН-6	КСН-6	1000	1,2	1,2
27. Лемех ПГЦ 01.701	ПГЦ 01.701	238 800	4,8	1 142,4

Окончание табл. 7.10

Наименование детали	№ детали по каталогу	Количество, шт.	Масса детали, кг	Суммарная потребность, т.
28. Долото	ПГЦ 11.409	192 950	4,8	926,2
29. Отвал	ПГЦ 11.429	33 400	11,4	380,8
30. Доска полсвая	ПГЦ 61.200	51 580	5,35	276,0
31. Отвал	073290/91	31 400	31,8	998,5
32. Отвал	ППЛ 07.00.002	12 000	25,0	300,0
			<b>ИТОГО:</b>	<b>7 604,4</b>

Решение практических вопросов по применению отечественных технологий изготовления ДРОМ нового поколения, направленных на инновационный путь развития современного производства изделий на основе избранных приоритетов, базируется на потенциале сотрудничества научных коллективов с заводами-изготовителями и обеспечивает приоритетные преимущества и конкурентоспособность производимой продукции: качество, высокая производительность труда и экономическая эффективность.

На предприятиях – изготовителях ДРОМ используются следующие технологические решения: 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, наплавка) и лазерные (закалка, модифицирование, наплавка) технологии; технология диффузионного намораживания износостойкими сплавами. Перечисленные технологии являются высокопроизводительными, экологически чистыми, и отвечают требованиям по энерго- и ресурсосбережению. Они являются базовыми при изготовлении ДРОМ.

Отличительными свойствами ДРОМ нового поколения, разработанных по заданию 2.1 ГНТП «Белсельхозмеханизация», являются сочетание высоких показателей твердости, прочности, ударной вязкости и пластичности, мелкозернистым строением стальной заготовки. Разработанные технологические основы получения субмелкозернистого, нанокпозиционного строения поперечного сечения изделий, внешние триботехнические поверхности которых имеют фрагментированную структуру мартенсита, обеспечивающую комплекс физико-механических и триботехнических свойств: твердость около 60 HRC; прочность не менее 1,0 МДж/м<sup>2</sup>; коэффициент относительной абразивной износостойкости не менее 3,0–3,5.

При выборе материала и разработке технологий изготовления ДРОМ использован системный анализ и комплексный учет показателей, влияющих на работоспособное состояние и конкурентоспособность изделий. Технический уровень ДРОМ нового поколения определяется показателями металлургического, конструкторского, технологического, триботехнического, эксплуатационного, экологического и экономического факторов.

Как показывают результаты НИОКР, на всех этапах разработки (выбор материала, получение заготовок, эксплуатационные испыта-

ния, присмочные испытания на объектах аккредитованного центра ГУ «БелМИС»), испытания на твердость, прочность, вязкость разрушения, изгиб, ударный изгиб, износостойкость и др.) обеспечиваются высокие показатели ресурса изделий.

Технологии изготовления ДРОМ нового поколения являются высокопроизводительными, экологически чистыми, защищены патентами и отвечают требованиям по энерго- и ресурсосбережению. Они обеспечивают приоритетные преимущества и конкурентоспособность производимой продукции: качество; высокая производительность труда; экономическая эффективность. Разработанные технологии производства ДРОМ гарантированно будут в ближайшие 10–15 лет являться конкурентоспособными и обладать коммерческой перспективой.

На основании проведенных экспериментальных исследований Учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» и Государственного научного учреждения «Физико-технический институт» Национальной академии наук Республики Беларусь разработаны и утверждены по заданию 2.1. ТУ с присвоением технической документации «О<sub>1</sub>» на 16 наименований деталей. Это позволяет предприятиям Минпрома Республики Беларусь и РО «Белагроссервис» наладить производство сменных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники.

Освоение отечественного производства ДРОМ по установленной номенклатуре изделий с учетом объемов неснижаемого запаса на складах запасных частей к сельскохозяйственной технике позволит ежегодно экономить валютные средства на сумму около 66,0 млрд рублей, что эквивалентно сумме валютных средств в размере 22,0 млн долларов США.

Одновременно следует отметить, что внедрение новых технологий при изготовлении деталей из стали 60ПП позволяет экономить потребление проката до 3,0 тыс. т в год.

## БИБЛИОГРАФИЯ

Дроздов П. А. Методика экономической оценки производства товарной продукции. 2008, № 1 // Главный бухгалтер. Ценообразование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии рассмотрено современное состояние проблемы работоспособности деталей органов почвообрабатывающих, посевных и кормоуборочных машин, обобщены результаты научных исследований и технических решений последних лет, направленных на освоение отечественного производства конкурентоспособной продукции. Основу технических решений изготовления ДРОМ составляет системный анализ и комплексный подход, учитывающий показатели металлургического, материаловедческого, конструкторского, технологического, триботехнического, экологического, эксплуатационного и экономического факторов.

Приведенная методика сравнительной оценки технического уровня ДРОМ с учетом этих факторов позволяет осуществлять проверку конкурентоспособности изделий на мировом рынке. Традиционно применяемые материалы и технологии изготовления ДРОМ достигли своего предела конструкционной прочности и износостойкости и требуют замены.

Обоснованы основные критерии работоспособности ДРОМ, к числу которых отнесены: конструкционная прочность, твердость, ударная вязкость, пластичность и конструкционная износостойкость. Их обеспечение реализуется при получении композиционного старения поперечного сечения изделий и характеризуемого субмикро- и нанокристаллической структурой. Внешние поверхности трения таких деталей имеют фрагментированную дисперсную структуру мартенсита, обладающего комплексом высоких механических свойств: твердость около 60 HRC; прочность не менее 2000 МПа; ударная вязкость свыше 1 мДж/м<sup>2</sup>; коэффициент относительной абразивной износостойкости не менее 3,0–3,5.

Для изготовления ДРОМ разработаны отечественные технологии, позволяющие перейти на производство этих изделий предприятиями ГПО «Белагромаш» и РО «Белагросервис» по ресурсу, равнозначному для импортных деталей. Технологии изготовления ДРОМ нового поколения являются экологически чистыми и защищены патентами. Для их производства используются конструкционные стали, выпускаемые металлургическими заводами СНГ.

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, наплавка) и лазерные (закалка, модифицирование, наплавка) технологии; технология диффузионного намораживания износостойкими сплавами. Перечисленные технологии являются высокопроизводительными, экологически чистыми и отвечают требованиям по энерго- и ресурсосбережению. Они являются базовыми при изготовлении ДРОМ.

Решение практических вопросов по применению отечественной технологии изготовления ДРОМ нового поколения, направленных на инновационный путь развития современного производства изделий на основе избранных приоритетов, базируется на потенциале сотрудничества научных коллективов с заводами-изготовителями и обеспечивает приоритетные преимущества и конкурентоспособность производимой продукции: качество, высокая производительность труда; экономическая эффективность. Разработанные технологии производства ДРОМ в ближайшие 10–15 лет гарантированно будут конкурентоспособными и будут обладать коммерческой перспективой.

Разработанные технологии производства конкурентоспособных ДРОМ направлены на радикальное повышение эксплуатационных свойств изделий. Как показывают результаты исследований на всех этапах разработки (выбор материала, получение заготовок, эксплуатационные испытания, приспосабливаемые испытания на объектах аккредитованного центра ГУ «БелМИС», испытания на твердость, изгиб, ударный изгиб, вязкость разрушения, износостойкость и др.), обеспечиваются высокие показатели ресурса изделий.

Ведущая роль в освоении и выпуске ДРОМ нового поколения принадлежит машиностроительным предприятиям: РУП «Минский завод шестерен» (освоение изготовления долот, грудей отвалов, лемехов, полевых досок); РУП «Кузнечный завод тяжелых штамповок» (изготовление лево- и правостороннего лемеха); ОАО «Брестский электромеханический завод» (изготовление дисков к агрегатам типа АППМ-4, сменных ножей глубокорыхлителя ГР-70 и др.); ДП «Минойтовский РЗ» (изготовление оборотных долот); ОАО «Дрогичинский ТРЗ» (изготовление долот, лемехов и др.); КУПП «Березарайагросервис» (изготовление ножей измельчающих

аппаратов, лемехов-копачей); ОАО «Минский райагросервис» (изготовление зубьев роторных борон, сегментных ножей кукурузных жаток и др.); ОАО «Бобруйскагромаш» (изготовление косилочных ножей, ножей измельчителей соломы и др.); ОАО «Бобруйсксельмаш» (изготовление дисков сошников сеялок и др.); ОАО «Оршаагропромаш» (изготовление стрелчатых и оборотных лап); ОАО «Лидагропромаш» (изготовление дисков сошников сеялок и др.); ОАО «Лидссьлмаш» (изготовление косилочных ножей, оборотных рыхлительных лап и др.). Высокий комплекс механических свойств ДРОМ нового поколения достигается совмещением различных средств воздействия на структуру (температура аустенизации, продолжительность нагрева, термическое и деформационное воздействие, высокая скорость охлаждения и явления фрагментации продуктов мартенситного превращения получением биметаллической конструкции режущей части с применением технологий диффузионного намораживания, плазменной и лазерной наплавки).

Для сменных ДРОМ, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, режущая часть изделий подвергается диффузионному намораживанию износостойким сплавом. При такой конструкции биметаллического почворежущего профиля износостойкое покрытие и несущая стальная основа изнашиваются с одинаковой интенсивностью, образуя на пересечении нижней (затылочной) фаски с лицевой поверхностью режущую кромку (лезвие) толщиной не более 1 мм. Одновременно соблюдаются и другие критерии работоспособности изделий: твердость рабочей поверхности (55–60 HRC); прочность материала основы (не менее 2000 МПа); ударная вязкость основного металла (не менее 1 мДж/м<sup>2</sup>).

Для сменных ДРОМ (ножей) их режущая часть подвергается лазерной наплавке износостойким сплавом. Ее применение, наряду с термической обработкой, позволяет получать оптимальное структурное строение режущей части ножей. Твердое (70 HRC) износостойкое покрытие на закаленной стальной основе (56–58 HRC) наносится слоем в пределах 0,2–0,4 мм. Это покрытие обладает высокой абразивной и коррозионной стойкостью.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ДОЛОТА ОБОРОТНОГО ППН.8.30/50-313А (-01) ИЗ ЛИСТА  
12×1200×6000 СТАЛЬ 60ПП ТУ 14-1-1926-76 РФ**

**1. Общие требования**

1.1. Из каждой партии поставки профилированного проката листа отрезать два (три) образца длиной 12–14 мм. Заклеить образцы и листы одним порядковым номером. В заводской лаборатории провести анализ микро- и макроструктуры, химического состава металла, термообработать (закалка + низкий отпуск) образцы. Получить разрешение на выдачу профилированного проката листа в заготовительный цех.

1.2. Число операций и порядок обработки тех или иных поверхностей, отверстий и других конструктивных элементов, входящих в черновые и чистовые операции, число и порядок слесарных операций по зачистке заусенцев, очистке поверхности от окалины и притуплению острых кромок не регламентируется и устанавливается из условия обеспечения безопасности работ, а также для улучшения условий выполнения последующих операций.

1.3. Величина припуска для операций механической обработки устанавливается с учетом технических требований чертежа. Выполнение последующей операции не должно вызывать деформацию и искажение заготовки, появление дополнительных внутренних напряжений.

1.4. Заготовительную операцию по раскройке листа выполнять из расчета минимальных потерь материала.

1.5. Раскрой листа ведется только при поперечном расположении заготовок на нем. Расположение заготовок вдоль листа используемого материала строго запрещается.

1.6. Операции объемного термического модифицирования (нагрев, закалка, низкий отпуск), связанные с термической обработкой, следует осуществлять в соответствии с технологическими параметрами и их режимами в пределах установленных отклонений.

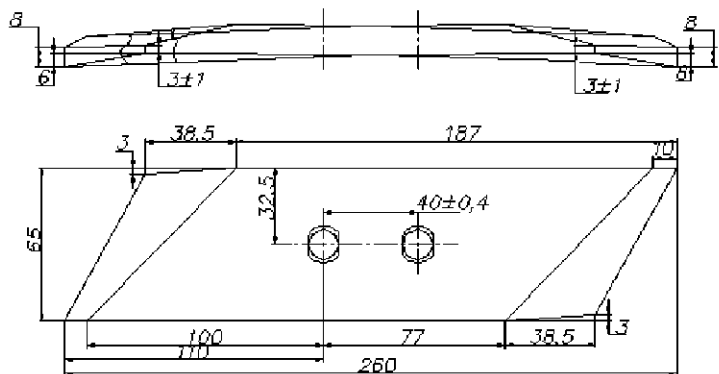
1.7. Выбор охлаждающей среды, способа подачи заготовки в зону охлаждения проводить согласно рекомендациям, приведенным в описании технологического процесса объемного термического модифицирования.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

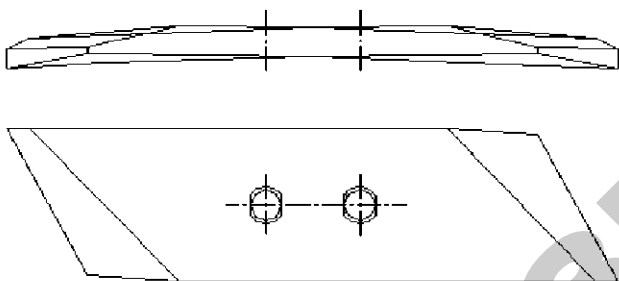
## 2. Технические требования на изготовление долота оборотного ППН.8.30/50-313А (-01)

### 2.1. Эскиз долота оборотного ППН.8.30/50-001(-01).

ППН.8.30/50-001



ППН.8.30/50-001-01 – зеркальное отражение  
Остальное см. ППН.8.30/50-001



2.2. Материал – листовой прокат горячекатаный из конструкционной стали пониженной прокаливаемости марки 60ПП (ТУ 14-1-1926-76 РФ) (допускаются марки стали 55РП).

2.3. Термически обрабатывать долото с охлаждением в закалочном устройстве.

2.4. Твердость поверхности долота после закалки и отпуска должна быть не менее 56-60 HRC в местах измерения согласно чертежу.

2.5. Поверхность долота должна быть чистой и гладкой, без расщелений и окалины.

2.6. Положение угла наклона лезвийной части выполнять согласно чертежу отдельно для правого и левого долота.

## 3. Технологический маршрут изготовления долота оборотного ППН.8.30/50-313А (-01)

3.1. Отрезка образцов-свидетелей.

3.2. Контроль химсостава исходного металла поставки. Выполняется лабораторией химического анализа.

3.3. Термическая обработка образцов-свидетелей.

3.4. 005. Транспортная (доставка листа 12×1200×6000 на заготовительный участок).

3.5. 010. Заготовительная (воздушно-плазменная резка листа на заготовки).

3.6. 015. Слесарная (зачистить детали после резки по наружному контуру).

3.7. 020. Транспортная (транспортировать заготовки на кузнечно-термический участок).

3.8. 025. Термическая (нагрев заготовки до температуры пластического деформирования – 1423 К).

3.9. 030. Прессовая (пластическое горячее деформирование и изготовление поковки заготовки).

3.10. 035. Термическая (нагрев поковки до температуры горячего пластического деформирования (1423 К)).

3.11. 040. Прессовая (пробивка отверстий Ø13 мм и гибка по  $R = 3923$  мм).

3.12. 045. Термическая (нагрев заготовки до закалочной температуры).

3.13. 050. Термическая (охлаждать заготовки потоком жидкости в закалочном устройстве).

3.14. 055. Контрольная (контролировать геометрические размеры и твердость заготовки).

3.15. 060. Термическая (нагрев до температуры низкого отпуска и выдержка в электропечи).

3.16. 065. Контрольная (контролировать геометрические и физико-механические свойства деталей).

3.17. 070. Дробеструйная (обработать заготовки с одной и другой стороны).

3.18. 075. Транспортная (транспортировать заготовки на окрасочный участок).

3.19. 080. Окрасочная (произвести окраску детали методом окунания).

3.20. 085. Упаковочная (упаковать детали согласно техническим условиям на изделие).

#### 4. Технические условия проведения регламентируемых операций изготовления ножей долота оборотного ППН.8.30/50-313А (-01)

4.1. 010. Заготовительная. Раскрой листа на заготовки осуществляется с использованием установки для воздушно-плазменной резки АПР-90.

4.2. 025. Термическая. Оборудование – электрическая печь сопротивления с карборундовыми нагревателями, обеспечивающими температуру нагрева металла до 1573 К. Допускается использование среднечастотной установки ТВЧ (генератор СВГ-50/10, блок закалочный Б32-100/10, станция водоохлаждения СВ1-1.7М).

4.3. 030. Прессовая. Оборудование – пресс П-6324. Штамп трехручевой: предварительный ручей – формирование откосов по краям поковки, согласно чертежу поковки; окончательный ручей – формирование по чертежу готовой поковки; отрубной ручей – обсечка контура по краям поковки.

4.4. 035. Термическая. Оборудование – электрическая печь сопротивления с карборундовыми нагревателями, обеспечивающими температуру нагрева металла до 1573 К. Допускается использование среднечастотной установки ТВЧ (генератор СВГ-50/10, блок закалочный Б32-100/10, станция водоохлаждения СВ1-1.7М).

4.5. 040. Прессовая. Оборудование – пресс ПГ-500. Штамп трехручевой: первый ручей – пробивка двух отверстий Ø13 мм согласно чертежу; второй ручей – высадка конуса под углом 20° на высоте 10 мм и клеймение; третий ручей – гибка поковки по радиусу  $R = 3923$  мм.

4.6. 045. Термическая. Оборудование – электропечь сопротивления типа СНО 4.8.2,5/11 ИЗ. Нагрев заготовок до закалочной температуры 1103 К в электропечи сопротивления с выдержкой 0,5 ч. Допускается использование среднечастотной установки ТВЧ (генератор СВГ-50/10, блок закалочный Б32-100/10, станция водоохлаждения СВ1-1.7М).

4.7. 050. Термическая. Охлаждение заготовок потоком жидкости в закалочном устройстве в соответствии с заданным режимом. Время охлаждения – 3 с, остаточная температура – 433–463 К.

4.8. 055. Контрольная. Контролировать твердость 58–62 HRC. Оборудование – штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89, угломер ГОСТ 5378-88, образцы шероховатостей, твердомер «Импульс-2М».

4.9. 060. Термическая. Низкий отпуск при температуре 453–473 К с последующим охлаждением на воздухе до температуры 293 К. Оборудование – электрическая печь сопротивления НКО 10.12.10/4,5М. Время выдержки – не менее 1,5–2 ч при установившейся температуре.

4.10. 065. Контрольная. Контролировать геометрические и физико-механические свойства деталей (твердость 56–60 HRC). Контроль качества маркировки и остальных параметров по техническим условиям на долото оборотное. Оборудование – штангенциркуль ШЦ-П-250-0,05 ГОСТ 166-89, твердомер «Импульс-2М».

4.11. 070. Дробеструйная. Обработать заготовки с одной и другой стороны. Оборудование – машина дробеструйная Н-514.00.00.00, дробь чугунная ДЧЛ 08 ГОСТ 11964 Ø1 мм.

4.12. 080. Окрасочная. Подготовить детали к окраске по ГОСТ 9.402. Окунуть деталь в ванну с грунтом, затем вынуть и подвесить для стекания и сушки ( $t_{\text{выш.}} = 8$  ч). После высыхания окунуть деталь в ванну с краской, затем вынуть и повесить для стекания и сушки. Контроль рабочим – 100 %. Визуальный осмотр качества окраски согласно техническим условиям. Контроль ОТК – 5 % от партии. Качество покрытия должно соответствовать V классу по ГОСТ 9.032 и группе условий эксплуатации по ГОСТ 9.104. Материалы – каустическая сода, грунт ГФ-021 ГОСТ 25129 и ГФ 0119 ГОСТ 23343, эмаль АС-182 ГОСТ 19024.



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ  
ГРУДИ ОТВАЛА ППН.8.30/50-312А и ППН.8.30/50-312А-01**

**1. Общие требования**

1.1. Из каждой партии поставки профилированного проката полосы отрезать два (три) образца длиной 12–14 мм. Заклеить образцы и полосы одним порядковым номером. В заводской лаборатории провести анализ микро- и макроструктуры, химического состава металла, термообработать (закалка + низкий отпуск) образцы. Получить разрешение на выдачу профилированного проката полосы в заготовительный цех.

1.2. Число операций и порядок обработки тех или иных поверхностей, отверстий и других конструктивных элементов, входящих в черновые и чистовые операции, число и порядок слесарных операций по зачистке заусенцев, очистке поверхности от окалины и притуплению острых кромок не регламентируется и устанавливается из условия обеспечения безопасности работ, а также для улучшения условий выполнения последующих операций.

1.3. Величина припуска для операций механической обработки устанавливается с учетом технических требований чертежа. Выполнение последующей операции не должно вызывать деформацию и искажение заготовки, появление дополнительных внутренних напряжений.

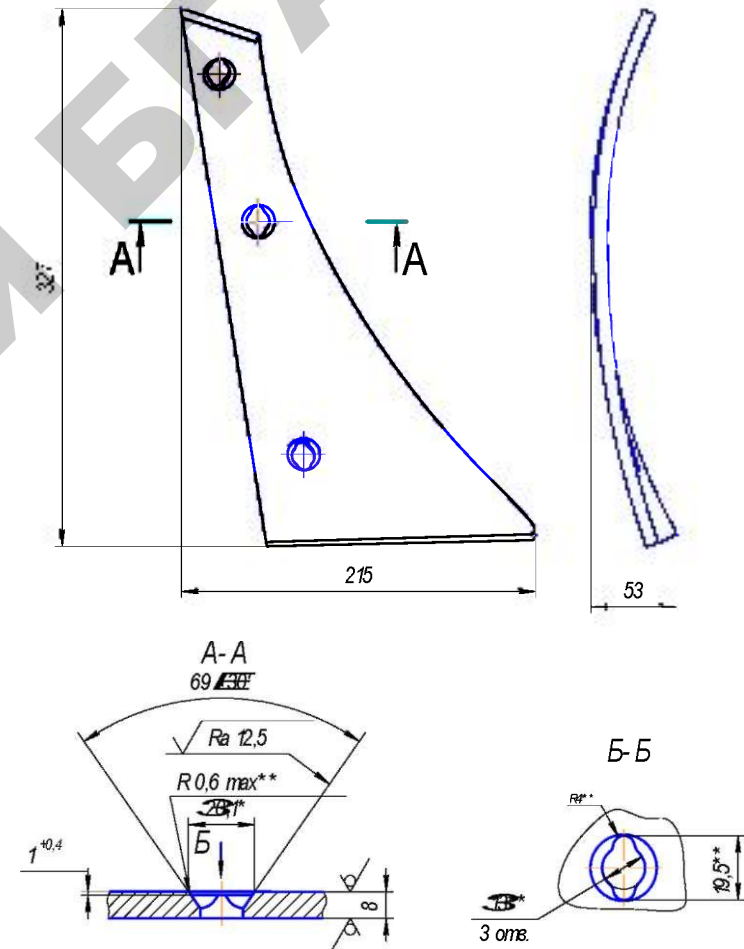
1.4. Прессовую операцию по формированию рабочей лицевой поверхности груди отвала производить после нагрева при заданной температуре в специальном штампе.

1.5. Операции (нагрев, закалка, отпуск), связанные с термической обработкой, следует осуществлять в соответствии с технологическими параметрами и их режимами в пределах установленных отклонений.

1.6. Выбор охлаждающей среды, способа ввода заготовки в зону охлаждения проводить согласно рекомендациям, приведенным в описании технологического процесса объемного термического модифицирования.

**2. Технические требования на изготовление груди отвала  
ППН.8.30/50-312А и ППН.8.30/50-312А-01, упрочненной  
объемным термическим модифицированием**

**2.1. Эскиз груди отвала ППН.8.30/50-312А.**



2.2. Материал – прокат горячекатаный из стали конструкционной углеродистой с пониженной прокаливаемостью марки 60ПП ТУ РФ 14-1-1926-76 (допускается марка стали 40ПП).

2.3. Термически обрабатывать грудь отвала с применением спрейерного охлаждения водой.

2.4. Твердость термообработанных поверхностей должна быть не менее 63–65 HRC в местах испытаний согласно чертежу.

2.5. Лицевая поверхность груди отвала должна быть без расслоений, окалины, чистой и гладкой.

2.6. Положение осей отверстий выполнять согласно чертежу.

### **3. Технологический маршрут изготовления груди отвала ППН.8.30/50-312А (ППН.8.30/50-312А-01), упрочненной объемным термическим модифицированием**

3.1. Отрезка образцов-свидетелей.

3.2. Контроль исходного металла.

3.3. Отрезка заготовок и образцов-свидетелей.

3.4. Термическая обработка и испытание образцов. Выполняется по заключению центральной заводской лаборатории.

3.5. 005. Транспортная (доставка листа 8×1200×6000 на заготовительный участок).

3.6. 010. Заготовительная (лазерная резка листа по размерам и формам груди отвала и вырезка крепежных отверстий).

3.7. 015. Зенковочная (зенковка крепежных отверстий под головки болтов).

3.8. 020. Транспортная (доставка заготовок долот на термический участок).

3.9. 025. Термическая (объемный нагрев заготовки).

3.10. 030. Прессовая (формирование профильной поверхности изделия в специальном штампе).

3.11. 035. Термическая (нитроцементация заготовок).

3.12. 040. Термическая (нагрев заготовки до закалочной температуры).

3.13. 045. Термическая (закалка с применением спрейерного охлаждения водой).

3.14. 050. Термическая (нагрев, выдержка и охлаждение деталей на воздухе).

3.15. 055. Транспортная (доставка на участок контроля и консервации).

3.16. 060. Дробеструйная (очистка от окалины и других загрязнений).

3.17. 065. Контрольная (измерение твердости поверхности в соответствии с принятой схемой).

3.18. 070. Окрасочная (окраска погружением).

3.19. 075. Упаковочная (упаковка деталей в тару).

3.20. 080. Транспортная (транспортирование деталей на склад).

### **4. Технологические условия проведения регламентируемых операций изготовления груди отвала ППН.8.30/50-312А (ППН.8.30/50-312А-01), упрочненной объемным термическим модифицированием**

4.1. 010. Заготовительная. Лазерная резка листа на заготовки по формам и размерам груди отвала и вырезка крепежных отверстий.

4.3. 025. Термическая. Объемный нагрев заготовки до 1123–1173 К.

4.4. 030. Прессовая. Формирование профильной поверхности изделия в специальном штампе.

4.5. 035. Термическая. Нитроцементация заготовок в течение 3 ч.

4.5. 040. Термическая. Нагрев заготовки до заданной закалочной температуры 1063–1088 К.

4.6. 045. Термическая. Закалка заготовки с применением спрейерного охлаждения водой и в соответствии с заданным режимом охлаждения.

4.7. 050. Термическая. Объемный нагрев заготовки до температуры 453 К, выдержка в течение 1 ч и охлаждение на воздухе.

4.8. 065. Контрольная. Твердость поверхности изделия в местах измерения должна составлять 63–65 HRC.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛЕВОЙ ДОСКИ ППН.8.30/50-302А

### 1. Общие требования

1.1. Из каждой партии поставки профилированного проката полосы отрезать два (три) образца длиной 12–14 мм. Заклеить образцы и полосы одним порядковым номером. В заводской лаборатории провести анализ микро- и макроструктуры, химического состава металла, термообработать (закалка + низкий отпуск) образцы. Получить разрешение на выдачу профилированного проката полосы в заготовительный цех.

1.2. Число операций и порядок обработки тех или иных поверхностей, отверстий и других конструктивных элементов, входящих в черновые и чистовые операции, число и порядок слесарных операций по зачистке заусенцев, очистке поверхности от окалины и притуплению острых кромок не регламентируется и устанавливается из условия обеспечения безопасности работ, а также для улучшения условий выполнения последующих операций.

1.3. Величина припуска для операций механической обработки устанавливается с учетом технических требований чертежа. Выполнение последующей операции не должно вызывать деформацию и искажение заготовки, появление дополнительных внутренних напряжений.

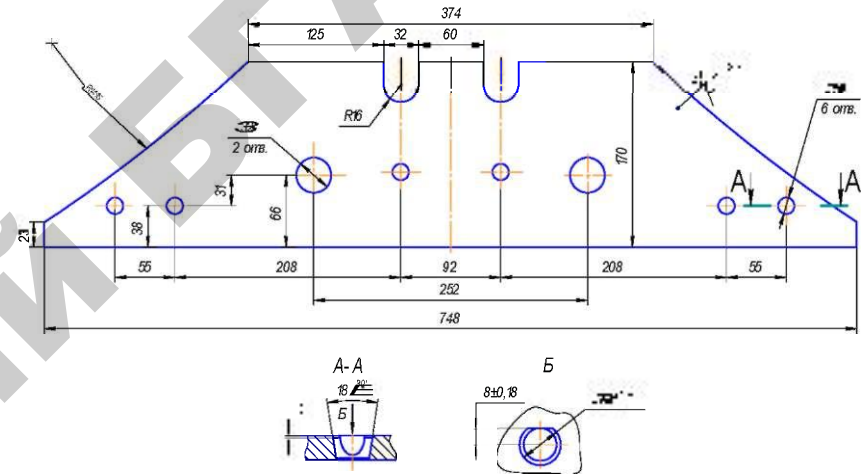
1.4. Термическую операцию заковки рабочей поверхности детали производить после последовательного индукционного локального нагрева при заданной температуре с последующим спрейерным охлаждением водой.

1.5. Операции (нагрев, закалка, отпуск), связанные с термической обработкой, следует осуществлять в соответствии с технологическими параметрами и их режимами в пределах установленных отклонений.

1.6. Выбор охлаждающей среды, способа ввода заготовки в зону охлаждения проводить согласно рекомендациям, приведенным в описании технологического процесса объемного термического модифицирования.

## 2. Технические требования на изготовление полевой доски ППН.8.30/50-302А, упрочненной объемным термическим модифицированием

### 2.1. Эскиз полевой доски ППН.8.30/50-302А.



2.2. Материал – прокат горячекатаный из стали конструкционной углеродистой с пониженной прокаливаемостью марки 60ПП ТУ РФ 14-1-1926-76 (допускается марка стали 40ПП).

2.3. Термически обрабатывать полевую доску с применением спрейерного охлаждения водой.

2.4. Твердость термообработанных поверхностей должна быть не менее 58–62 HRC в местах испытаний согласно чертежу.

2.5. Поверхность полевой доски должна быть без расслоений, окалины, чистой и гладкой.

2.6. Положение плоских сторон отверстий выполнять согласно чертежу.

### 3. Технологический маршрут изготовления полевой доски ППН.8.30/50-302А, упрочненной объемным термическим модифицированием

3.1. Отрезка образцов-свидетелей.

3.2. Контроль исходного металла.

3.3. Отрезка заготовок и образцов-свидетелей.

**Шило Иван Николаевич, Бетенья Григорий Филиппович,  
Маринич Леонид Адамович и др.**

**ПОВЫШЕНИЕ  
РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
МАШИН**

Ответственный за выпуск Г. Ф. Бетенья  
Редактор Т. В. Каркоцкая  
Компьютерная верстка А. И. Стебуля  
Оформление и дизайн обложки И. А. Усенко

Подписано в печать 14.12.2010 г. Формат 60 × 84<sup>1/8</sup>.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 18,6. Уч.-изд. л. 14,54. Тираж 100 экз. Заказ 1056.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЛИ № 02330-0552984 от 14.04.2010.

ЛП № 02330-0552743 от 02.02.2010.

Пр-т Независимости, 99 2, 220023, Минск.

3.4. Термическая обработка и испытание образцов. Выполняется по заключению центральной заводской лаборатории.

3.5. 005. Транспортная (доставка листа 12×1200×6000 на заготовительный участок).

3.6. 010. Заготовительная (лазерная резка листа на заготовки по форме и габаритным размерам детали и вырезка отверстий).

3.7. 015. Зенковочная (зенковка отверстий).

3.8. 020. Транспортная (доставка заготовок полевых досок на термический участок).

3.9. 025. Термическая (непрерывно-последовательный нагрев заготовки до закалочной температуры 1063–1088 К и спрейсрнос охлаждение водой).

3.10. 030. Термическая (нагрев, выдержка и охлаждение деталей на воздухе).

3.11. 035. Транспортная (доставка деталей на участок контроля и консервации).

3.12. 040. Дробеструйная (очистка деталей от окалины и других загрязнений).

3.13. 045. Контрольная (измерение твердости поверхности деталей в соответствии с принятой схемой).

3.14. 050. Окрасочная (окраска погружением).

3.15. 055. Упаковочная (упаковка деталей в тару).

3.16. 060. Транспортная (транспортирование деталей на склад).

**4. Технологические условия проведения регламентируемых операций изготовления полевой доски ППН.8.30/50-302А, упрочненной объемным термическим модифицированием**

4.1. 010. Заготовительная. Лазерная резка листа на заготовки по форме и габаритным размерам детали и вырезка отверстий.

4.3. 015. Зенковочная. Зенковка отверстий согласно чертежу.

4.4. 025. Термическая. Непрерывно-последовательный нагрев заготовки в индукторе тиристорной установки СЧГЗ-100/10 и спрейсрнос охлаждение водой в соответствии с заданным режимом охлаждения.

4.5. 030. Термическая. Объемный нагрев заготовки до температуры 453 К, выдержка в течение 1 ч и охлаждение на воздухе.

4.8. 045. Контрольная. Твердость поверхности изделия в местах измерения должна составлять 58–62 HRC.