

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

Бугаев Александр Вячеславович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
ТЕРМОДИФФУЗИОННЫМ ХРОМИРОВАНИЕМ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, профессор,
академик РАН
Дидманидзе Отари Назирович

Москва – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ	
ИССЛЕДОВАНИЯ	17
1.1 Анализ оснащённости сельского хозяйства почвообрабатывающей техникой	17
1.2 Технические характеристики некоторых почвообрабатывающих машин и их потребительские свойства	22
1.3 Характеристики рабочих органов некоторых почвообрабатывающих машин	34
1.4 Износостойкость рабочих органов почвообрабатывающей техники и направления ее повышения.....	35
1.5 Анализ материалов для изготовления рабочих органов почвообрабатывающей техники	42
1.6 Анализ технологий упрочнения рабочих органов при их изготовлении	48
1.6.1 Наплавочные способы	48
1.6.2 Газотермическое напыление	51
1.6.3 Электроискровая обработка.....	52
1.6.4 Пластическая деформация.....	53
1.6.5 Термическая обработка.....	54
1.6.6 Химико-термическая обработка	56
1.6.7 Упрочняющие технологии при изготовлении рабочих органов зарубежной почвообрабатывающей техники	61
1.7 Анализ упрочняющих технологий восстановления рабочих органов при ремонте почвообрабатывающей техники.....	63
1.7.1 Наплавочные способы	63
1.7.2 Нанесение газотермических покрытий.....	64
1.7.3 Электролитическое хромирование	66

1.7.4 Применение клеэполимерных композиционных материалов	67
1.7.5 Крепление пластин к режущей части рабочего органа	68
1.8 Технологии восстановления рабочих органов зарубежной почвообрабатывающей техники	71
1.9 Результаты обобщения способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин.....	74
1.10 Возможности диффузионного хромирования для восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающей техники	79
Выводы	84

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ДИФФУЗИОННЫМ ХРОМИРОВАНИЕМ.....

2.1 Теоретическое обоснование диффузионного хромирования для восстановления работоспособности лап культиваторов.....	87
2.1.1 Теоретическое описание диффузионных процессов при хромировании.....	87
2.1.2 Теоретическое обоснование возможности диффузионного хромирования стальной пластины.....	89
2.2 Теоретическое обоснование влияния основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора	92
2.3 Обоснование коэффициента трения рабочего органа культиватора с почвой	97
2.4 Обоснование толщины режущей кромки компенсирующей пластины.....	103
2.5 Обоснование необходимой износостойкости компенсирующей пластины	105
2.6 Обоснование необходимости оценки напряженного состояния культиватора и его рабочих органов	113

Выводы	119
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	120
3.1 Программа исследований	120
3.2 Методика исследования параметров диффузионного хромирования образцов	121
3.2.1 Оборудование и материалы для диффузионного хромирования.....	121
3.2.2 Методика исследования влияния режимов диффузионного хромирования на микротвердость, твердость и микроструктуру образцов	123
3.2.3 Методика сравнительных испытаний образцов на износостойкость.....	127
3.3 Методика исследования напряженного состояния конструкции культиватора	129
3.4 Методика исследования работоспособности рабочих органов культиватора в грунтовом канале.....	131
3.4.1 Общая методика проведения экспериментальных исследований в грунтовом канале.....	131
3.4.2 Грунтовый канал и измерительные приборы для исследования работоспособности рабочих органов культиватора в грунтовом канале.....	136
3.4.3 Методика определения влияния параметров восстановленной лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления почвы.....	140
3.5 Методика оценки степени разрыхления почвы восстановленной лапой методом фрактального анализа.....	144
3.6 Методика проведения полевых испытаний экспериментального культиватора	148
3.7 Методика оценки потребительских свойств культиватора с восстановленными лапами	154
Выводы	156

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ	158
4.1 Исследования физико-механических свойств покрытий, полученных диффузионным хромированием	158
4.1.1 Исследования влияния режимов хромирования на толщину диффузионного слоя	158
4.1.2 Исследования влияния режимов диффузионного хромирования на микротвердость, твердость и микроструктуру образцов	173
4.1.3 Выбор оптимального режима диффузионного хромирования компенсирующей пластины	189
4.1.4. Результаты ускоренных износных испытаний пластин с хромовыми покрытиями	197
4.2 Результаты исследования напряженного состояния конструкции культиватора и прочностного расчета восстановленной лапы	200
4.3 Влияние параметров восстановленной лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления	209
4.4 Результаты оценки степени разрыхления почвы методом фрактального анализа	214
4.5 Результаты полевых испытаний восстановленных стрельчатых лап культиваторов	221
4.6 Результаты оценки потребительских свойств культиваторов с восстановленными лапами	226
Выводы	227
5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	229
5.1 Производственные рекомендации по восстановлению работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин	229
5.1.1 Примерная номенклатура рабочих органов почвообрабатывающих машин для восстановления	229
5.1.2 Технология изготовления пластин для ремонта стрельчатых лап.....	231

5.1.3 Технологический процесс восстановления работоспособности стрельчатых лап культиваторов.....	233
5.2 Экономическая эффективность производственных рекомендаций.....	237
Выводы	241
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	243
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	246
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	249
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	272

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20) и Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017–2030 годы (ФНТП) отмечено, что одним из направлений государственной политики в сфере продовольственной безопасности является технологическая модернизация агропромышленного комплекса, в том числе внедрение новой техники и технологий [1, 2]. Программа предусматривает обновление сельского хозяйства отечественной сельскохозяйственной техникой, в том числе в рамках федерального проекта «Развитие отраслей и техническая модернизация агропромышленного комплекса». Однако работающий парк машин имеет большой износ, а зачастую морально устарел [3]. Поэтому сохраняется рост эксплуатационных издержек, включая увеличение доли затрат на запасные части, особенно для импортной техники. Снизить такие затраты можно путем повышения надежности машин, в частности за счет совершенствования технологий изготовления и ремонта деталей машин почвообрабатывающей техники [4].

Обработка почвы является основополагающим мероприятием сельского хозяйства, от которого во многом зависит урожайность сельскохозяйственных культур. Качественная обработка позволяет сохранить плодородие почвы и создать благоприятные условия для дальнейшего роста культур. К основным операциям, выполняемым почвообрабатывающей техникой, относятся предварительная подготовка почвы, лушение стерни, разделка пластов, обработка почвы после уборки сельскохозяйственных культур, боронование, мульчирование, измельчение и заделка пожнивных остатков, восстановление поверхностного слоя почвы, обработка паров. Однако парк машин для обработки почвы в сельскохозяйственных организациях в последнее время заметно сократился. В структуре парка произошли отклонения от оптимальных параметров, наблюдается абсолютное и относительное сокращение численности машинно-тракторного парка [5–7]. Ограничивающим фактором для дальнейшего наращивания аграрного

производства выступает также недостаточная обеспеченность отечественных сельхозтоваропроизводителей сельскохозяйственной техникой, в том числе почвообрабатывающей. Производство такой техники в последние годы снижается. Например, по данным Минсельхоза России, в 2024 г. на предприятиях Российской Федерации было изготовлено всего 24,1 тыс. ед., культиваторов, что почти на 14 тыс. меньше, чем в 2023 г. По данным Российской ассоциации производителей специализированной техники и оборудования (Росспецмаш), в 2023 г. темпы роста производства российской сельскохозяйственной техники в денежном выражении замедлились почти вдвое, продаж на внутреннем рынке – в 7,5 раза. При этом высока доля зарубежной сельскохозяйственной техники, по некоторым машинам она достигает 85%. В стоимостном выражении в сегменте бóроны, рыхлители, культиваторы импорт такой продукции в Российскую Федерацию составляет около 10%. На российском рынке основными импортными брендами почвообрабатывающей техники являются John Deere, Horsch, Amazone, Lemken и др. [8].

Анализ наличия и структуры парка почвообрабатывающей техники указывает на его моральное и физическое старение, ухудшение технического состояния. Машины для обработки почвы включены в Перечень критической промышленной продукции в отрасли сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации на 2024 год и плановый период 2025 и 2026 годов (утвержден приказом Минпромторга России от 10.04.2024 № 1525). В него вошли различные сельскохозяйственные машины, в том числе для обработки почвы. По прогнозам Минсельхоза России, доля новых отечественных культиваторов в общем парке к 2030 г. должна возрасти до 25%.

Отечественная техника уступает зарубежным образцам по функциональным характеристикам, показателям надежности и прежде всего по наработке на отказ. Установлено, что наименьшая долговечность (150–350 мото-ч) наблюдается у рабочих органов культиваторов, стерневых сеялок и плугов [4]. Анализ эксплуатационно-технологических показателей культиваторов, выполненный исследователями, в том числе в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, показал, что

в среднем наработка на отказ лап культиваторов составляет всего 7–18 га [9]. Это происходит из-за того, что часто используются рабочие органы, технический уровень изготовления которых отстает от передовых отечественных и зарубежных научно-технических достижений. Почвообрабатывающие машины работают в условиях абразивного изнашивания, их долговечность в значительной мере определяется ресурсом рабочих органов [10]. Для повышения ресурса на заводах-изготовителях, в том числе за рубежом, изнашиваемые участки рабочих органов зачастую упрочняют индукционной наплавкой, а для изготовления разработаны и нашли широкое применение борсодержащие марки сталей следующих систем легирования: С-Мп-В, С-Мп-Сr-В, С-Мп-Сr-Нi-В [11]. На необходимость перехода к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанной в том числе на применении новых материалов, указано в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145). Работы по созданию новых технологий повышения ресурса почвообрабатывающей техники проводятся в различных научных и образовательных организациях [12–19]. Результатом этих работ является внедрение перспективных конструкционных и технологических материалов с высокими физико-механическими, функциональными и эксплуатационными свойствами, обеспечивающих снижение экологической нагрузки на окружающую среду, повышение износостойкости, прочности, долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин в 2–3 раза, снижение материалоемкости конструкций. Одним из технологических решений указанной проблемы может стать применение упрочняющей технологии восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием диффузионного хромирования [20]. Данный способ в технической литературе получил название как «термодиффузионное хромирование». Разработан в МГАУ им. В.П. Горячкина (ныне РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) профессором В.В. Бугаевым и его учениками для восстановления и упрочнения различных деталей, в основном топливной аппаратуры.

Степень разработанности темы исследования. Разработкой технологий восстановления и упрочнения режущих органов почвообрабатывающих машин начали заниматься давно. Упрочняющие методы обработки рабочих органов сельскохозяйственных машин, наряду с использованием специальных сталей, применялись в России и за рубежом с середины 1930-х годов. В России работы по наплавке рабочих органов были начаты в 1930-х годах. Наиболее широко в ремонтных условиях распространилась наплавка лемехов сплавом «Сормайт» с применением газового пламени. Большой вклад в развитие и совершенствование способов восстановления и повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих орудий внесли Аулов В. Ф., Ерохин М. Н., Лялякин В. П., Михальченков А. М., Новиков В. С., Колмыков В. А., Коломейченко А. В., Титов В. Н., Сидоров С. А., Зайцев С. А., Шахов В. А., Юдников А. С., Ожегов Н. М., Голубев В. В., Юхин И. А., Бондарева Г. И. и др.

В то же время, в трудах этих ученых неполно рассматриваются вопросы восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием технологии диффузионного хромирования. Вопросами исследования структуры, физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик покрытий, формируемых при диффузионном хромировании, занимались такие ученые, как Бугаев В. Н., Богачев Б. А., Казанцев С. П., Мазаев Ю. В., Сергеев В. З. и др. Однако, несмотря на большой объем выполненных исследований по данной теме, остается ряд нерешенных задач, в том числе установлении влияния технических и технологических решений при восстановлении работоспособности рабочих органов на потребительские свойства почвообрабатывающих машин (качество обработки почвы), в том числе культиваторов.

Научная гипотеза заключается в том, что повышение работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин при восстановлении достигается применением диффузионного хромирования, позволяющего формировать на их режущей кромке покрытия с высокими физико-механическими и

эксплуатационными свойствами и обеспечивать требуемые потребительские свойства почвообрабатывающих машин, включая крошение почвы.

Цель и задачи исследования. Цель исследования восстановление работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин диффузионным хромированием.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Теоретически обосновать возможность использования технологии диффузионного хромирования для восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин.

2. Установить влияние режимов диффузионного хромирования на толщину слоя и физико-механические свойства покрытий.

3. Провести сравнительные испытания на износостойкость стальных пластин после их диффузионного хромирования.

4. Выявить места наиболее напряженного состояния конструкции культиватора и выполнить прочностной расчет лапы

5. Установить влияние углов резания и заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА.

6. Оценить степень разрыхления почвы восстановленной лапой культиватора.

7. Провести полевые испытания восстановленных стрелчатых лап культиватора.

8. Оценить потребительские свойства культиватора с восстановленными лапами.

9. Разработать технологию восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием диффузионного хромирования.

10. Определить экономическую эффективность разработанной технологии восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Объект исследования – технологический процесс восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием диффузионного хромирования.

Предмет исследования – установление зависимостей между параметрами восстановленных рабочих органов с их работоспособностью и потребительскими свойствами почвообрабатывающих машин.

Научную новизну работы составляют:

- зависимости влияния режимов диффузионного хромирования на толщину и физико-механические свойства покрытий;
- модель влияния основных факторов рыхления почвы на тяговое сопротивление культиватора;
- методика исследования напряженного состояния культиватора и прочностного расчета восстановленной лапы;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на степень разрыхления почвы;

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в обосновании механизма формирования покрытий способом диффузионного хромирования;
- в определении оптимальных режимов получения покрытий диффузионным хромированием;
- в обобщении аналитических зависимостей для определения показателей работоспособности восстановленной лапы;
- в выявлении мест наиболее напряженного состояния конструкции культиватора и результатах прочностного расчета лапы;
- в установлении влияния угла резания и угла заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА;
- в установлении влияния углов резания и заострения лапы культиватора на степень разрыхления почвы;

- в оценке потребительских свойств культиваторов с восстановленными лапами;
- в разработке и внедрении технологического процесса восстановления работоспособности рабочих органов культиваторов с использованием диффузионного хромирования (патент РФ на изобретение № 2282677 и патент РФ на полезную модель № 236692).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы фундаментальные положения теории почвообработки, методы математической статистики и планирования экспериментов. Использовались также результаты анализа физико-механических и технологических свойств почв и их влияния на характер изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин; теоретические исследования процесса абразивного изнашивания и разработка на этой основе рабочей гипотезы о факторах влияния на интенсивность изнашивания; экспериментальные исследования в лабораторных условиях износостойкости материалов в зависимости от конструктивных особенностей рабочих органов. Исследования по изучению свойств почвы проводились на грунтовом канале; обработка результатов эксперимента осуществлялась в среде Mathcad, Excel, Word, AutoCAD и других прикладных программ; напряженное состояние конструкции культиватора и прочностной расчет лапы были выполнены с использованием системы Inventor Pro и отечественного графического пакета «Компас».

Положения диссертации, выносимые на защиту:

- механизм формирования покрытий способом диффузионного хромирования;
- зависимости влияния режимов диффузионного хромирования на толщину и физико-механические свойства покрытий;
- оптимальные режимы получения покрытий диффузионным хромированием;
- результаты сравнительных испытаний на износостойкость стальных пластин после диффузионного хромирования;

- методика и результаты исследования напряженного состояния культиватора и прочностного расчета восстановленной лапы;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на тяговое сопротивление культиватора и расход топлива МТА;
- зависимости влияния углов резания и заострения лапы на степень разрыхления почвы;
- результаты полевых испытаний восстановленных рабочих органов культиваторов;
- результаты оценки потребительских свойств культиваторов с восстановленными рабочими органами;
- технологический процесс восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием диффузионного хромирования.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность выполненных в диссертационной работе исследований основана на глубоком анализе выполненных ранее научно-исследовательских работ в данной области науки. Результаты теоретических и экспериментальных исследований имеют высокую сходимость. При проведении экспериментальных исследований использовались апробированный научно-методический аппарат и современное сертифицированное метрологическое оборудование. Все выборки являлись репрезентативными. Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, согласуются с результатами, опубликованными в независимых источниках по тематике исследования, и протоколами испытаний почвообрабатывающих машин и стрельчатых лап культиваторов на машиноиспытательных станциях Минсельхоза России. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных конференциях и семинарах:

- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2026);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2025);

- Международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Российской Федерации» (Рязань, 2025);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2024);
- 75-я юбилейная Международная научно-практическая конференция «Научные приоритеты в АПК: вызовы современности» (Рязань, 2024);
- научно-практическая конференция преподавателей по итогам НИР за 2023 г. «Современные векторы развития науки» (Краснодар, 2024);
- Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К. А. Тимирязева (Москва, 2023);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2023);
- семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (Москва, 2022);
- Международная научно-практическая конференция «Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения» (Санкт-Петербург – Пушкин, 2022);
- VIII Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021);
- Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвящённая 155-летию РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва, 2020);
- национальная научно-практическая конференция «Тенденции инженерно-технологического развития агропромышленного комплекса» (Рязань, 2019).

Реализация результатов исследования.

Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением диффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянксельмаш». Департамент растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России считает результаты научных исследований актуальными и рекомендует организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования, а также заводам сельскохозяйственного машиностроения внедрять их для повышения надёжности и ресурса техники, а также снижения себестоимости изготовления и

восстановления деталей, что особенно актуально в условиях высокой доли изношенной техники в АПК страны. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В. П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Личный вклад автора. Диссертация написана самостоятельно, является обобщением результатов исследований, проведенных с 2002 г. по настоящее время. Автору принадлежат: разработка концепции повышения работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием способа диффузионного хромирования; постановка цели и формулирование задач проводимых исследований; разработка программы и методик исследований; проведение комплекса экспериментальных исследований; формулирование заключения и рекомендаций производству; написание статей и заявок на изобретения Российской Федерации.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 29 научных работах, в том числе 14 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса, статье в издании, входящих в перечень Web of Science, и двух патентах Российской Федерации на изобретение и полезную модель.

Общий объем опубликованных работ составляет 71,9 п.л., из них автору принадлежит 37,1 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 193 источника, и приложений. Основное содержание работы изложено на 315 страницах, включая 102 рисунка и 35 таблиц. Работа также содержит 11 приложений на 44 страницах.

1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ оснащённости сельского хозяйства почвообрабатывающей техникой

Уровень технической оснащённости играет важную роль в развитии сельскохозяйственного производства. Внедрение различных высокотехнологических процессов и оборудования в производственные процессы сельского хозяйства способствует их развитию и усовершенствованию. Применение инновационной почвообрабатывающей техники и оборудования, а также полная автоматизация технологических операций значительно облегчают тяжёлый физический труд и увеличивают объёмы работ при сохраняющихся затратах на почвообработку посевных площадей. Динамика посевных площадей сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Российской Федерации показана на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Динамика посевных площадей сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Российской Федерации, тыс. га

Количество машин для обработки почвы в сельскохозяйственных организациях в последнее время заметно сократилось.

Например, по данным Росстата, в Саратовской области число культиваторов на 100 тракторов на конец 2024 г. составило 40 шт. (рисунок 1.2).

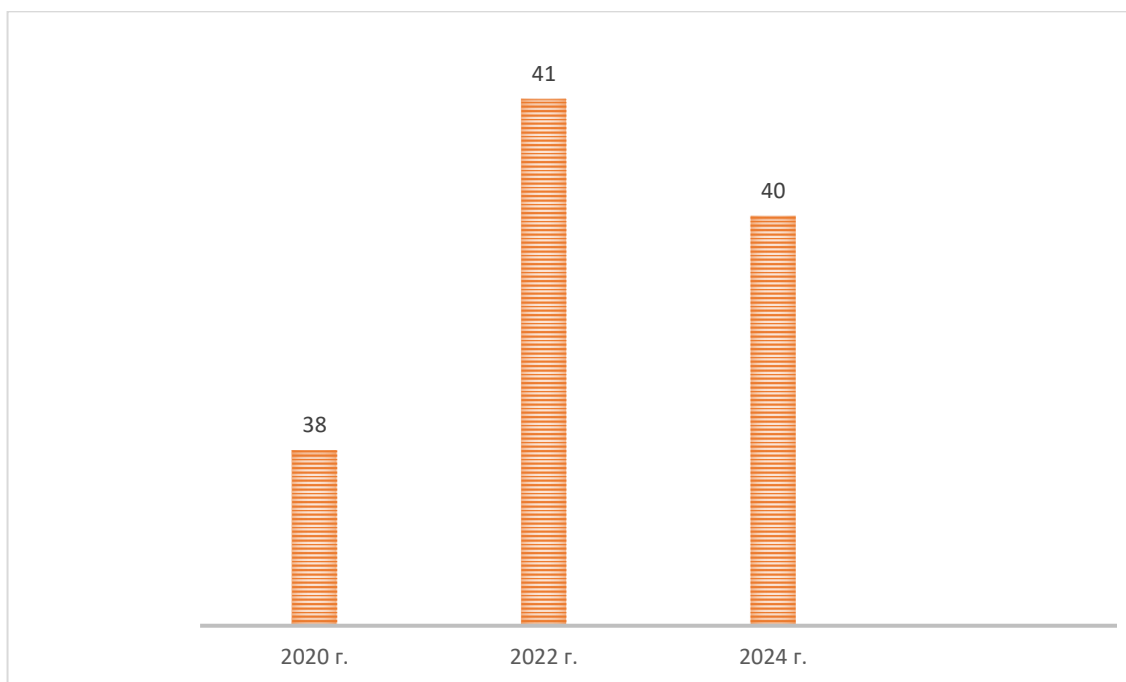


Рисунок 1.2 – Динамика количества культиваторов на 100 тракторов в Саратовской области, ед.

В структуре парка такой техники произошли отклонения от оптимальных параметров, наблюдается абсолютное и относительное сокращение численности машинно-тракторного парка, его моральное и физическое старение, ухудшение технического состояния [7]. Современный сельскохозяйственный рынок предлагает широкий ассортимент почвообрабатывающей техники. В Российской Федерации насчитывается более 30 предприятий-изготовителей техники для обработки почвы: ПАО «Грязинский культиваторный завод», АО «Алтайский завод сельскохозяйственного машиностроения», ПАО «Миллеровосельмаш», ООО АО «Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», АО «Башагромаш», ООО «Агро», ООО «БДМ-Агро»,

АО «Белинксельмаш», ЗАО «Рубцовский завод запасных частей», ООО «Сельмаш» и др. [6, 7].

По данным Российской ассоциации производителей специализированной техники и оборудования (Росспецмаш), в 2023 г. темпы роста производства российской сельскохозяйственной техники в денежном выражении замедлились почти вдвое, продаж на внутреннем рынке – в 7,5 раза. Количество приобретенных плугов в 2023 г. уменьшилось на 3,3% к уровню 2022 г. В 2023 г. было приобретено 2119 плугов, из них 42% отечественного производства, в 2022 г. – 2645, из них 84% отечественного производства. На протяжении последних трех лет в России наблюдается подъём производства культиваторов [7, 21].

В последние годы, по сравнению с предыдущими, в сельскохозяйственных организациях произошел спад наличия основных видов плугов и культиваторов [21]. По данным Росспецмаша, в первом полугодии 2023 г. отечественными производителями было выпущено меньше на 27,1% сеялок (2759 ед.), на 28,4% – борон (2623 ед.), на 20,4% – плугов (1560 ед.), на 43,8% – тракторов (2868 ед.). Динамика объёмов производства некоторых категорий сельхозтехники приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Динамика объёмов производства некоторых категорий сельхозтехники в Российской Федерации, ед.

Наименование	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Плуги общего назначения	51,1	43,5	41,8	50,9
Сеялки	14,7	13,6	11,9	8,2

Динамика производства культиваторов в Российской Федерации показана на рисунке 1.3.

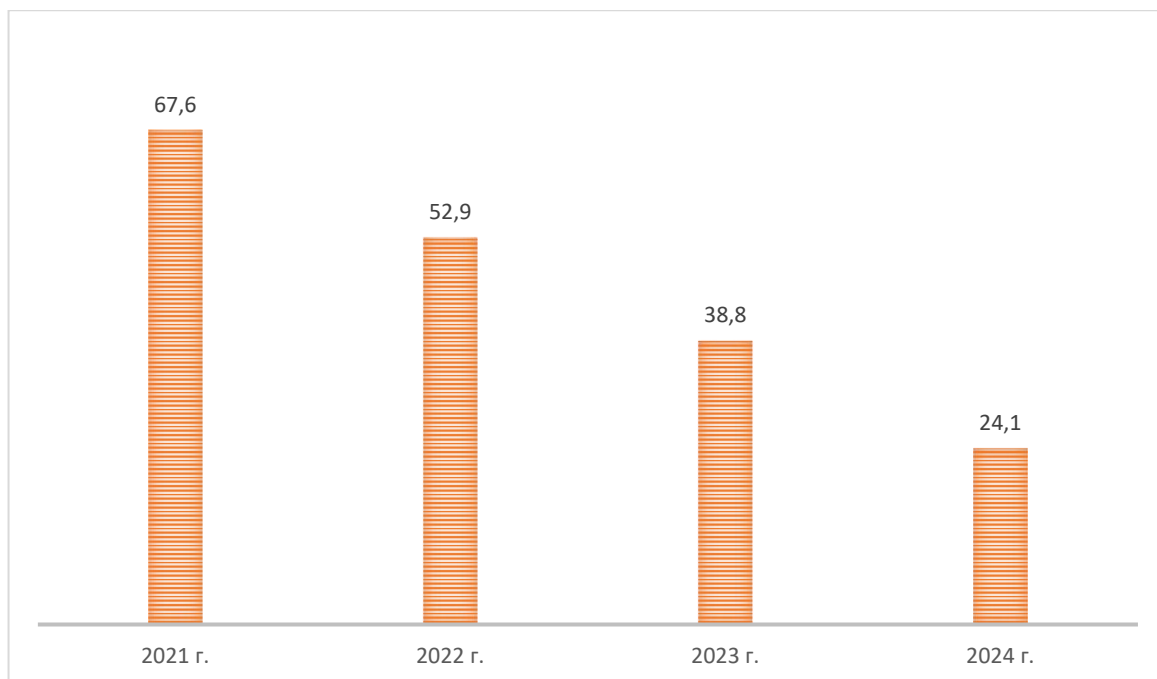


Рисунок 1.3 – Динамика производства культиваторов в Российской Федерации, тыс. ед.

Анализ оснащённости сельского хозяйства почвообрабатывающей техникой показал, что в структуре парка высока доля зарубежных машин. Это бороны, рыхлители, культиваторы, плуги и др. Основные импортные бренды почвообрабатывающей техники John Deere, Horsch, Amazone, Lemken Sunflower, Salford, WilRich, Landol. Однако в последние годы крупнейшие мировые бренды покинули российский рынок либо существенно сократили экспорт в Россию. Эти проблемы непосредственно коснулись АПК страны в части производства сельскохозяйственной техники [22, 23].

Перед отечественными производителями сельскохозяйственной техники стоит сложная задача: с одной стороны, необходимо наращивать объёмы производства и расширять номенклатурный ряд техники и оборудования, чтобы обеспечить внутренний спрос, а с другой – производимая техника должна отвечать всем необходимым критериям качества и не уступать импортной. До 2022 г. на рынке было много импортной сельскохозяйственной техники, которая пользовалась большим спросом у сельхозтоваропроизводителей, а после ухода многих мировых лидеров структура рынка изменилась (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Структура внутреннего рынка сельскохозяйственной техники в России, %

Показатели	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Рынок сельскохозяйственной техники, всего	100	100	100	100	100
Доля российской сельскохозяйственной техники на внутреннем рынке	60	54	58	51	61
Доля иностранной сельскохозяйственной техники на внутреннем рынке	40	46	42	49	39

Так, по данным таблицы 1.2 видно, что за анализируемый период происходили изменения долей сельскохозяйственной техники отечественного производства и импортной техники на внутреннем рынке [23]. С 2018 по 2021 год снижение доли сельскохозяйственной техники отечественного производства на внутреннем рынке. В 2022 г. отмечался рост данного показателя. Доля иностранной сельскохозяйственной техники на внутреннем рынке с 2018 по 2021 год имела тенденцию роста. В 2022 г. данный показатель снизился до 39%, что соответствует показателю 2018 г. (см. таблицу 1.2).

Наиболее активными поставщиками плугов на российский рынок были Франция (5,2 млн долл.), Германия (3,5 млн долл.) и Беларусь (1,2 млн долл.). Наиболее существенный рост ввоза товара в Россию был зафиксирован в 2016 г., объём операций увеличился на 63,51% по отношению к предыдущему году (с 16,92 до 27,66 млн долл.). Структура ведущих стран-отправителей борон в Россию за

2019 г. выглядела следующим образом: Германия – 50,52%, Франция – 10,12%, Румыния – 7,51% [7].

По данным Росстата, в 2024 г. отечественная промышленность произвела порядка 24,1 тыс. ед. сельскохозяйственных культиваторов, что примерно на 38,0%, или почти на 17 тыс. ед. ниже показателей аналогичного периода предыдущего года. Наибольший вклад в общее производство сельскохозяйственной техники внес Центральный федеральный округ (его доля составила около 64,1%), заняв лидирующие позиции среди остальных федеральных округов Российской Федерации. За последние три года – с 2022 по 2024 год включительно – прослеживается устойчивая тенденция роста цен на сельскохозяйственную технику данного типа.

1.2 Технические характеристики некоторых почвообрабатывающих машин и их потребительские свойства

Плуги. По конструкции корпусов различают лемешные, дисковые комбинированные и чизельные плуги. Лемешные плуги применяются для вспашки почвы с оборотом пласта. Подразделяются на плуги общего назначения (для вспашки старопахотных земель) и специальные (для каменистых почв, кустарниково-болотные, плантажные, садовые, ярусные и др.) [6, 7].

Активное применение нашли плуги полунавесные оборотные с регулируемой шириной захвата PERESVET ППО-8-35, ПОН-4+1, плуги FINIST ПЛН-8-35, ПЛНУ-8х40, плуги оборотные модульные «Сириус» ПОМ-4/7, ПОМ-6+1+1, плуг навесной ПЛН-8-40 «Сарыч» и др. [6, 7]. Дисковые плуги используют для вспашки тяжелых, пересохших и переувлажненных почв, комбинированные – тяжелых почв с одновременным интенсивным рыхлением почвенного пласта. Чизельные плуги (глубокорыхлители) лишь условно относятся к плугам, так как во время их работы не предусмотрен оборот пласта. Технические характеристики некоторых плугов даны в таблицах 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3 – Технические характеристики некоторых плугов общего назначения

Показатели	ЗАО «Рубцовский завод запасных частей»	ООО «Волгаагромаш»	ПАО «Грязинский культиваторный завод»
	Плуг оборотный навесной PERESVET ПОН-4	Плуг оборотный модульный «СИРИУС» ПОМ-4/7	Плуг полунавесной оборотный ППО- 5 (4+1) ON LAND
Производительность, га/ч	1,08–1,44	1,8–3,15	1,59–2,4
Глубина обработки, см	20–30	20–27	15–30
Рабочая скорость, км/ч	7–9	7–9	8
Ширина захвата, м	1,2–1,6	1,4–3,5	1,75–2,4
Габаритные размеры, мм	3600×2050×1650	12000×4200×2200	–
Масса, кг	1285		3070

Таблица 1. 4 – Технические характеристики некоторых чизельных плугов

Показатели	ЗАО «Рубцовский завод запасных частей»	АО «БашАгроМаш»	ООО «БДМ-Агро»
	Плуг чизельный SVAROG ПЧ-4,5	Плуг чизельный ПЧН-3	Плуг чизельный навесной ПЧН-4,5
Производительность, га/ч	До 4	1,5–2,2	3,6
Глубина обработки, см	30–45	50	45
Рабочая скорость, км/ч	До 10	8-12	12
Ширина захвата, м	4,4–4,5	3,0	4,5
Габаритные размеры, мм	2830×4500×1950	3430×2160×1840	3410×5050×1900
Масса, кг	2646	1500	1920

Бороны. Боронование обеспечивает рыхление верхнего слоя почвы, выравнивание поверхности поля, разрушение почвенной корки, крошение комков, уничтожение сорняков, заделку семян и удобрений. Можно проводить отдельно или одновременно со вспашкой, культивацией, посевом или другими приемами, например, предпосевное боронование чаще совмещают с культивацией и применяют для рыхления и выравнивания почвы, заделки удобрений и подготовки ложа для семян. Бороны бывают зубовые, роторные, дисковые и т.д.; в зависимости от массы, приходящейся на один зуб или диск, – тяжелые, средние и легкие.

Различают бороны с жесткой и шарнирной рамами, составленными из отдельных, соединенных между собой звеньев. Они хорошо приспособляются к микрорельефу поля и обеспечивают равномерное заглубление всех зубьев.

Посредством сцепок из борон составляют широкозахватные агрегаты для работы с тракторами тяговых классов 3–5 или присоединяют их к плугам, культиваторам, сеялкам и комбинированным агрегатам. Ротационные бороны имеют вращающийся рабочий орган, снабженный прутками, зубьями или планками. Рабочими органами дисковых борон являются стальные заостренные сферические диски со сплошной или вырезной режущей кромкой.

По интенсивности воздействия на почву различают бороны легкие, снабженные дисками со сплошной режущей кромкой, и тяжелые с вырезными дисками. Дисковые бороны, рабочие органы которых установлены на индивидуальных стойках, называются дискаторами, дискователями, дисковыми мульчировщиками и др. [6, 7]. Технические характеристики некоторых дисковых борон даны в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Технические характеристики некоторых дисковых борон

Показатели	ООО «БДМ-Агро»	АО «Белинксельмаш»	АО РТП «Петровское»
	Борона дисковая (дискатор) БДМ 2,8×4П	Борона дисковая PALLADA 4000	Борона дисковая БД-6,6
1	2	3	4
Производительность, га/ч	3,08	4,4	4,5–6,3
Глубина обработки, см	До 15	12	20
Рабочая скорость, км/ч	До 15	12	9–12
Ширина захвата, м	2,8	4	6,4

Окончание таблицы 1.5

1	2	3	4
Габаритные размеры, мм	6500×3150×1030	4900×4110×1295	6830×7100×1800
Масса, кг	2600	2130	6500

Культиваторы. Одним из видов обработки почв является их культиваторная обработка, т.е. рыхление верхних слоев с удалением сорняковой растительности, препятствующей нормальному росту культуры [24–29]. Полевые культиваторы с шириной захвата до 2–2,5 м обычно снабжены жестким креплением рабочих органов к раме, а 2,5–4 м – шарнирным. Это связано с тем, что при большой ширине захвата рабочие органы не всегда могут обеспечивать требуемую глубину обработки почвы из-за рельефа поверхности поля. Жесткое крепление лап обеспечивает лучшее подрезание сорняков и получение ровного дна борозды, но такое крепление не всегда способствует копированию микрорельефа поля.

Шарнирная установка лап на раму культиватора способствует лучшему приспособлению лап к рельефу поля и снижает процесс накопления сорняков на рабочей поверхности элементов культиватора. Это объясняется тем, что шарнирное соединение поводков допускает их незначительное движение в вертикальной плоскости, приводящее к встряхиванию сформировавшейся на рабочей поверхности сорняковой кучи. В то же время даже незначительное шарнирное изменение положения рабочего органа в пространстве несколько нарушает расчетные проектные значения рабочих углов и глубины обработки почвы, что в некоторых случаях приводит к необходимости изменения величины перекрытия между лапами для поддержания полного подрезания корневой системы сорняков [30–33]. Культивацию проводят для рыхления почвы без ее оборачивания и уничтожения сорняков при подготовке к посеву, во время ухода за парами и посевами [6, 7]. Для этого применяют различные марки культиваторов, в том числе для сплошной обработки почвы и универсальные (рисунок 1.4, таблицы 1.6 и 1.7).



Рисунок 1.4 – Культиватор секционный универсальный КСУ-15 «Алтай»

Таблица 1.6 – Сведения о культиваторах, изготавливаемых на предприятиях Российской Федерации

Наименование (марка, модель, модификация)	Производитель
1	2
Культиватор КСПО-1050	ООО «Агроцентр»
Культиватор предпосевной средний Tillermaster 14000	ООО «Производственная компания «Агромастер»
Средний предпосевной культиватор Tillermaster 16000	ООО «Производственная компания «Агромастер»
Средний предпосевной культиватор Tillermaster 9800	ООО «Производственная компания «Агромастер»
Культиватор Landmaster 4800	ООО «Производственная компания «Агромастер»
Культиватор секционный универсальный КСУ-15 «АЛТАЙ»	АО «Алтайский научно- исследовательский институт технологии машиностроения»

Продолжение таблицы 1.6

1	2
Культиватор-гребнеобразователь «Иксион» 4х75	ООО «Колнаг»
Культиватор навесной для междурядной обработки и подкормки посевов пропашных культур КПМ-5,6-01	ПАО «Миллеровосельмаш»
Культиватор для сплошной обработки почвы универсальный КС-14М	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор предпосевной для пропашных культур КППК-9,6	АО «Агропромтехника» (Ставропольский край)
Культиватор универсальный пропашной КУП- 5,6	АО «Агропромтехника» (Ставропольский край)
Культиватор для сплошной обработки почвы универсальный КС-10М	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор КСПО-850	ООО «Агроцентр»
Культиватор междурядной обработки КМО-11	ОАО «Белагромаш-Сервис имени В.М. Рязанова»
Культиватор сплошной торговой марки Solar Fields серии КС, модель КС-14 (У) EURO	ООО «Промагротехнологии»
Культиватор сплошной торговой марки Solar Fields серии КС, модель КС-10 (У) EURO	ООО «Промагротехнологии»
Культиватор полевой с плавающей сцепкой модели 2210LL	ООО «Джон Дир Русь»
Культиватор модульный прицепной КМП-14	ООО «Волгаагромаш»
Культиватор «Кузбасс» К-8,5	ООО «Агро»
Культиватор КПП-12,0	АО РТП «Петровское»

Продолжение таблицы 1.6

1	2
Культиватор сплошной торговой марки Solar Fields серии КС, модель КС-8 (У) EURO	ООО «Промагротехнологии»
Культиватор сплошной торговой марки Solar Fields серии КС, модель КС-12 (У) EURO	ООО «Промагротехнологии»
Широкозахватный культиватор комбинированный скоростной сплошной обработки почвы КСК-10,0	АО «Агропромтехника» (Ставропольский край)
Культиватор универсальный для сплошной обработки марки «Диас» БПК-12-230-Б-ШКСП	ООО «Диас»
Культиватор КСО-9,6	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор стрельчатый предпосевной широкозахватный КСПШ-4	ООО «Завод имени Медведева – Машиностроение»
Культиватор КПП-5Б	ООО «Агроцентр»
Средний предпосевной культиватор Tillermaster 8300	ООО «ПК «Агромастер»
Средний предпосевной культиватор Tillermaster 12000	ООО «ПК «Агромастер»
Культиватор КС-8М	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор для сплошной обработки почвы КСП-8 К10 «Чеглок»	АО «Корммаш»
Культиватор КСО-6МТ	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор КС-12М	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор дисковый комбинированный марки КДК-4	ООО «Завод имени Медведева – Машиностроение»
Культиватор для сплошной обработки почвы К-12200	АО «Клевер»

Окончание таблицы 1.6

1	2
Культиватор скоростной комбинированный предпосевной КСКП-8	АО «Агропромтехника» (Ставропольский край)
Культиватор КС-8А	ООО «БДМ-Агро»
Культиватор КП-12,0А	АО РТП «Петровское»
Средний предпосевной культиватор Tillermaster-18000	ООО «ПК «Агромастер»
Культиватор универсальный для сплошной обработки марки «Диас» БПК-8-230-Б-ШКСП	ООО «Диас»

Таблица 1.7 – Технические характеристики некоторых культиваторов

Показатели	ООО «Агроцентр»	ООО «БДМ-Агро»	ОАО «Белагромаш- Сервис имени В.М. Рязанова»
	КСПО-850	КСО-9,6	КПС-6
Производительность, га/ч	От 8,5	10,56	До 14,5
Глубина обработки, см	4–12	До 8	До 15
Рабочая скорость, км/ч	8–12	12	До 16
Ширина захвата, м	8,4	9,6	6
Габаритные размеры, мм	8100×8500×1500	5820×9800×980	6300×6600×2200
Масса, кг	4200	3600	4000

Параметры, по которым оценивают функциональные характеристики (потребительские свойства) и эффективность почвообрабатывающей техники конкретизированы (сформулированы в постановлении Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования») определен перечень критериев (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Перечень критериев определения функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования (утвержден постановлением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740)

Почвообрабатывающая техника	Параметры для оценки
Плуги общего назначения	Глубина обработки, см
	Крошение почвы, процент комков размером до 50 мм включительно, не менее
	Полнота заделки растительных и пожнивных остатков, %, не менее
	Глубина заделки растительных и пожнивных остатков, см, не менее
	Гребнистость поверхности почвы, см, не более
	Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее
Дисковые бороны легкие	Глубина обработки, см, не менее
	Крошение почвы, комки размером до 25 мм включительно, %, не менее
	Подрезание сорняков, %, не менее

Окончание таблицы 1.8

Почвообрабатывающая техника	Параметры для оценки
Дисковые бороны легкие	Гребнистость поверхности почвы, см, не более
Дисковые бороны легкие	Полнота заделки растительных остатков, %, не менее
	Измельчение пожнивных остатков крупностебельных культур, фракции размером до 25 см, %, не менее
	Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее
Культиваторы для сплошной обработки почвы (лаповые)	Глубина обработки, см
	Крошение почвы, комки размером до 25 мм включительно, %, не менее
	Крошение почвы, комки размером свыше 100 мм, %, не более
	Подрезание сорняков, %, не менее
	Гребнистость поверхности почвы, см, не более
	Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее

Основными потребительскими свойствами культиваторов являются качество обработки (глубина обработки и крошение почвы, подрезание сорняков, гребнистость поверхности почвы, надежность машин (наработка на отказ

единичного изделия). Для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования в соответствии с Приказом Минсельхоза России от 18 декабря 2018 г. № 573 «Способы проведения испытаний для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования» на машиноиспытательных станциях Минсельхоза России испытаны различные марки культиваторов. Результаты испытаний некоторых культиваторов для обработки почвы даны в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Результаты испытаний некоторых культиваторов для обработки почвы

Параметры	Значение параметра в Перечне критериев	КС-10М	КСУ-15 «АЛТАЙ»
Глубина обработки, см	4–12	4–12	6
Крошение почвы, %, не менее: комки размером до 25 мм включительно	80	91,13	97,4
комки размером свыше 100 мм	0	0	0
Подрезание сорняков, %, не менее	100	100	100
Гребнистость поверхности почвы, см, не более	4	1,1	1,6
Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее	120	120	130

Анализ результатов испытаний показал, что у культиваторов имеются отклонения от нормативных показателей, в том числе по качеству обработки почвы и показателям надежности [5].

1.3 Характеристики рабочих органов некоторых почвообрабатывающих машин

Типовыми представителями рабочих органов, используемых на почвообрабатывающих и посевных агрегатах, являются лемехи, долота, крылья и грудь отвала, полевые доски, оборотные лапы, стрелчатые лапы, зубья и диски борон, диски и клинья сошников. Они определяют технический уровень выше указанных агрегатов в целом. Среди разновидностей плужных лемехов наибольшее распространение получили долотообразные лемехи, у которых носовая часть выполнена в форме долота, что способствует улучшению таких показателей, как заглубляющая способность, тяговое сопротивление, агротехника пахоты. Следует отметить, что, например, у плугов компании Lemken они могут быть накладными [5].

Рабочими органами зубовых борон являются зубья, которые по конструкции подразделяются на прямые, лапчатые и изогнутые с пружинящей стойкой, а также с квадратным, круглым, прямоугольным сечениями. Рабочими органами глубокорыхлителей являются стойки и долота, а также стрелчатые лапы – широко используемые рабочие органы культиваторов, сеялок, посевных комплексов и других почвообрабатывающих машин. Стрелчатые лапы бывают плоскорежущими и универсальными. Последние одновременно с подрезанием сорных растений производят рыхление почвы (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Лапа культиваторная стрельчатая

К параметрам характеристики стрельчатых лап относят массу, ширину захвата, высоту, толщину крыльев, расстояние между отверстиями, диаметр крепежных отверстий. Например, для лапы культиватора КПС-4 ширина захвата составляет 270 мм, высота – 61 мм, толщина крыльев – 6 мм, расстояние между отверстиями – 45 мм, диаметр крепежных отверстий – 11 мм, масса – 1,15 кг.

1.4 Износостойкость рабочих органов почвообрабатывающей техники и направления ее повышения

При эксплуатации машин рабочие органы обеспечивают работоспособность и выполнение заданных функций при условии, что значения конструктивных параметров не превышают допустимых пределов отклонений, соответствующих конструкторской документации. Такое состояние определяется термином «предельный размер». Оно характеризуется размерами, при которых эксплуатация машины должна быть прекращена во избежание аварийной поломки или резкого ухудшения технико-экономических показателей её работы. Совокупность признаков, приводящих к изменению размеров, формы или износа рабочих поверхностей и вызывающих переход в неработоспособное состояние, называется критерием предельного состояния.

Для выявления наступления первого и последующих признаков ведутся наблюдение и регистрация изнашивания по всем изучаемым параметрам и изменениям показателей качества обработки почвы, а также технико-эксплуатационных показателей машины. На основании этого предельный износ устанавливается исходя из трёх критериев: техническое состояние, качество обработки – соответствие функциональным характеристикам (потребительским свойствам), экономический. Технический критерий устанавливается по предельному значению износа детали и оценивается такими признаками, как возрастание интенсивности её изнашивания после достижения определенной наработки, нарушение работоспособности. Критерий качества определяется агротехническими требованиями, например глубиной, качеством обработки почвы и др. Экономический критерий используется при оценке целесообразности эксплуатации машины исходя из минимума суммарных затрат на единицу выполненных работ, в том числе стоимости расхода топлива.

Анализ результатов диссертационных исследований разных авторов показал, что надежность почвообрабатывающей техники определяется ресурсом рабочих органов [34–42]. Нарботка на отказ некоторых отечественных плугов, испытанных на машиноиспытательных станциях, ниже зарубежных (таблица 1.10).

По данным Сабуркина Д.А., у 88% лемехов основной причиной отказов является абразивный износ [34]. Юдников А.С. утверждает, что износостойкость деталей почвообрабатывающей техники отечественного производства из-за низкой твердости рабочих органов (45–48 HRC после термообработки, например, дисков борон из стали 65Г) не обеспечивает их достаточный ресурс. Объемная закалка или ТВЧ не обеспечивают самозатачивание лезвия деталей [35]. Зайцевым С.А. было проанализировано влияние технического состояния рабочих органов почвообрабатывающих машин на качество выполняемых ими работ, условия работы и причины, приводящие к потере работоспособности, способы их упрочнения и восстановления. Анализ износов рабочих поверхностей лап культиватора КППШ-6 показал, что после наработки ими 30 га на один рабочий орган, их максимальный износ колеблется от 8,1 до 10,9 мм. Установлено, что 100%

продефектованных рабочих поверхностей деталей требуют восстановления. Поэтому для увеличения износостойкости целесообразно их упрочнять [36].

Таблица 1.10 – Нарботка на отказ плугов, испытанных на машиноиспытательных станциях

Марка плуга	Нарботка на отказ, ч	Машиноиспытательная станция
ПОН-4/5-35	157	Алтайская МИС
ППО-5/6-35	151	Алтайская МИС
ППО-5/7-35	153	Алтайская МИС
ППО-6+3	92,5	Алтайская МИС
«Агритекс» ПНО-4	100	Владимирская МИС
ППО-4+1-40К	127	Владимирская МИС
Euro Diamant Lemken	308	Северо-Западная МИС и Северо-Кавказская МИС
Kverneland RN-100-8	153	Владимирская МИС

Микрометраж стрелчатых лап разных производителей, установленных на культиватор 2КПС-4 и испытанных в ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция» показал, что при наработке 220 га (7,3 га на одну лапу):

– для стрелчатых лап фирмы «Велес» износ ширины крыла лап составил 0,2 и 0,3 мм (левое крыло) и 0,1 и 0,5 мм (правое крыло), износ длины носка от первого крепежного отверстия лап до носка – 1,3 и 1,6 мм, износ по массе лап – 4,0 и 5,0 г;

– для стрелчатых лап «СИБАГРОМАШ» износ ширины левого крыла лап составил 1,0 и 1,2 мм, правого крыла лап – 0,6 и 0,9 мм, износ длины носка от первого крепежного отверстия до носка лап – 3,8 и 5,8 мм, износ по массе лап – 132,5 и 170 г;

– для стрелчатых лап ООО «Юрий-БС» износ ширины левого крыла лап составил 0,3 мм, правого крыла – 1,7 и 2,2 мм, износ длины носка от первого крепежного отверстия до носка лап – 1,7 и 7,5 мм, износ по массе – 47 и 81 г;

– для стрелчатых лап ООО «НПП «Валок» износ ширины левого крыла лап составил 0,7 и 2,8 мм, правого крыла лап – 2,7 и 0,9 мм, износ длины носка от первого крепежного отверстия до носка лап – 5,1 и 3,7 мм, износ по массе – 25 и 13 г.

По мнению Петрова М.Ю. [37], рабочие органы выходят из строя в основном по причине быстрого абразивного изнашивания в результате контакта с нефиксированной абразивной средой – почвой. Интенсивность изнашивания при этом зависит от механического состава почвы, влажности, соотношения твёрдости абразива и материала изнашиваемой детали, структуры материала рабочей поверхности детали и от давления почвы на рабочий орган. Твёрдость кварцевых частиц, которые составляют основу почвы, существенно превышает твёрдость материалов, из которых изготавливают рабочие органы. При таком соотношении с поверхности детали идёт непрерывный и значительный съём металла в процессе эксплуатации [37].

В работах ряда ученых, в том числе РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, установлены характер абразивного износа и его закономерности. Процесс абразивного износа носит характер микрорезания твёрдыми абразивными частицами и усталостного разрушения микрообъёмов. Исследования процессов изнашивания показывают, что интенсивность их протекания зависит от скорости процесса разрушения микрообъёма материала при каждом элементарном акте взаимодействия пятен контакта. Лезвие почворезущих рабочих органов в процессе эксплуатации теряет вследствие абразивного изнашивания свою работоспособность, и для устранения износа его необходимо восстанавливать. Основными видами изнашивания плоских поверхностей рабочих органов сельскохозяйственной техники являются: абразивное – 47%, при фреттинг-коррозии – 16%, при схватывании – 14% и прочие – 23%. При этом характерной особенностью большинства таких деталей считается значительная величина

износа, которая для многих деталей может достигать до 2–3 мм, а в некоторых случаях и до потери формы.

По данным ГИЦ Минсельхоза России, плуги должны иметь наработку на отказ не менее 100 ч. Однако эксплуатационно-технологические показатели плугов не всегда отвечают заявленным производителем потребительским свойствам. Это происходит из-за того, что часто используются рабочие органы, у которых технический уровень изготовления далёк от передовых научно-технических достижений. Почвообрабатывающие машины работают в условиях абразивного изнашивания, их долговечность в значительной мере определяется ресурсом рабочих органов [43]. Анализ эксплуатационно-технологических показателей плугов отечественных и зарубежных производителей, выполненных Серовым Н.В. в РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, показал, что в среднем наработка на отказ лемехов долотообразной формы до 20 га, а полевых досок – до 60 га (фирма Vogel&Noot, Австрия) с наработкой на отказ менее 100 ч работы. Испытания серийных плугов показывают, что в среднем наработка на отказ лемеха типа П-702, учитывая типы почв и их физические свойства, колеблется от 5 до 20 га, крыла отвала – от 40 до 270 га, груди отвала – от 10 до 100 га, полевой доски – от 20 до 60 га. Изнашиваются и другие рабочие органы почвообрабатывающих машин: лапы культиваторов – 7–18 га, дисковые бороны и диски лушительников – 8–20 га [9].

Таким образом, почвообрабатывающие машины работают в условиях абразивного изнашивания, и их долговечность в значительной мере определяется ресурсом рабочих органов. Для повышения надежности почвообрабатывающей техники многие исследователи, в том числе Агеева Е.В., Серов Н.В., Козырев В.В., Лисунов Е.А., Лялякин В.П., Новиков В.С., Орлов Б.Н., Сидоров С.А. предлагают различные способы увеличения долговечности рабочих органов. Они рассмотрены в работах [44–51]. Для повышения износостойкости и долговечности рабочих органов разработаны и на заводах-изготовителях почвообрабатывающей техники применяются различные материалы и технологии упрочнения [52]. Основные способы упрочнения рабочих органов, на основании анализа литературных источников, представлены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Основные способы упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники

Анализ направлений повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин позволил выделить три направления: новые материалы для изготовления рабочих органов; упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин при их изготовлении; повышение долговечности рабочих органов при их ремонте. В ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева считают, что основными направлениями обеспечения долговечности деталей плужных корпусов являются:

– материаловедческое, за счёт применения более износостойких и прочных материалов при изготовлении и упрочнении;

- конструкционное, за счёт создания таких конструкционных форм, при которых значительный износ не вызовет изменения служебных характеристик;
- технологическое, за счёт создания на наиболее изнашиваемых участках условий трения «почва–почва» вместо «почва–металл» [48].

Исследованиями учёных установлено, что путём оптимизации конструкционных параметров технически возможно повышение ресурса лемехов, отвалов, лап, зубьев бороны и других рабочих органов почвообрабатывающих машин в 2–4 раза и более при снижении удельной материалоемкости до 3–5 раз. Результаты исследований показали, что придание рабочим частям режущих самозатачивающихся деталей рациональных параметров обеспечивает повышение их срока службы в 2,5–4 раза. Применение в двухъярусных плугах лемехов с рациональными параметрами позволяет увеличить ресурс лемеха, повысить качественные показатели работы, снизить затраты топливосмазочных материалов, обеспечить рост производительности агрегата за счёт сокращения числа простоев по техническим причинам [53].

Новые материалы для изготовления рабочих органов разработаны в ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ГНЦ ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, ОАО АНИТИМ, ФГБОУ ВО ВолгГТУ», ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ» и других научных и образовательных организациях [54–63]. В процессе эксплуатации рабочие органы плуга интенсивно изнашиваются. Главная причина такого изнашивания заключается в том, что твердость частиц, находящихся в составе почвы, превосходит твердость материалов, применяемых для изготовления и упрочнения рабочих органов. Увеличению сроков службы рабочих органов сельскохозяйственных машин способствует повышение износостойкости лезвий с обеспечением их самозатачивания путём упрочнения различными сплавами или термообработкой.

В настоящее время основным методом упрочнения рабочих органов сельхозмашин (ножи, молотки, лемехи, стрелчатые лапы, долота анкерных сошников и др.) является индукционная наплавка (далее – ИН) твёрдых сплавов (далее – ТС), а упрочняющими материалами – высокохромистые белые чугуны и

порошковые смеси (материалы систем Fe-Cr-C), в которых доля хрома может достигать 25–30%. Это известные материалы: Сормайт-1,2; ПГ-УС, ПС, ПГС и пр. Материалы, технология и оснастка, разработанные в 1970-1980-х годах доступны, производительны и получили широкое распространение в отрасли. Однако в настоящее время ТС исчерпали свой потенциальный ресурс таких потребительских свойств, как твердость и износостойкость, не отвечают требованиям современного сельхозпроизводства (возросшие требования к ресурсу, скорости движения МТА, интенсивности эксплуатации, энергонасыщенности, стоимости, доступности) и требуют замены. При этом замена ТС на другие материалы потребует коренного технического и технологического переоснащения отрасли, что повысит себестоимость продукции.

1.5 Анализ материалов для изготовления рабочих органов почвообрабатывающей техники

В настоящее время в отечественном сельскохозяйственном машиностроении рабочие органы почвообрабатывающих машин изготавливаются из трёх основных видов сталей: 65Г, 45, Л53, износостойкость и прочность которых невысоки [10, 18]. Для повышения их ресурса на заводах-изготовителях, в том числе за рубежом, изнашиваемые участки рабочих органов зачастую упрочняют индукционной наплавкой, а для изготовления разработаны и нашли широкое применение борсодержащие марки сталей [15, 64–67]. Особенности борсодержащей стали являются её высокая технологическая пластичность, благоприятное соотношение прочностных и пластических свойств в отожженном и термоупрочнённом состояниях, а также высокий уровень характеристик прокаливаемости при значительно меньшем, чем в легированных сталях, содержании дефицитных легирующих элементов (Ni, Cr, Mn, Mo и др.) [68].

В отечественной практике разработаны и широко применяются борсодержащие марки сталей следующих систем легирования: С-Mn-B, С-Mn-Cr-B, С-Mn-Cr-Ni-B. Однако, несмотря на видимые преимущества борсодержащей стали, её внедрение в массовое производство сдерживается некоторыми

технологическими трудностями, к числу которых следует отнести необходимость тщательной подготовки расплава перед введением бора по таким примесям, как кислород и азот, с целью максимального сокращения возможности связывания бора с этими элементами. Этим, как правило, и объясняется достаточно низкая доля потребления борсодержащей стали [11].

Сопоставление химического состава и твердости рабочих органов, изготовленных ведущими зарубежными фирмами, с показателями аналогичной продукции отечественного производства подтверждает, что рабочие органы, выпускаемые в США, Англии, Франции, ФРГ, значительно превосходят российские аналоги по прочности и имеют на 20–30% выше износостойкость [10, 43]. Для практического применения при упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин рекомендованы чугун марки ИБЧ 300Х9Ф6 и корундовая керамика марок Б-11, ТК-Г и «Лунат-2». Наиболее приемлемой маркой стали для изготовления лемеха и других режущих деталей рабочих органов, испытывающих ударные нагрузки, является сталь 40ХС. По сравнению с ныне применяемыми сталями Л53 и 65Г она имеет более низкое соотношение относительной цены и относительной износостойкости (0,48 по сравнению с 1,2 и 0,75 соответственно для сталей Л53 и 65Г) при более высоких значениях ударной вязкости и временного сопротивления при растяжении (изгибе). Следующими по степени применимости для изготовления лемеха могут быть стали 40Х, 65Г и лишь после них сталь Л53. Для повышения долговечности лемеха и обеспечения его равностойкости при изнашивании достаточно повысить износостойкость только его носка. При этом с целью повышения прочности лемеха на изгиб наряду с обеспечением необходимой износостойкости упрочнение целесообразно проводить закреплением на носовой части цельных пластин из износостойких стали, чугуна или керамики вместо наплавки твердых сплавов. Показано, что применение упрочняющих пластин вместо наплавки повышает прочностные параметры в опасных сечениях лемеха не менее чем в 3,4 раза [10, 60].

Одним из новых направлений повышения долговечности рабочих органов при их изготовлении является применение металлокерамических покрытий [58].

Технология упрочнения керамическими материалами в общем случае заключается в том, что поверхности рабочих органов, подвергающиеся наибольшему воздействию почвы, а следовательно, и наиболее изнашиваемые, защищаются керамическими пластинами. Крепление пластин на поверхностях рабочих органов осуществляется с помощью высокопрочного клея. Известен также способ нанесения комплексных покрытий электроимпульсным припеканием. Для упрочнения деталей машин методом припекания широко используются порошковые материалы. Среди них механические смеси, состоящие из металлических порошков матрицы (на основе железа, никеля, меди и др.) и наполнителей (карбидов, оксидов, сплавов на основе железа, графита, дисульфида молибдена, полимеров и т.д.) [58].

Исследования, проведенные в Национальном институте сельскохозяйственной техники (далее – NIAE) (Великобритания) показали, что в результате использования при изготовлении рабочих органов керамических материалов, состоящих из соединений алюминия, карбидов и нитридов кремния, можно повысить устойчивость рабочих органов к износу и значительно продлить срок их службы. Так, пружинные зубья культиватора с керамическими наконечниками в зависимости от типа почв изнашивались в 4,5–8,9 раза медленнее обычных. После испытаний, в ходе которых культиватор прошел в общей сложности 190 км, износ зубьев с керамическими наконечниками составил 12%, тогда как у обычных он превышал 50%. Закрепление керамических наконечников на зубьях культиватора осуществлялось с помощью специальных эпоксидных смол, обеспечивающих высокопрочное соединение керамики и металла. Благодаря применению керамических материалов на рабочей поверхности культиватора-плоскореза удалось уменьшить ее износ в 5–8 раз. Это было определено после обработки участков с разными типами почв общей площадью 250 га. Срок службы керамического дренера в кротодренажной машине увеличивался в среднем в 7,5 раза.

В настоящее время фирмы Andermanand Ryder, Heatair, British Sugar уже освоили выпуск керамических материалов для сельскохозяйственных машин [10,

43]. Для увеличения износостойкости при абразивном изнашивании рабочих органов почвообрабатывающих машин, в частности лемехов, фирмы Lodre Ceramic и Morgan Matrok (Великобритания) приступили к выпуску керамических лемехов, срок службы которых по износостойкости превосходит стальные в 12 раз, однако стоимость их изготовления очень велика. В процессе использования обнаружили недостатки: при динамической нагрузке появляются сколы, что приводит к образованию трещин [10, 58]. Износ сошников свекловичных сеялок обусловлен тем, что твердость почвы превышает твердость металла, из которого выполнены сошники. Для увеличения срока их службы специалистами NIAE после многочисленных исследований предложено применять новый материал при изготовлении рабочей поверхности сошников – алюмокерамику. Такой материал в несколько раз тверже, чем широко используемые для этих целей сталь, медь. Твердость керамики превышает твердость абразивных почвенных частиц, что и определяет меньший износ рабочих органов в процессе работы. Керамику можно с достаточно большой эффективностью использовать на рабочей поверхности различных сельскохозяйственных машин, в том числе культиваторов, глубокорыхлителей [10].

В ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина») разработаны высокопрочные износостойкие и коррозионностойкие биметаллические материалы, получаемые с применением технологии электрошлаковой наплавки. По разработанным технологическим рекомендациям в ПАО «Северсталь» освоено производство качественно новых износостойких биметаллов с реализацией дополнительного легирования плакирующего слоя в процессе наплавки сталей марок ШХ15, 9ХС и 9Х1. Из полученного проката были изготовлены рабочие органы почвообрабатывающих машин. Износные натурные испытания деталей в сезон сельскохозяйственных работ после обработки 10 га показали превышение ресурса эксплуатации в 2,3–3,3 раза по сравнению с серийно выпускаемыми деталями [59].

В ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ) при изготовлении рабочих органов сельскохозяйственных машин предлагают улучшить свойства известных твердых сплавов ТС и повысить их твёрдость и износостойкость путём модификации системы Fe-Cr-C новым элементом – бором. Новые материалы и упрочняющие покрытия систем Fe-Cr-C-V следует синтезировать непосредственно на поверхности рабочего органа. Это возможно благодаря разработанному и успешно развиваемому в университете оригинальному способу химико-термической обработки (ХТО) – скоростного ТВЧ-борирования, который может быть осуществлен одновременно с индукционной наплавкой (ИН), в одном процессе – «свернутая» технология [10, 61].

Оригинальная технология получения износостойких покрытий на поверхностях рабочих органов при их изготовлении предложена в работе [58]. Почворежущие детали предлагается получать литьём в пенополистироловые газифицируемые модели с одновременным формированием твёрдосплавного покрытия. Технология предполагает изготовление пенополистироловой модели детали, на рабочие поверхности которой наносится жидкая суспензия из порошков ПГ-С27 с добавками карбида бора B_4C в количестве 2,4 и 6%. Подготовленная таким образом модель формуется в кварцевом песке и заливается жидким металлом (сталь 35ГЛ), при этом происходит выгорание пенополистирола. Полученное таким образом на поверхности отливки покрытие представляет собой белый высоколегированный чугун с высокой микротвёрдостью (HV_{100} -7,3-15,3 ГПа). Несмотря на достаточно высокое повышение ресурса, к недостаткам данной технологии можно отнести её сложность и, как следствие, высокую трудоёмкость. Перечисленные традиционные способы упрочнения поверхности почворежущих деталей позволяют получить твёрдость наплавленного слоя порядка 50–70 HRC и увеличивают ресурс детали в среднем в 2–5 раз [58].

ОАО «Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» выполняет широкий спектр заказов на изготовление сельскохозяйственной техники и рабочих органов к ней [63]. Особое внимание

уделяется разработке и изготовлению рабочих органов для почвообрабатывающих сельхозмашин. Институт приступил к выпуску штампованных лап, повышение твердости которых осуществляется методом термоконтактного плакирования. В отличие от наплавки плакирование характеризуется тем, что упрочняющие добавки внедряются под давлением в структуру металла, что исключает их выкрашивание и отшелушивание. Благодаря электроконтактному плакированию твердость режущей кромки повышается до 60–65 HRC. ОАО «АНИТИМ» приступил к производству дисков на дискаторы (как для отечественных, так и для импортных образцов техники) по уникальной технологии термообработки, которая позволяет получить переменную твердость от максимальной на периферии со снижением к центру, что обеспечивает повышение износостойкости, предотвращает деформацию и разрушение дисков. На предприятии все рабочие органы сельхозмашин на испытательных стендах проверяются на кручение, твердость, отсутствие микротрещин. Продукция, выпускаемая под маркой «АНИТИМ», отличается высоким качеством и надежностью [63]. Термообработка с дополнительным упрочнением методом термоконтактного плакирования твердым сплавом увеличивает ресурс рабочих органов сельскохозяйственных машин в 1,5–2 раза [63].

Разработкой технологий упрочнения рабочих органов, в том числе почвообрабатывающих машин, при их изготовлении занимаются ИМАШ РАН, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, ФГБОУ ВО ЮЗГУ и другие научные и образовательные организации [69–90]. Важным направлением повышения долговечности рабочих органов является их ремонт с использованием упрочняющих технологий. Разработкой таких технологий занимаются ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ, ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, ФГБОУ ВО СПбГАУ и др. [90–100].

1.6 Анализ технологий упрочнения рабочих органов при их изготовлении

1.6.1 Наплавочные способы

Работы по наплавке рабочих органов были начаты в 1930-х годах. Наиболее широко в ремонтных условиях распространилась наплавка лемехов сплавом сормайт с применением газового пламени [58]. Газовая наплавка обеспечивает получение на лезвии прочно удерживающегося слоя равномерной толщины. Однако производительность ручной газовой наплавки очень мала. Так, для покрытия площади в 1 см^2 расходуется 1,0–1,5 г сормайта, при этом за час работы наплавляется площадь 100–140 см^2 . Процесс наплавки 21 одного лемеха длится 15–20 мин, расход карбида кальция составляет 0,85 кг и кислорода 0,165 м^3 [10, 43].

Распространённым методом упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий служит метод индукционной наплавки. На режущую поверхность орудия наносят присадочный материал (шихту) и плавят под воздействием ТВЧ. Продолжительность упрочнения методом индукционной наплавки стрелчатой лапы составляет 15–20 с. В состав присадочного материала входят различные порошки и флюсы. Порошки изготавливаются на основе вольфрама, высоколегированного чугуна, кобальта и никеля. Флюсы содержат 43–62% кислоты борной, 30–42% буры кристаллической и 5–15% силикокальция. Режущие кромки лап культиваторов, упрочненных данным методом, обладают эффектом самозатачивания. Твердость нанесенного покрытия составляет 58–64 HRC. Наблюдается повышение износостойкости упрочнённых стрелчатых лап в 1,8–2,0 раза.

Упрочнение стрелчатых лап методом наплавки точек на поверхность лезвий порошковой проволокой из износостойкого материала описано в работе [71]. Точки представляют собой конусы с переменной твердостью, соотносящейся к твердости материала лапы: 1:3,0 у вершины конуса и 1:1,5 у основания конуса. Наплавляемые точки имеют геометрические параметры в зависимости от режимов наплавки (напряжения, силы тока, скорости подачи проволоки, времени наплавки элемента, вылета электрода и полярности). Вследствие разных скоростей изнашивания

наплавленных упрочняющих точек и материала лапы режущие поверхности упрочненных данным методом стрелчатых лап при эксплуатации приобретают пилообразную форму [71]. Для увеличения срока службы рабочих органов почвообрабатывающих машин венгерской фирмой «Инновелд» были разработаны целевые установки для упрочнения рабочих кромок лемехов, круглых и зубчатых дисков борон, культиваторных лап. Но все они были рассчитаны на применение индукционной наплавки. Фирма «Смит Индастриес Керамика» практикует наплавку рабочих органов машин защитным составом «Синтокс» (материал из окиси алюминия и керамики) [10].

В работе [10] показаны результаты исследования по определению ресурса и характера изнашивания долотообразных лемехов, зонально упрочнённых твердыми сплавами. Твердый сплав марки ФБХ наносили на лицевую сторону носовой части серийных не наплавленных лемехов ПНЧС методом плазменной наплавки, а вальцованных лемехов П-702 – методом намораживания. Толщина слоя твердого сплава составляла 1,5–2,5 мм. Сравнительные ресурсные испытания опытных и серийных лемехов показали, что повышение износостойкости носка позволяет сохранить исходную форму и функциональные качества лемеха и тем самым значительно увеличить его ресурс. По результатам испытаний наработка опытных лемехов составила 55–67 га, а наработка серийных наплавленных лемехов до выбраковки – 31–39 га [10, 43, 54].

Для повышения прочности и износостойкости стрелчатых лап был опробован способ поверхностного упрочнения материалов в высокочастотной плазме. Экспериментальные лапы обладают большей износостойкостью (до 1,5 раза) и обеспечивают значительно лучшее самозатачивание, чем серийные. Износ носка лап как серийных, так и экспериментальных в 2–3 раза превышает их износ по длине лезвия. В результате наплавки намораживанием с последующей термической обработкой на поверхности рабочих органов почвообрабатывающих машин из стали 65Г образуется слой повышенной износостойкости. Проведенные сравнительные испытания рыхлительных оборотных лап (сталь 65Г) культиватора КШП-8 подтвердили целесообразность применения после их наплавки

намораживанием закалки в полимерной закалочной среде и последующего среднего отпуска. Установлено, что ресурс деталей, упрочненных наплавкой намораживанием с последующей термической обработкой, в среднем в 1,4 раза выше ресурса деталей, упрочнённых наплавкой намораживанием без термической обработки [10, 43].

Упрочнение стрелчатых лап с помощью ручной дуговой наплавки порошковыми электродами, содержащими материалы, образуемые с применением технологий самораспространяющегося высокого синтеза (СВС), исследовали авторы работ. Титан, углерод и порошок ПР-Н70Х7С4Р4-3 перемешивают механическим способом и активируют, запуская СВС-реакцию. Получается СВС-порошок на основе карбида титана и порошкового композита, который засыпают в стальную трубку. У трубки плотно зажимают края и далее методом окунания наносят обмазку. Изготовленный порошковый электрод сушат в печи. Твердость нанесенного покрытия составляет 62–64 HRC. Упрочнённые описанным методом стрелчатые лапы имеют износостойкость, превышающую в 2–4 раза износостойкость лап в исходном состоянии. Процесс изготовления электродов на основе СВС-порошка трудоёмок, что влияет на стоимость упрочненных стрелчатых лап [70].

Упрочнение лап культиваторов методом наплавки в литейной форме предложено в ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО ВолгГТУ) [62]. В места больших износов лап в нижнюю полуформу насыпают высоколегированный порошок, форму заполняют расплавленной сталью 45Л, обеспечивая плавление порошка под действием температуры. После охлаждения и затвердевания отливки зоны, где был насыпан порошок, имеют повышенную твердость и прочность. В работе отмечено, что порошок с размерами гранул 0,4–0,8 мм обеспечивает наибольшую твердость упрочненных участков. Далее отливка подвергается нормализации при температуре 920–960°C, приобретая устойчивость к ударным нагрузкам. Упрочненные поверхности имеют твердость 54–56 HRC. Полученные таким образом лапы культиватора обладают в 1,9–2 раза большей износостойкостью

относительно лап, изготовленных классическим методом, а их лезвия могут самозатачиваться [52].

В ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ФГБОУ ВО ЮЗГУ) был получен оптимальный по составу наплавочный сплав типа 150X12Г7Ф2. Он несколько уступает по износостойкости сплаву сормайт, широко используемому для упрочнения режущих элементов почвообрабатывающих машин, однако заметно превосходит его по прочностным параметрам и способности матрицы к упрочнению. Разработана порошковая проволока для автоматической наплавки ПП-150X12Г7Ф2. Микроструктура наплавленного металла представляет собой дендриты метастабильного аустенита в ледебурите, причем карбидные выделения располагаются также по объёму дендритов. Сплав отличается высокой склонностью к фазовому наклепу. Разработана технология нанесения упрочняющего покрытия на лапы культиваторов плоскорезов, которая апробирована на практике. Её применение позволяет повысить долговечность работы сменных режущих органов почвообрабатывающего агрегата АПК 3-01 в 1,8–2,2 раза [10, 62].

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработана технология упрочнения дисков тяжелых борон наплавкой порошковых материалов лучом лазера [75]. Технология предусматривает наплавку дисков тяжелых борон порошковым материалом с использованием луча лазера. Наплавку выполняют на комплексе, состоящем из волоконного лазера и робота-манипулятора. Состав комплекса: волоконный лазер ЛС-4 мощностью до 4 кВт; робот промышленный АBB IRB 260 с шестью степенями свободы; питатель порошка; позиционер – стол сварщика. Техническая характеристика: твердость наплавленного слоя 52–60 HRC; размер фракций порошка */40–105 мкм; время наплавки диска составляет 40 мин [74, 75].

1.6.2 Газотермическое напыление

Для упрочнения стрелчатых лап в ФГБОУ ВО Орловский ГАУ предложен метод газопламенного напыления. Порошковый материал нагревают до его расплавления и распыляют струей газа на предварительно подготовленную

(пескоструйная обработка) поверхность детали. Твердость покрытия достигает HRC 64. Лезвия упрочненных лап газопламенным напылением имеют эффект самозатачивания, а износостойкость упрочненных лап увеличивается в 3,2–4,0 раза по сравнению с неупрочненными лапами. Этот метод упрочнения имеет недостатки: высокая стоимость напыляемых порошков (самофлюсующиеся на основе никеля); высокие материальные и временные затраты реализации метода [84, 99].

1.6.3 Электроискровая обработка

Для упрочнения культиваторных лап разработана технология электроискровой обработки. Под действием электрического тока материал электрода (анода) переносится на поверхность упрочняемой детали (катод). При этом возникает импульсный разряд и местный нагрев. Упрочнение происходит в два этапа. На первом этапе электроискровым методом на верхнюю часть лапы наносится сплав ВК6 в виде полос шириной 5–6 мм с шагом такой же ширины и с углом $\pm 12^\circ$ между нанесенными полосами и направлением прилагаемого тягового усилия. Твердость упрочненных полосами участков соответствует 53–60 HRC. На втором этапе с помощью генератора высокой частоты и специального индуктора наносят полосы с обратной стороны лапы на её лезвия в места проекции не упрочнённых сверху участков. Процесс упрочнения происходит с использованием охлаждающей жидкости. Твердость нанесенных на втором этапе упрочнения полос составляет 60–65 HRC. ФНАЦ ВИМ разработал 3D-установку для восстановления и упрочнения режущих элементов сельскохозяйственных машин (рисунок 1.7).

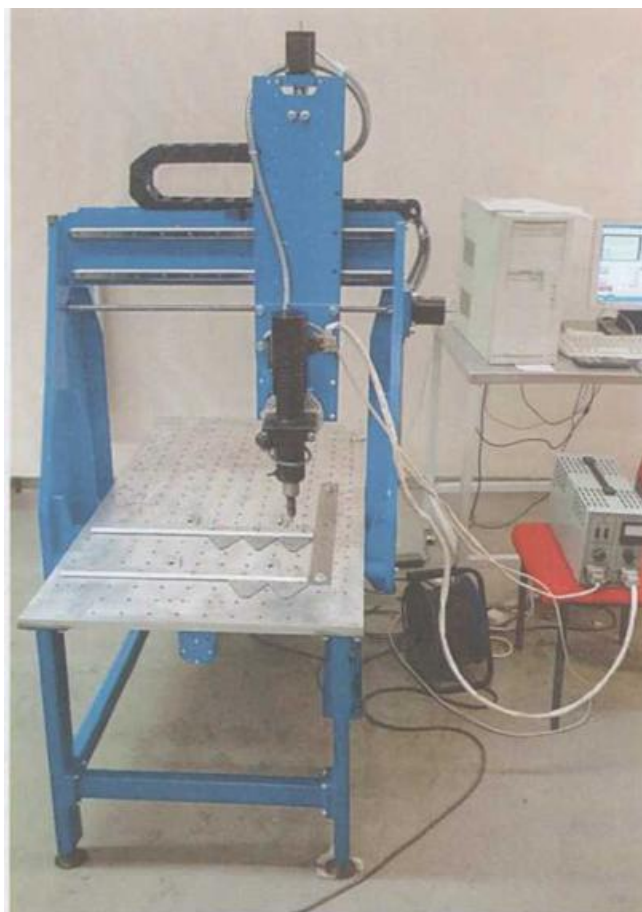


Рисунок 1.7 – 3D-установка для восстановления и упрочнения режущих элементов сельскохозяйственных машин

Износостойкость стрелчатых лап, упрочненных представленным методом, повышается в 5–5,8 раз по сравнению с 16 неупрочнёнными лапами, а лезвия при эксплуатации принимают пилообразную форму. Однако метод весьма трудоемкий, что является его существенным недостатком [99].

1.6.4 Пластическая деформация

Для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий применяют также методы с использованием вибраций и колебаний. При упрочнении этим методом образуются пластические деформации верхнего слоя поверхности детали за счёт микроударов, совершаемых рабочим инструментом. Износостойкость упрочнённых стрелчатых лап увеличивается в 1,3–1,4 раза по сравнению с исходными [10, 68, 69, 99]. Поверхностное пластическое деформирование в переменном магнитном поле служит более совершенным методом. Устройство для

упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий воздействует шариками диаметром 12–32 мм накатного деформирующего механизма на упрочняемую деталь. Генератор установки имеет магнитопровод с соединенными последовательно обмотками. На генератор подается переменный ток частотой 5–500 Гц, и создается магнитное поле высокой напряженности. Упрочняемую деталь закрепляют в специальном приспособлении, устанавливаемом на стол горизонтально-фрезерного станка. В шпинделе станка крепится устройство для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий. При этом шпиндель станка фиксируют для обеспечения недопустимости его поворота вокруг оси. Деталь упрочняется за счёт перемещения стола с закрепленной деталью за 2–4 прохода. В результате снижается шероховатость поверхности на 2–3 квалитета, увеличивается твердость на 20–30%, усталостная прочность на 50–80% и износостойкость в 1,4–1,7 раза [10, 59, 99].

1.6.5 Термическая обработка

Одним из способов термической обработки материалов рабочих органов является поверхностная закалка. Для поверхностной закалки лемехов, изготавливаемых из профильной стали Л53, применялась кислородоацетиловая горелка. Закаленная полоса располагалась вдоль режущей кромки лемеха. Твердость после закалки составляла 65–67 HRC. В результате испытаний установлено, что поверхностно-закаленные лемехи показали наиболее удовлетворительные результаты работы. Как подтвердили проведенные опыты, закалка носков самозатачивающихся долотообразных лемехов обеспечивает увеличение срока службы в 1,5–2 раза. Повышение износостойкости материала несущего слоя на носке объёмной закалкой до твердости 35–45 HRC выравнивает скорости износа слоёв. Метод повышения долговечности лемехов в результате поверхностной закалки лезвия токами высокой частоты не нашел широкого практического применения. Были проведены исследования по повышению износостойкости стали путем применения изотермической обработки. Такой метод обеспечивает прочность и пластичность при минимальных внутренних

напряжениях. Изометрическая обработка позволяет получить более высокую износостойкость (на 20–30%), чем обыкновенная закалка с последующим отпуском. Сталь 65Г, обработанная изотермически, имеет износостойкость в 1,7 раза бóльшую, чем при обычной закалке [58].

В ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева обоснована возможность получения самозатачивающегося лемеха в результате точечного упрочнения лезвия с применением импульсного электроконтактного нагрева и образования зубчатого профиля в процессе эксплуатации. Интенсивность изнашивания образцов из стали Л53, упрочненных с применением электроконтактного нагрева, находится примерно на том же уровне, что и образцов из той же стали, прошедших термообработку до твердости 50–52 HRC, и на 28% ниже стали Л53 в исходном состоянии. При небольшой наработке интенсивность изнашивания экспериментальных лемехов такая же, как и у стандартных. С увеличением наработки наблюдается эффект самозатачивания упрочненных лемехов и снижение интенсивности их изнашивания. При износе лезвий порядка 10 мм у экспериментальных лемехов износ уменьшается в 1,2–1,5 раза. При наработке 10 га износ стандартного лемеха на суглинистой почве составляет 15,83, а экспериментального – 10,7 мм; на песчаной почве износ стандартного лемеха – 16,67, экспериментального – 12,6 мм; на среднесуглинистой почве износ стандартного лемеха 8,61 мм, а экспериментального – 8,3 мм. На суглинистых почвах интенсивность изнашивания стандартных лемехов на 17,41% выше, чем экспериментальных, на песчаных почвах – на 13,11%, на среднесуглинистых – на 9,8%. Наиболее эффективно использование упрочненных лемехов на суглинистых и песчаных почвах. Эксплуатационные испытания показали, что при изнашивании лемеха происходит его самозатачивание за счёт разности твердости участков лезвия и образование зубчатого профиля [21, 57].

В ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН) совместно с ФАУ ЦИАМ им. П.И. Баранова разработан эффективный метод упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий – лазерное упрочнение, обеспечивающее

повышение износостойкости в 4–5 раз. Упрочняемая деталь перемещается со скоростью 10–30 м/с. На поверхность детали воздействует газовый CO₂-лазер диаметром луча 3–10 мм и выходной мощностью 0,7–1 кВт, образуя на поверхности детали зоны закалки. Зоны закалки представляют собой полосы шириной 2–3 мм с частичным оплавлением. Существенным недостатком метода служит высокая стоимость оборудования и расходных материалов для выполнения лазерного упрочнения [64].

ФНАЦ ВИМ разработал 3D-установку для упрочнения лап культиваторов электродуговым нагревом. Упрочненные электродуговым нагревом лапы культиваторов показаны на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Лапы культиваторов, упрочненные электродуговым нагревом

1.6.6 Химико-термическая обработка

Азотирование является эффективным средством повышения твердости и износостойкости стальных поверхностей. Твердость поверхностного слоя в 24 раза превышает твердость цементации. При сравнении прямой закалки и цементации с новым режимом азотирования деталь подвергалась предварительной закалке и

высокому отпуску. В последнем случае износостойкость деталей повысилась в 2,5 раза [10, 62]. Деталь помещают в герметично закрытую печь, нагревают до температуры 500–600°C и выдерживают. Под давлением в печь подается аммиак, распадающийся на азот и водород под действием температуры. В результате на поверхности детали образуется покрытие толщиной 0,5 мм, состоящее из высокотвердого химического соединения железа с азотом. Затем деталь медленно охлаждается, находясь в печи. Процесс азотирования занимает до 60 ч, что является существенным недостатком метода. Износостойкость упрочненных стрелчатых лап при азотировании увеличивается в 2,5 раза [89].

Для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий (в том числе стрелчатых лап) наиболее часто применяют борирование (разновидность ХТО). Деталь погружают в ванну с борсодержащим раствором, раствор нагревают до 850~950°C и выдерживают 2–4 ч под действием постоянного электрического тока. Анодом служит графитовый стержень, а катодом упрочняемая деталь, на поверхности которой образуется слой твердостью до 58–62 HRC и глубиной 300–600 мкм. Износостойкость стрелчатых лап, упрочненных борированием, увеличивается в 2–3 раза. Существенным недостатком метода остается низкая производительность процесса. Большей производительностью обладает метод скоростного борирования с применением ТВЧ. Смесь, содержащую карбид бора и плавненный флюс (используется для индукционной наплавки), наносят шпателем на предварительно подготовленную режущую поверхность стрелчатой лапы. Для фиксации смеси применяют жидкое стекло, эпоксидный компаунд или 16 казеиновый клей. С помощью ТВЧ лапы нагревают до температуры 1300–1350°C за 40–60 с в петлевом индукторе с водяным охлаждением и выдерживают в течение 1–2 мин. Далее лапы извлекают, и они свободно остывают на воздухе или подвергаются объёмной закалке в масле. Износостойкость стрелчатых лап, упрочненных скоростным борированием с применением ТВЧ, увеличивается в 2–4 раза. Недостатками метода служат высокие затраты электроэнергии и высокая стоимость применяемого оборудования и материалов для наплавки [10, 99].

Нами совместно с автором работы [69], с помощью ТВЧ-нагрева образцов из стали 65Г под слоем шихты на основе плавленного боратного флюса П-066, содержащего карбид бора, получены износостойкие боридные покрытия. Предложен технологический процесс упрочнения плоских ножей путем ТВЧ-борирования. Проведенные производственные испытания упрочненных ножей. Установлено, что износостойкие покрытия, полученные этим методом, превосходят серийные ножи в 3 раза [69, 89].

Фирма Lund Precision Products, Inc. (Гудзон, штат Массачусетс, США) для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий и повышения их износостойкости применяет различные уникальные покрытия, разработанные фирмой. Например, покрытие Wear-Tuff, в состав которого входят сплавы на основе никеля, железа и карбид хрома. Покрытие наносится на упрочняемое орудие обливанием, распылением или окунанием орудия. Затем для образования прочной связи основного металла детали с покрытием деталь помещают в печь и выдерживают некоторое время при температуре порядка 982°C. Толщина нанесенного покрытия составляет 0,6–1,0 мм. Покрытие имеет твердость 56–60 HRC, а также обладает повышенной устойчивостью к коррозии и способствует увеличению износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих орудий в 2–3 раза. Покрытием Wear-Tuff упрочняют не только рабочие органы почвообрабатывающих орудий, но и закрепляемые на них с помощью болтовых соединений отдельные пластины. Другим уникальным покрытием для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий, разработанных Lund Precision Products, Inc., стало покрытие BrazeCoat, которое содержит до 70% объема мелких частиц карбида вольфрама или карбида хрома и представляет собой плотный материал с низкой пористостью. Порошок растворяется полимерным веществом, наносится на поверхность упрочняемой детали и помещается в печь, где выдерживается некоторое время при температуре 1100°C. В результате происходит оплавление покрытия и его прочное сцепление с основным металлом упрочняемой детали. Износостойкость упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих орудий превышает в 2–2,5 раза износостойкость орудий без упрочнения [10, 99].

В новом способе ХТО, разработанном в Алтайском ГАУ, в отличие от «классического» диффузионного борирования образуются не хрупкие двухслойные игольчатые боридные покрытия, а композиционные переплавленные, ледебуритоподобные слои, обладающие повышенной пластичностью, адгезией к основе, и содержащие в качестве упрочняющих фаз не только карбиды хрома, но и карбобориды и бориды железа. Это позволяет не только уменьшить содержание хрома в ТС, что снижает его стоимость, но и получить новые потребительские свойства материала. Кроме того, образующаяся в покрытии при совместно протекающих процессах ИН и ТВЧ-борирования низкоплавкая эвтектика Fe-B способна эффективно растворять и другие легирующие элементы, как введенные в ТС, так и находящиеся в самом упрочняемом конструкционном материале. Это открывает дальнейшие перспективы таких наплавочных систем. Также возможно и альтернативное упрочнение рабочих органов сельхозмашин покрытиями системы Fe-B-Fe₂B, образующимися при ТВЧ-борировании, поскольку этот процесс имеет схожие с ИН температурно-временные параметры. Износ ножей, упрочненных такими материалами, не превышает 32% от износа исходного ножа. Для реализации предлагаемой инновационной технологии не требуется специальное оборудование – кроме того, которое традиционно используется на предприятиях отрасли для упрочнения деталей методом ИН. Технологический процесс также не требует изменений, кроме корректировки времени и температурного режима на стадии наплавки (ТВЧ-борирования). Возможно многократное снижение трудоемкости и сокращение количества операций при использовании оригинальной расходимой технологической оснастки – порошковой полимерной ленты с односторонней адгезией. В качестве основного наплавочного материала используется механическая смесь порошков ТС, легирующих добавок, например порошка сплава ВК-8, карбида бора В4С и флюса П-0,66 для индукционной наплавки.

Упрочнение стрелчатых лап посевного почвообрабатывающего комплекса «Кузбасс» (АО «АНИТИМ») композиционными покрытиями, полученными при ТВЧ-борировании, со снижением себестоимости в 1,5–2 раза и увеличением

ресурса рабочих органов – в 3–5 раз. Упрочнение пластинчатых молотков кормодрилок различной производительности (ООО «Агромаштехсервис», г. Барнаул) – композиционными покрытиями систем Fe-Cr-C-B, на основе материала ПГУС27, полученными по «свернутой» технологии, с увеличением долговечности рабочего органа в 2,5–3 раза. Упрочнение унифицированных ножей измельчителя-разбрасывателя соломы (ИРС) комбайнов Ростсельмаш (ООО «КЗ «Ростсельмаш», г. Ростов-на-Дону) – композиционными покрытиями систем Fe-Cr-C-B и Fe-Cr-C-B-W, на основе материала ПГ-УС27, полученными по «свернутой» технологии, с увеличением долговечности рабочего органа в 1,5–2 раза. Упрочнение долот анкерных сошников (ООО «АПК-Интех», г. Барнаул) проводят композиционными покрытиями систем Fe-Co-C-B-W, на основе материала полученными по «свернутой» технологии, с увеличением долговечности рабочего органа в 3–5 раз [61].

С целью получения лучших эксплуатационных качеств упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих орудий методом скоростного электродугового упрочнения в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ предлагают применять боронитроалитирующие пасты. Паста содержит буру, карбид бора, криолит, нитрид натрия, фтористый натрий и связующий компонент. Пасту наносят на режущую часть стрелчатой лапы культиватора и высушивают. После этого на нее воздействуют электрической дугой с использованием графитовых электродов. Диаметр электродов составляет 10 мм, напряжение дуги – 55–60 В, сила тока – 80–110 А. В результате на упрочняемых поверхностях образуются карбонитридные включения и соединения на основе бора на глубине 1,9–2,0 мм. Далее упрочненные лапы подлежат термообработке. При упрочнении стрелчатых лап культиватора методом скоростного электродугового упрочнения с использованием боронитроалитирующих паст достигается твердость упрочненных поверхностей до 63–65 HRC. При этом износостойкость повышается в 1,5–2,5 раза [10, 14, 76].

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработана технология упрочнения рабочих органов сельскохозяйственной техники боронитроцементацией [73]. Упрочненная лапа культиватора показана на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Лапа культиватора, упрочненная боронитроцементацией

1.6.7 Упрочняющие технологии при изготовлении рабочих органов зарубежной почвообрабатывающей техники

Упрочняющие технологии применяют при изготовлении рабочих органов зарубежной почвообрабатывающей техники на некоторых российских предприятиях в рамках импортозамещения [101, 102, 103, 104]. ООО «Гранит Агро» изготавливает стрелчатые лапы «Гранит», которые обладают большим ресурсом по сравнению с аналогами. При производстве используется борсодержащая сталь 30 MnB5. Для упрочнения носика рабочей поверхности лап применяют плазменную наплавку материалом ПП-Нп-150Х1032ФТ-Н-С2.0. В отличие от традиционных способов повышения ресурса культиваторных лап (наплавка сормайтотом, индукционная закалка) достигается твердость свыше 65 HRC, что обеспечивает стойкость режущей кромки и самозаточку. На предприятии изготавливают стрелчатые лапы для культиваторов Sunflower, Salford, Wil-Rich, John Deere, Landoll, посевных комплексов John Deere 1830 и др. [101].

В ООО «Научно-производственное предприятие «Валок» для упрочнения режущего лезвия рабочих органов почвообрабатывающей техники (лапы сеялок и

культиваторов, долота глубокорыхлителей) применяется плазменно-порошковая наплавка. Стрельчатые лапы, упрочненные по указанной технологии, имеют наработку в 1,5–2 раза больше, чем у аналогичных лап отечественного производства. На предприятии изготавливают рабочие органы для почвообрабатывающих машин John Deere, Salford, Case, Wil-Rich, Great Plains, Hesston, Landoll и др. [102].

Компания SKR при изготовлении запасных частей для почвообрабатывающей техники освоила технологию химического нанесения твёрдых сплавов на материал рабочего органа, тем самым увеличив ресурс на 40%. На предприятии изготавливают лапы для культиваторов Solar Fields, Tillermaster и др. [103].

АО «Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», который входит в объединение «Алтайские машиностроительные заводы» («Алмаз»), для упрочнения лап культиваторов разработал и использует технологию термоконтантного плакирования с направленной кристаллизацией. Стрельчатые лапы при таком методе зонально охлаждаются и нагреваются для образования особой твёрдой структуры. Твёрдость режущей кромки такой лапы повышается до 60–65 HRC. На предприятии изготавливают лапы для культиваторов Kusto, Tillermaster, диски для сеялок и посевных комплексов Bourgault [104].

Таким образом, на основании проведенного анализа работ можно сказать, что среди всех способов упрочнения широкое распространение получила наплавка износостойким твердым сплавом. Основными видами наплавочных материалов являются: стальная сварочная проволока, порошковая наплавочная проволока, наплавочные ленточные электроды, наплавочные литые прутки, плавленые карбиды вольфрама, флюсы для наплавки, гибкие шнуры, электроды, порошки из сплавов для наплавки.

1.7 Анализ упрочняющих технологий восстановления рабочих органов при ремонте почвообрабатывающей техники

Интенсивный износ рабочих органов является общей проблемой ремонта почвообрабатывающих комплексов и посевных машин [34–40]. В результате анализа дефектов почвообрабатывающих машин было установлено, что порядка 45% деталей отбраковываются из-за чрезмерного износа рабочих органов сельскохозяйственных машин. Исследования, которые были проведены в сфере ремонтного фонда, показывают, что зачастую около 25% деталей являются изношенными, примерно 30% – годными, и оставшиеся 45% деталей пригодны для восстановления [42].

Автор работы [4] на основании анализа литературных источников и исследования дефектного состояния показал, что более 60% стрельчатых лап культиваторов выходят из строя ввиду линейного износа носка (до 30 мм) и крыльев по ширине (до 15 мм). При этом определено, что интенсивность изнашивания лап, установленных в различных местах на раме культиватора (первый либо второй ряд, по следам движителей и опорных колёс), значительно различается. Менее интенсивно (на 12–15%) по отношению к лапам первого ряда изнашиваются лапы, установленные во втором ряду, а лапы, перемещающиеся по следам, оставляемым опорными колесами культиватора и движителя трактора, изнашиваются в 1,4–1,8 раза интенсивнее. При ремонте рабочих органов почвообрабатывающей техники применяют различные технологии. Они подробно изложены в работах [105–110].

1.7.1 Наплавочные способы

В Башкирском ГАУ разработан технологический процесс газопламенной наплавки режущих поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих машин. Разработанная технология включает в себя следующие основные операции: зачистку режущей кромки и носовой части лапы культиваторов; приготовление состава порошковой смеси-сушки, просеивание, смешивание; нанесение порошковой смеси технологией газопламенной наплавки; контроль качества

полученного наплавленного слоя. Рассматриваемый способ рекомендуется применять для восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, работающих на износ. По результатам испытаний установлено, что лапы культиватора, восстановленные и упрочненные износостойким порошковым материалом, имеют ресурс работы на 27,7% выше, чем у серийных лап [12].

Кончиным В.А. в Курском ГАУ предложена технология восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин путём плазменно-порошковой наплавки твердосплавных электроэрозионных материалов, что позволяет обеспечить необходимые триботехнические свойства покрытий. Результаты стендовых испытаний также показывали, что ресурс рабочих органов почвообрабатывающих машин, восстановленных и упрочненных твердосплавными электроэрозионными материалами, выше ресурса новых деталей в 1,5 раза [42]. В настоящее время ведутся разработки новых способов наплавки: метод упрочнения трением, метод плакирования износостойкой лентой из инструментальных сталей. Однако они отличаются высокой сложностью и поэтому не находят широкого применения при восстановлении вышеуказанных деталей в ремонтном производстве [10, 63, 43].

1.7.2 Нанесение газотермических покрытий

Для восстановления изношенных поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих орудий возможно применение метода плазменного напыления. Для улучшения качества напыления и увеличения производительности процесса в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» разработана автоматизированная установка. На рабочем столе установки закрепляют восстанавливаемое и упрочняемое орудие, например стрельчатую лапу культиватора. На копировальном столе закрепляют образцовое орудие (стрельчатую лапу). К начальной точке образцовой лапы подводится автоматический копир установки. Аналогично подводится плазмотрон к упрочняемой лапе. Запускается установка и напыляется покрытие на лапу за счёт

перемещения плазмотрона. Скорость перемещения регулируется через мотор-редуктор частотным преобразователем [10, 86, 99].

Метод упрочнения стрелчатых лап высокочастотным плазменным напылением описывается в работе [77]. Для этого применяется установка Плазма-401. В плазменный поток помещается пучок стержней из кварца, которые под действием высокой температуры испаряются, и их пары оседают на поверхности упрочняемой лапы. При этом образуется слой толщиной 2–3 мм и твердостью до 64 HRC. Выявлены повышение износостойкости стрелчатых лап в 1,5 раза, упрочненных этим методом относительно неупрочненных, а также эффект самозатачивания режущих частей. Недостаток метода заключается в высокой стоимости оборудования для упрочнения высокочастотным плазменным напылением и необходимости высокой квалификации оператора, работающего на данном оборудовании [99].

В ФГБОУ ВО «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова» разработан технологический процесс металлизации на рабочие поверхности рыхлящих лап культиватора. Полученные результаты внедрены на предприятиях в СПК (колхоз) имени Калинина (Удмуртская Республика) и ООО «Агрофирма «Труд» (Пермский край) [88].

На предприятии АО «Научно-исследовательский технологический институт имени П.И. Снегирёва» (АО «НИТИ имени П.И. Снегирёва») разработаны и изготавливаются плуги для отвальной обработки почвы, культиваторы, дополнительное оборудование и запасные части для почвообрабатывающего оборудования. Сервисная служба предприятия выполняет гарантийное и постгарантийное обслуживание плугов «Русич», культиваторов КПП-8, культиваторов КПП-14, а также их ремонт с использованием инновационных технологий [89]. Однако методы напыления не нашли применения для упрочнения покрытия рабочих органов почвообрабатывающих машин из-за низкой прочности сцепления покрытия с основой (не более 0,7 МПа). Метод напыления с оплавлением, близкий по своей сущности наплавке, иногда используется для

упрочнения и восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин. Но себестоимость нанесения оплавленных покрытий очень высока по двум основным причинам: во-первых, оплавлению подлежат только «самофлюсующиеся» порошки на никелевой основе (эффект самофлюсования имеют сплавы системы «никельбор–кремний»), а никелевые порошки являются сверхдорогостоящими (в настоящее время дороже даже вольфрамовых), в частности, цена никелевых порошков примерно в 5 раз дороже аналога на железной основе; при этом износостойкость никелевых порошков (сплавов) в условиях жесткого абразивного почвенного изнашивания ниже износостойкости (в тех же условиях) порошковых сплавов на основе высоколегированных чугунов; во-вторых, технология напыления с оплавлением предусматривает проведение двух отдельных операций напыления и оплавления покрытия, что также удорожает процесс нанесения износостойких материалов.

1.7.3 Электролитическое хромирование

Крупиным А.Е. разработана технология нанесения электролитического хромового покрытия на рабочие органы уборочных сельскохозяйственных машин (ножи). Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что покрытия, полученные при оптимальных условиях, являются более мелкозернистыми и равномерными, а также имеют меньшее количество пор и трещин, что положительно влияет на их стойкость к коррозии и износу; внутренние напряжения и микротвёрдость покрытий не оказывают существенного влияния на их стойкость к износу, так как покрытия с наименьшими внутренними напряжениями и с максимальной твёрдостью не являются самыми износостойкими; износостойкость сегментов и ножей, хромированных при оптимальных условиях, выше износостойкости сегментов и ножей без покрытия в среднем в 1,78 и 1,95 раза соответственно; износостойкость сегментов и ножей, хромированных с тыльной стороны, выше износостойкости этих деталей, хромированных с лицевой стороны, в 1,13 и 1,15 раза соответственно [39].

1.7.4 Применение клеёполимерных композиционных материалов

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ совместно с ФГБОУ ВО Брянский ГАУ разработали технологию устранения износа отвалов плужных корпусов со сквозным протиранием и повышения абразивостойкости восстановленного участка рабочей поверхности отвала без нарушения целостности детали. Её суть состоит в нанесении абразивостойкого клеёполимерного дисперсноупрочненного композиционного материала на предварительно подготовленную предельно изношенную область с охватом несколько большего периметра. Перед нанесением композита на предварительно очищенную до металлического блеска и обезжиренную поверхность укладывается армирующая строительная лента. Подготовка поверхности для нанесения состава заключается в удалении естественных и искусственных загрязнений (методы могут быть разными) и последующей обработке растворителем – уайт-спиритом или ацетоном. Армирующая лента приклеивается в зоне сквозного протирания с охватом большего по размерам периметра. Лента должна обладать клеящими свойствами и иметь размер ячейки не более 3 мм, тормозящей протекание композита в жидкой фазе благодаря наличию сил поверхностного натяжения. Такое торможение позволяет покрытию сформироваться на восстанавливаемом участке без существенных протеканий через сквозное отверстие. Наряду с этим пленка способствует затвердеванию композита и выполняет функцию армирования, увеличивая стойкость покрытия к ударным воздействиям.

Наличие сетки также повышает прочность сцепления покрытия с восстанавливаемой поверхностью и способствует равномерному распределению полимерного композита по криволинейной поверхности отвала. В случае чрезмерно больших сквозных протираний с обратной стороны детали временно крепится профильная пластина, устраняющая возможность протеканий и не обладающая адгезией к композиту. После затвердевания композита пластина удаляется. Образующиеся незначительные затвердевания на обратной стороне легко устраняются механическим путем. Далее клеевой композит равномерно наносится шпателем на горизонтально расположенный отвал по всей площади

восстановления с выходом за её пределы. При определенных технологических изменениях способ может использоваться для устранения износов и сквозных протираний. Одновременно происходит термодиффузионное насыщение металла рабочего органа легирующими элементами, входящими в состав пасты, и углеродом за счёт его диффузии вследствие сублимации графитового электрода. Эксплуатационная оценка эффективности использования метода КВДУ проводилась на примере упрочнения стрелчатых лап. Данный вид рабочих органов является основным для многих отечественных и зарубежных машин, используемых в настоящее время в сельском хозяйстве для обработки почвы (культиваторов, посевных комплексов, рыхлителей, сеялок и др.) [84].

В ФГБОУ ВО Орловский ГАУ для упрочнения при восстановлении стрелчатых лап была подготовлена паста, содержащая 60% стального матричного порошка типа ПГ-10Н-01, 30% карбида бора и 10% криолита. Данный выбор обусловлен тем, что по результатам предварительно проведенных исследований эта паста является одной из наиболее оптимальных для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. Паста готовилась смешением указанных компонентов механическим способом с добавлением связующего вещества. Толщина нанесенного слоя пасты составляла 2,5–3,0 мм. После нанесения паста высушивалась до затвердевания и расплавлялась электрической дугой на следующих режимах: сила тока $I = 70\text{--}80$ А, напряжение $U = 60$ В, частота вибрации графитового электрода – 25–50 Гц. Толщина полученного металлокерамического покрытия составляла 0,7–0,8 мм, глубина упрочнения – 0,9–1,1 мм, твердость – 68–70 HRC. На испытания было поставлено 10 упрочненных КВДУ стрелчатых лап, половина из которых была упрочнена с лицевой стороны, а оставшиеся – с тыльной. У всех испытуемых лап дополнительному упрочнению подвергали носовую часть как наиболее интенсивно изнашиваемую [10, 38, 84].

1.7.5 Крепление пластин к режущей части рабочего органа

Одной из технологий восстановления является приварка пластин к режущей части рабочего органа [34]. Для восстановления лемеха Сабуркиным Д.А.

разработана технология припайки чугунной пластины с тыльной стороны и наплавки электрода Т-590 на лицевую сторону. По результатам экспериментов показано, что наименьшему износу по длине носка и ширине лезвия подвержен лемех, упрочненный припаянной чугунной пластиной с тыльной стороны и наплавкой электрода Т-590 на лицевую сторону. Его износостойкость по длине носка выше, чем у серийного лемеха в 3,4 раза и по ширине – в 6,7 раза, а по сравнению с серийным наплавленным лемехом – выше в 2,6 раза и в 2,8 раза соответственно.

Высокую износостойкость по сравнению с серийными лемехами показали лемехи, упрочненные наплавкой электродом Т-590 на тыльной стороне, и лемехи, упрочненные пластиной из стали Х12: по длине носка в 2,6 и 2,9 раза и по высоте в 4,6 и 5,8 раза соответственно. По результатам экспериментов, проведенных на супесчаной почве, можно отметить, что наименьшему износу по длине носка и ширине подвержен лемех, упрочненный припаянной чугунной пластиной на тыльной стороне и приваренной пластиной из стали 65Г толщиной 6 мм на лицевой стороне. Его износостойкость по длине носка выше, чем у серийного лемеха в 4,8 раза и по высоте – в 5,45 раза. По сравнению с серийными лемехами лемехи, упрочненные наплавкой ОЗИ-6 и припаянной чугунной пластиной, выше по износостойкости: по длине носка в 3,3 и 3,8 раза и по высоте в 4,3 и 5,2 раза соответственно [34].

Новиковым А.А. предложена технология повышения долговечности плужных лемехов их восстановлением термоупрочненными компенсирующими элементами. Установлено, что твердость лемехов импортного исполнения превышает твердость отечественных более чем в 2 раза. Показана возможность использования выбракованных листов рессор по геометрическим показателям и твердости в качестве компенсирующих долот при восстановлении лемехов и определена граница твердости (53–54 HRC), после которой не происходит увеличения абразивной износостойкости. Ресурс восстановленного лемеха превышает ресурс лемеха заводского исполнения не менее чем в 2 раза. Технологический процесс состоит в приваривании встык к остову лемеха

термоупрочненного на твердость 53–54 HRC компенсирующего элемента, изготовленного из выбракованных повторно термоупрочненных листов рессор. Технология позволяет проводить трёхкратное восстановление. Затраты производителя на приобретение отечественных лемехов снижены в 2,8 раза, импортных – в 4,4 раза [41].

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ совместно с ФГБОУ ВО Брянский ГАУ разработан метод восстановления частично изношенной рабочей поверхности лапы привариванием к ней режущего элемента в виде пластины из рессорно-пружинной стали с объёмным термоупрочнением (твердость 50–52 HRC). Пластины приваривают непрерывным сварным швом с тыльной стороны лапы и прерывистым, длиной по 6–8 мм – с рабочей. Далее на рабочие поверхности приваренных пластин наплавляют армирующие износостойкие валики сплавом Т-590 с целью упрочнения и повышения износостойкости [10, 14, 65]. Идея использования компенсирующих пластин для восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, преимущественно стрельчатых лап культиваторов предложена в патентах на изобретение RU № 2443523 и RU № 2527558. В первом патенте способ включает в себя удаление изношенной рабочей части стрельчатой лапы культиватора шлифовальным отрезным кругом. Затем изготавливают новую рабочую часть из среднеуглеродистой стали в виде сменной угловой пластины. В сменной угловой пластине выполняют сквозные продолговатые отверстия, затачивают с образованием лезвия. На восстанавливаемой стрельчатой лапе культиваторов выполняют резьбовые отверстия для крепления сменной угловой пластины посредством винтов. Сменную угловую пластину упрочняют с тыльной стороны в три слоя. Первый и третий слои получают электроискровым нанесением износостойкого сплава. Второй слой получают электродуговой металлизацией проволоки.

Во втором патенте восстановление производится путем приваривания пластины, копирующей изношенную часть лапы, к части лапы, пригодной для восстановления. Компенсирующая пластина имеет размер изношенной части лапы, увеличенной на 8–10 мм по направлению движения лапы, и изготавливается из

рессорно-пружинной стали, термоупрочненной по всему объему на твердость не менее 50 HRC. Приваривание осуществляется с тыльной стороны швами на всю длину крыльев, а со стороны рабочей поверхности – швами длиной 6–8 мм в средней части каждого крыла.

По мнению авторов изобретений, предлагаемые способы позволяют снизить лобовое сопротивление движению стрелчатой культиваторной лапы, увеличить долговечность детали за счет неоднократного восстановления и использования компенсирующих пластин с такой же или с увеличенной износостойкостью. Пластины изготавливают из стали с такой же или увеличенной износостойкостью, например из рессорно-пружинистой стали, стали 65Г, стали 70Г и др. После приварки компенсирующих пластин осуществляют их заточку с углом α в соответствии с требованиями, предъявляемыми к новой стрелчатой культиваторной лапе. Для увеличения износостойкости после приварки выполняют термообработку восстановленной стрелчатой культиваторной лапы. В процессе эксплуатации происходит изнашивание компенсирующих пластин. При достижении предельного износа компенсирующих пластин их срезают любым известным способом, а на их место приваривают новые компенсирующие пластины, таким образом восстанавливая работоспособное состояние стрелчатой культиваторной лапы.

1.8 Технологии восстановления рабочих органов зарубежной почвообрабатывающей техники

В ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ на основании результатов исследований материала лемеха плуга «Вари Титан» Lemken была разработана технология восстановления и повышения долговечности рабочих органов – приваривание лезвия-накладки с последующей наплавкой износостойкого материала Castolin PE1229 [82]. Данная технология рассчитана на возможность использования доступных недорогих материалов и изготовление применяемого приспособления в условиях ремонтных мастерских. При этой технологии повышается ресурс лемеха в 3–4 раза. Сущность метода состоит в том, что для изготовления лезвия-накладки

используется второй изношенный лемех, затем производится приваривание, наплавка износостойкого материала Castolin PE1229, механическая и термическая обработка. После восстановления и термической обработки материал не теряет своих износостойких свойств, даже происходит некоторое увеличение твердости. Такая технология восстановления рабочих органов сельскохозяйственных машин может использоваться при их ремонте. Сравнительные эксплуатационные испытания плуга «Вари Титан» Lemken проводились на полях Оренбургской области (ООО «МТС-Агро»). Полевые испытания показали, что износостойкость и ресурс лемеха, упрочненного износостойким материалом Castolin PE1229, при эксплуатации на южно-черноземных почвах в 4,6–5,0 раза выше, чем у серийных. Приведённые экономические показатели показывают, что себестоимость восстановленного лемеха плуга в условиях ремонтной мастерской ООО «МТС-Агро» ниже стоимости нового лемеха плуга «Вари Титан» Lemken на 59,5% [82].

Самым распространенным типом рабочего органа современных почвообрабатывающих комплексов с анкерными сошниками в настоящее время является долото. Главным следствием его износа являются увеличение тягового сопротивления и соответствующее увеличение топлива, ухудшение качества заделки семян и в результате – снижение урожайности [64]. В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ проанализированы характер и причины износа рабочих органов (долот) анкерных сошников сеялки Primera DMC-9000 фирмы Amazone (Германия) до предельного состояния при наработке 60–200 га. Для упрочнения долота предложено использование комбинированного покрытия, состоящего из четырёх конструктивных и технологических элементов: твердосплавная пластина, твердосплавное, боридное или композиционное покрытие, металлокерамическое или электроискровое покрытие, объёмная закалка основного материала, которые располагаются на различных участках изнашивающейся поверхности долота. По результатам технологических исследований и полевых испытаний упрочненных рабочих органов выбраны и оптимизированы две конструкции упрочняющего покрытия долота: ТВЧ-наплавка передней поверхности ПС-14-60 + ЭИН боковых поверхностей сплавом ВК8; ТВЧ-наплавка передней поверхности сплавом ПГ-С27,

совмещённая с борированием боковых поверхностей сплавом ВК8. Упрочненные комбинированным покрытием и ТВЧ-закаленные долота проявляют в 1,5–2 раза более высокую износостойкость по сравнению с контрольными (серийными) [73].

В ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработана технология восстановления лемеха компании Kverneland Group. Для этого производится приваривание режущелезвийной части, изготовленной из стальной полосы и термоупрочненной по всему объёму на твердость 40 HRC. В качестве стальной полосы используются утратившие упругие свойства листы рессор соответствующего размера. Нарботка до предельного состояния 25–60 га, что составляет 90–95% по сравнению с серийным. Упрочняющее восстановление режуще-лезвийной части лемехов производится привариванием режуще-лезвийной части, изготовленной из стальной полосы и термоупрочненной по всему объёму на твердость 40 HRC, с наплавкой тыльной стороны абразивно-стойким сплавом. В качестве стальной полосы используются утратившие упругие свойства листы рессор соответствующего размера. Нарботка до предельного состояния 40–80 га. Увеличение в 1,2–1,3 раза по сравнению с фирменным [74, 75].

В ФГБОУ ВО Орловский ГАУ были проведены полевые испытания стрельчатых лап посевного комплекса John Deere 730, упрочненных методом КВДУ с использованием паст, в сравнении с новыми не упрочненными изделиями. Полевые испытания упрочненных стрельчатых лап проводились на полях Орловской области при посеве яровых и озимых зерновых культур по предварительно подготовленной почве. Посевной комплекс агрегатировался с трактором John Deere 8430. Показано, что упрочнение стрельчатых лап КВДУ с тыльной стороны позволяет повысить их наработку на отказ до 76–77 га, что в среднем в 2,1 раза выше, чем у серийной неупрочненной лапы. Таким образом, применение метода КВДУ позволяет значительно повысить износостойкость и ресурс стрельчатых лап зарубежных машин для обработки почвы [10, 84].

Известны работы по упрочнению рабочих органов при их восстановлении электроимпульсным наращиванием чугуна, применением электромеханической обработки, электромагнитного напыления и др. Перечисленные методы

упрочнения малопроизводительны, имеют существенные ограничения по толщине упрочненного (нанесенного) слоя, износостойкость деталей увеличивалась не более чем в 1,4–1,9 раза. Наибольшее применение при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин нашли наплавочные методы и приварка различных пластин [94, 95].

1.9 Результаты обобщения способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин

Анализ способов повышения износостойкости и долговечности рабочих органов при их ремонте дан в работах [101–125]. Основные результаты обобщения и анализ способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин сведены в таблицах 1.11. и 1.12.

Таблица 1.11 – Результаты обобщения способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин

Наименование рабочего органа	Технология и ее эффективность	Разработчик
1	2	3
Анкерные сошники сеялки Primera DMC-9000 фирмы Amazone (Германия)	Упрочненные комбинированным покрытием и ТВЧ-закаленные долота проявляют в 1,5–2 раза более высокую износостойкость по сравнению с контрольными (серийными)	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Лемех компании Kverneland Group	Приваривание режущей лезвийной части, изготовленной из стальной полосы и термоупрочненной по всему объёму на твёрдость 40 HRC. Нарботка до предельного состояния 40–80 га. Увеличение в 1,2–1,3 раза по сравнению с оригинальным лемехом	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

Продолжение таблицы 1.11

1	2	3
Лапа культиватора	Технология упрочнения рабочих органов сельскохозяйственной техники боронитроцементацией и металлокерамическими покрытиями, обеспечивающими самозатачивание и увеличение ресурса деталей в 3–4 раза по сравнению с новыми	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Лапы культиваторов «Паук»	Технология электродугового упрочнения увеличивает в среднем в 3 раза ресурс по сравнению с заводской технологией закалки	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Лемех плуга	Применение эпоксиднопесчаных композитов. Увеличение ресурса в 2,2–2,7 раза, в сравнении с лемехами заводского исполнения	Брянский ГАУ
Лемех плуга «Вари Титан» Lemken	Приваривание лезвия-накладки с последующей наплавкой износостойкого материала Castolin PE1229. Ресурс упрочненного лемеха при эксплуатации на южно-черноземных почвах в 4,6–5,0 раза выше, чем у серийных	Оренбургский ГАУ
Стрельчатые лапы посевного комплекса John Deere 730	Карбовибродуговое упрочнение стрельчатых лап с тыльной стороны позволяет повысить их наработку на отказ до 76–77 га, что в среднем в 2,1 раза выше, чем у серийной неупрочненной лапы	Орловский ГАУ

Продолжение таблицы 1.11

1	2	3
Стрельчатые лапы культиватора	Плазменное напыление на установке «Плазма-401». Повышение износостойкости стрельчатых лап в 1,5 раза, упрочненных этим методом относительно неупрочненных	Санкт-Петербургский ГАУ
Стрельчатые лапы посевного почвообрабатывающего комплекса «Кузбасс» (АО «АНИТИМ»)	Композиционные покрытия, полученные при ТВЧ-борировании, увеличивают ресурс до 3–5 раз	Алтайский ГАУ
Стрельчатые лапы культиваторов	Ресурс культиватора, укомплектованного рабочими органами, восстановленными и упрочненными электролизным борированием и наплавкой в жидком теплоносителе, повысился в 1,8 раза	Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова
Лапы культиватора	Лапы культиватора, восстановленные и упрочненные газопламенной наплавкой износостойким порошковым материалом, имеют ресурс работы на 27,7% выше, чем у серийных лап	Башкирский ГАУ

Окончание таблицы 1.11

1	2	3
Рабочие органы почвообрабатывающих машин	Термообработка с дополнительным упрочнением методом термоконтактного плакирования твердым сплавом. Увеличение ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин в 1,5–2 раза	Алтайский научно- исследовательский институт технологии машиностроения
Рабочие органы почвообрабатывающих машин	Восстановление и упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин путем плазменно-порошковой наплавки твердосплавных электроэрозионных материалов позволяет повысить ресурс в 1,5 раза	Курский ГАУ

Таблица 1.12 – Результаты обобщения способов крепления компенсационных накладок (пластин) к рабочим органам машин при их ремонте

Наименование рабочего органа	Особенность технологии	Разработчик (автор, организация)
1	2	3
Лемех	Припайка чугуновой пластины с тыльной стороны и наплавка электродом Т-590 на лицевую сторону	Сабуркин Д.А.
Лемех	Приварка термоупрочненных компенсирующих элементов (листы рессор)	Новиков А.А.

Окончание таблицы 1.12

1	2	3
Лапа культиватора	Приварка с тыльной стороны пластины из рессорно-пружинной стали с объёмным термоупрочнением	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; Брянский ГАУ
Лемех	Приклеивание армирующей ленты	Брянский ГАУ
Лемехи плуга «Вари Титан» Lemken	Приваривание лезвия-накладки с последующей наплавкой износостойкого материала Castolin PE1229	Орловский ГАУ
Лемех компании Kverneland Group	Приваривание режущо-лезвийной части, изготовленной из стальной полосы	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Стрельчатые лапы культиваторов и посевных комплексов	Приварка режущо-лезвийной части, изготовленной из рессорно-пружинных сталей (например, марок 50ХГ, 60Г, 65Г), термоупрочненные до твердости 40–45 HRC	Орловский ГАУ
Лемехи	Крепление пластин на поверхностях рабочих органов с помощью высокопрочного клея: - пластин и брусков из износостойкого белого чугуна марки ИБЧ300Х9Ф6; - пластин и конусных наставок из износостойкой стали Х12; - пластин из корундовой керамики марок ТК-Г, Лунат-2, Б-11	РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
Стрельчатые лапы культиваторов	В сменной угловой пластине выполняют сквозные продолговатые отверстия, затачивают с образованием лезвия. На восстанавливаемой стрельчатой лапе культиваторов выполняют резьбовые отверстия для крепления сменной угловой пластины посредством винтов	Патент № 2467857 Способ восстановления стрельчатых лап культиваторов

1.10 Возможности диффузионного хромирования для восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающей техники

Наиболее эффективным методом повышения поверхностной твердости стали является диффузионная металлизация. Тугоплавкие металлы при диффузионном насыщении поверхности деталей позволяют придавать им определённый комплекс физико-механических свойств, значительно отличающихся от основного металла. Диффузионное насыщение поверхности детали приводит к формированию принципиально нового композиционного материала, обладающего качественно иными и весьма высокими характеристиками, отвечающими условиям работы детали [126].

Достоинства диффузионных покрытий:

- высокая износостойкость;
- высокая коррозионная стойкость;
- высокая адгезия с упрочняемой поверхностью.

Недостатком диффузионных покрытий является их небольшая толщина (0,01–0,3 мм), что значительно сокращает возможность их использования. Кроме того, при проведении диффузионной металлизации существенно изменяется структура обрабатываемой стали, что может негативно отразиться на ее механической прочности [126]. Однако диффузионная металлизация позволяет существенно, в несколько раз, повысить износостойкость и коррозионную стойкость стали, чего не позволяет сделать ни один из других способов упрочнения [127, 128, 129].

Термодиффузионное хромирование – процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей хромом при температуре 950–1300°С путем диффузии хрома в железо. Карбидные диффузионные покрытия на основе тугоплавких металлов имеют высокую износостойкость как при обычных, так и при высоких температурах. Карбидообразующая способность элементов зависит от степени их сродства с углеродом. По этому признаку их можно расположить в порядке возрастания карбидообразующей способности и устойчивости карбидных фаз в следующем порядке:

Fe-Mn-Cr-Mo-W-Ta-V-Nb-Ti

Самыми высокими физико-механическими свойствами обладают карбид титана (TiC), имеющий микротвёрдость в 4–6 раз выше микротвёрдости деталей, изготовленных из высоколегированных сталей.

Наиболее изучен газовый метод насыщения сталей тугоплавкими металлами. Однако технология паровакуумного контактного метода в большей мере отвечает современным требованиям и условиям труда рабочих и технологии производства. С технологической и экономической точек зрения наиболее перспективным является использование хрома в качестве материала насыщения [126]. Диффузионному насыщению поверхностных слоёв хромом подвергаются изделия, работающие в условиях износа и эрозии, при низких и высоких температурах; в средах, вызывающих химическую и электрохимическую коррозию; на усталость – механическую, термическую, коррозионную; в условиях магнитно-электрических полей [126]. В ряде случаев процесс хромирования изделий можно успешно совмещать с термообработкой, это характерно для жаропрочных и жаростойких сплавов, трансформаторного железа, инструментальных сталей. Хромирование можно использовать также для предварительного насыщения изделий хромом с целью последующего насыщения хромированного слоя другими элементами, например алюминием, кремнем, бором, углеродом [126].

Диффузионное хромирование осуществляется четырьмя основными методами. Твёрдый метод диффузионного хромирования применяют при контакте твёрдых кусочков хрома, порошка или обмазки с поверхностью изделия в процессе нагрева. Поступление элемента на поверхность изделия происходит через места контакта хрома. Процесс осуществляется в обычной или инертной атмосфере. Газовый метод хромирования основан на взаимодействии газовой фазы, содержащей хром, связанный в химическое соединение и восстановление его на подложке (изделия) чаще всего с помощью водорода при температурном воздействии [126]. Метод газового хромирования является одним из самых распространённых и достаточно изученных [130–133].

Газовый метод осуществим как контактным, так и неконтактным способом. Большие возможности имеются при неконтактном способе газового хромирования, так, обрабатываемые изделия контактируют только с газообразной фазой, содержащей соединения хрома. Хромирование жидким методом основано на температурном взаимодействии поверхности хромируемых изделий с расплавами солей, содержащих хром. Несмотря на высокое качество хромирования и возможности закалки изделий, жидкий метод ещё не нашёл широкого применения в связи с активным испарением расплавленных солей при температурах свыше 1000°С. Парофазный метод диффузионного хромирования основан на явлении сублимации хрома при нагреве. Процесс можно осуществлять контактным и неконтактным способами.

В случае хромирования контактным способом изделие помещают в контейнер и засыпают дроблёным хромом или феррохромом. С инертной добавкой процесс ведут в нейтральной или восстановительной атмосфере. Вакуумный способ наиболее производителен [126]. При проведении процесса в вакууме скорость процесса увеличивается, это связано с тем, что вакуум поднимает температуру испарения хрома, что интенсифицирует протекание процесса.

Вакуумный способ хромирования – один из наиболее технологичных – имеет ряд существенных достоинств: высокую культуру производства, отсутствие вредных и взрывоопасных газов, отходов производства, возможность получения покрытий высокого качества.

Большой вклад в разработку технологий использования данного процесса для восстановления деталей внесли Бугаев В.Н., Богачев Б.А., Гусейнов А.Г., Казанцев С.П., Кочетов Э.И., Мазаев Ю.В. и другие ученые [126, 134–141]. Ими созданы эффективные технологии нанесения диффузионных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники, работающих в различных условиях изнашивания: термодиффузионное хромирование и титанирование в вакууме штоков гидроцилиндров, поршневых пальцев двигателя ЗМЗ-53, валов картофелеуборочного комбайна ККУ-2, деталей топливного насоса низкого давления. Применение диффузионных покрытий при восстановлении и

упрочнении деталей машин позволяет повысить износостойкость в различных случаях от 1,7 до 3 раз.

Метод диффузионного хромирования является наиболее перспективным в вакууме. Кочетовым Э.И. разработан технологический процесс упрочнения режущих элементов волчков, позволяющий увеличить их долговечность в 4–6 раз [134]. Диффузионное хромирование и термоциклирование проводится в печи модели СНВЭ1.3.1/16 ИЗ. Предварительное термоциклирование проводится при остаточном давлении не ниже $1,33 \times 10^{-3}$ Па, режущие элементы располагаются на техническом столе в печи в кассетах. После проведения предварительной ТЦО, режущие элементы волчков подвергаются парофазному диффузионному хромированию в вакууме при температуре 1180–1200°C, при такой температуре изделия выдерживаются 8 ч. Для этой цели ножи решета помещаются в специальный контейнер и засыпаются дробленным хромом марки Х-97 с размером частиц хрома 0,4–0,6 мм [134].

В работе Сергеева В.З. на базе метода диффузионного хромирования в порошках была разработана технология восстановления плунжерных пар топливных насосов распределительного типа, позволяющая повысить их ресурс в 2 раза [138]. Процесс хромирования проводится в контейнере с использованием электропечи типа СНО по режиму 980–990°C с последующей выдержкой 4 ч и охлаждением вместе с печью до 100°C [134].

В работе Гусейнова А.Г. рассматривалась возможность упрочнения плунжерных пар насосов УТН-5 методом парофазного диффузионного хромирования в вакууме [139]. Проведенные им исследования показали увеличение ресурса работы насоса с упрочненными плунжерными парами в 2 раза. Метод восстановления и упрочнения плунжерных пар топливных насосов с применением парофазного диффузионного хромирования высокотехнологичен, поскольку не требует приготовления сложных смесей. Парофазное хромирование в вакууме проводится в печах типа СНВ. Упакованные в специальный контейнер детали засыпаются дробленным хромом марки Х-97 с размером частиц хрома 0,4–0,6 мм. Контейнер, закрытый крышкой, устанавливается в печь и нагревается до 1180–

1200°С, предварительно создав в камере печи остаточное давление, выдерживают при такой температуре в течении 6 ч, затем охлаждают в вакууме до комнатной температуры [139].

В работах Бугаева В.Н. и Мазаева Ю.В. отмечается, что диффузионное вакуумное хромирование целесообразно применять для восстановления и упрочнения деталей, изготовленных из высокоуглеродистых сталей (ХВГ, ШХ-15) [126, 136]. При этом образуются покрытия, основной упрочняющей фазой которых являются карбиды хрома, имеющие микротвердость 16500–22800 МПа, что предъявляет особые требования к механической обработке восстановленных деталей [126, 136].

Казанцев С.П. в работе, посвященной формированию хромо-нитридного покрытия на азотированной стали 25Х5МА разработал технологию, позволяющую восстанавливать плунжерные пары топливных насосов не только при первом, но и при повторном ремонте [140]. Он предложил разделить процессы восстановления втулок и плунжеров на два этапа. Втулки восстанавливаются методом вакуумного парофазного хромирования, а плунжеры – контактного газового хромирования в среде аргона с применением двухкомпонентных смесей с последующим высокотемпературным азотированием. Разработанная технология позволяет получать изменение линейных размеров изделий до 180 мкм. Ускоренные стендовые и эксплуатационные испытания показали двукратное увеличение ресурса работы топливных насосов с восстановленными сборочными единицами по сравнению с новыми насосами. Плунжеры устанавливают в кассеты, помещают в контейнер, а затем засыпают порошком, состоящим из смеси хрома марки Х-97 (99%) и фтористого аммония (1%). Контейнер, накрытый крышкой, помещают в камеру печи и после откачки воздуха в камеру подается аргон при температуре 1060°С. Хромирование производится в течение 6 ч. Этот метод позволяет получить микротвердость плунжеров 15000–17500 МПа, при этом твердость сердцевины получается равной 27–31 HRC [140].

Богачёвым Б.А. исследованы возможности применения диффузионного хромирования в вакууме для упрочнения молотков комбикормовых дробилок.

Результаты эксплуатационных сравнительных испытаний показали повышение износостойкости молотков в 2,5–4 раза [135].

В МГАУ им. В.П. Горячкина (ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева) была разработана технология упрочнения режущих рабочих органов промышленных мясорубок. Износостойкость образцов после диффузионного парофазного хромирования в вакууме была в 7,8–12,5 раза выше износостойкости образцов из стали У8А. Эксплуатационные испытания режущих комплектов промышленных мясорубок, упрочненных диффузионной металлизацией, показали, что наработка серийных режущих комплектов до отказа составила 6,5–8 ч, экспериментальных – 13–18 ч [142]. Получен патент на изобретение RU2282677C1 Способ упрочнения деталей [143]. Описание изобретения к патенту приведено в приложение 1.

Его суть заключается в том, что чугунную стружку перемешивают с порошком хрома с размером частиц 0,1–0,6 мм, помещают в контейнер, обрабатывают методами диффузионной металлизации при температуре 1050–1150°C, выдерживают от 2 до 8 ч, охлаждают до комнатной температуры, распаковывают контейнер, затем обработанную таким способом стружку наносят на ленту для электроконтактной приварки или на образец листового металла, далее эту ленту или металл приваривают электроконтактным способом к детали.

Выводы

1. Анализ технической оснащенности сельского хозяйства показывает, что в России для обработки почвы используется большая доля зарубежной техники. Эти машины вошли в Перечень критической промышленной продукции в отрасли сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации. Основными потребительскими свойствами почвообрабатывающей техники, том числе культиваторов являются качество обработки и надежность машин.

2. Основным рабочим органом культиваторов для сплошной и междурядной обработки почвы является стрелчатая лапа. При обработке почвы на рабочем органе возникают значительные нагрузки со стороны обрабатываемой среды.

Действие данных нагрузок приводит к деформациям и изгибу конструкции. Анализ эксплуатационно-технологических показателей культиваторов, выполненный исследователями, показал, что в среднем наработка на отказ лап культиваторов составляет 7–18 га.

3. Основные дефекты лап культиваторов – затупление лезвийной части, износы носка и крыльев, наличие деформаций, изломы. Более 60% стрелчатых лап теряют работоспособное состояние из-за предельного износа носка и ширины крыльев.

4. В большинстве случаев износостойкость и долговечность стрелчатых культиваторных лап зависят от применяемых конструкционных материалов, наличия термообработки и упрочняющих воздействий в зоне режущей кромки. Учитывая, что лапы культиваторов в основном изготавливают из стали 45Г или 65Г, в процессе выполнения рабочих операций наблюдается износ режущей части конструкции. Поэтому для повышения ресурса рабочие органы при изготовлении упрочняют, в том числе легирующими элементами.

5. Российские предприятия в рамках импортозамещения накопили большой опыт по изготовлению рабочих органов зарубежной почвообрабатывающей техники, в том числе лап культиваторов. Анализ упрочняющих технологий восстановления рабочих органов при ремонте почвообрабатывающей техники показал, что в настоящее время для этих целей применяют наплавочные способы, нанесение газотермических покрытий, применение клеполимерных композиционных материалов и др.

6. Одной из распространенных технологий восстановления работоспособности рабочего органа является крепление компенсационных пластин к режущей части. Они позволяют снизить лобовое сопротивление движению лапы, увеличить долговечность детали путем неоднократного восстановления и использования компенсирующих пластин с такой же или с увеличенной износостойкостью. Крепление пластин к рабочему органу проводят приваркой, с помощью клея или резьбовым соединением.

7. Наиболее эффективным методом повышения износостойкости деталей является диффузионная металлизация, в том числе хромирование. Однако сведения о восстановлении и упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием таких технологий отсутствуют.

8. При разработке технологий восстановления работоспособности рабочих органов остается ряд нерешенных задач, в том числе установление влияния технических и технологических решений на потребительские свойства почвообрабатывающих машин.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ДИФфуЗИОННЫМ ХРОМИРОВАНИЕМ

2.1 Теоретическое обоснование диффузионного хромирования для восстановления работоспособности лап культиваторов

2.1.1. Теоретическое описание диффузионных процессов при хромировании

Движущей силой диффузионного процесса является разность химических потенциалов веществ, которая вызывается различными причинами. В случае диффузионной металлизации градиент химического потенциала предопределяется градиентом концентрации насыщающего вещества на поверхности нагретого тела и внутри его. Движение атомов становится направленным в сторону выравнивания концентрации и возможно при условии его растворимости, если разница в атомных диаметрах диффузионного вещества и металла-растворителя не превышает 15–16%. Изучению механизма диффузии посвящены работы [131, 144, 145]. Степень насыщения зависит от скорости поступления атомов хрома в активной форме из хромонасыщающей среды к поверхности металла и скорости проникновения атомов с поверхности металла в его глубину, т.е. от скорости диффузии [134]. От соотношения этих двух скоростей процесса зависит концентрация атомов хрома на нагретой поверхности.

Скорость диффузионного потока выражается коэффициентом диффузии D и зависит от многих факторов. Самое большое влияние на коэффициент диффузии оказывает температура процесса. Зависимость коэффициента диффузии от температуры выражается уравнением Аррениуса [134]:

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q_a/RT), \quad (2.1)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, см²/с;

Q_a – энергия активации или энергия разрыхления кристаллической решетки, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/моль;

T – абсолютная температура, К.

Логарифмируя уравнение (2.1) получаем линейную зависимость коэффициента диффузии от температуры процесса:

$$\ln D_0 - Q_a/RT, \quad (2.2)$$

Это линейное уравнение для случая диффузии хрома при диффузионном хромировании различными методами.

Предэкспотенциальный множитель D_0 определяется по следующей формуле:

$$D_0 = V \cdot \Delta^2 \cdot \nu \cdot \exp(\Delta S/R), \quad (2.3)$$

где ΔS – изменение энергии;

V – численный коэффициент, зависящий от геометрии строения материала (для трехмерной решетки 1/6);

ν – частота колебаний молекулы (по литературным источникам эта величина составляет 10^{13}с^{-1} [134]);

Δ – расстояние между соседними плоскостями кристаллической решетки.

Согласно литературным источникам [126, 134], допустимо следующее выражение:

$$D_0 = V \cdot \Delta^2 \cdot \nu, \quad (2.4)$$

Энергию активации или энергию разрыхления кристаллической решетки определяем из следующего выражения:

$$Q_a = \Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V, \quad (2.5)$$

где ΔH – изменение энергии теплосодержания;

ΔU – изменение внутренней энергии;

ΔV – изменение объема при переводе атома из одного вещества в другое.

Дефекты кристаллического строения, такие как размер зерна, концентрация диффундирующего элемента, искажение кристаллической решетки, внутренние напряжения и состояние поверхности, также оказывают влияние на коэффициент диффузии.

2.1.2 Теоретическое обоснование возможности диффузионного хромирования стальной пластины

Исходя из анализа работ [126, 134] механизм образования диффузионного слоя на железоуглеродистых сплавах можно представить следующим образом. После адсорбции на поверхности металла тонкого слоя хрома из паровой фазы, по механизму замещения происходит интенсивная диффузия атомов хрома в глубь стальной подложки и встречная диффузия углерода к поверхности изделия. В результате диффузии хрома и углерода в приповерхностном слое образуются химические соединения – интерметаллиды и карбиды насыщающего элемента. В связи с этим скорость взаимной диффузии резко уменьшается, так как подвижность атомов в этих химических соединениях мала. В результате в приповерхностном слое образуется карбидный слой толщиной h_1 и происходит движение внешней границы слоя наружу на величину δ_1 (рисунок 2.1), т.к. углерод обладает более высокой активностью, он, проходя через слой карбидов, способствует росту карбидного слоя с внешней стороны.

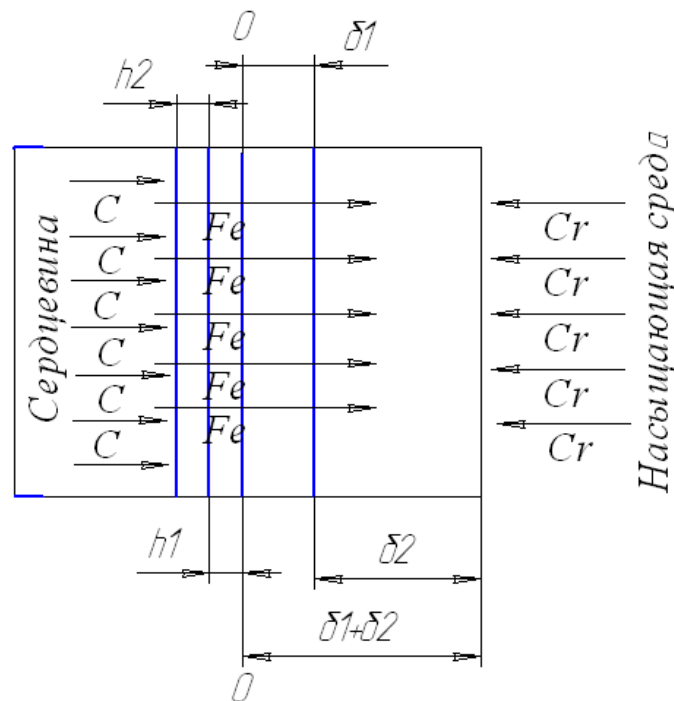


Рисунок 2.1 – Схема образования карбидного слоя: h_1 – толщина карбидного слоя; h_2 – толщина слоя на основе раствора хрома в железе; δ_1 – толщина карбидного слоя фазовых превращений; $(\delta_1 + \delta_2)$ – толщина нарастающего карбидного слоя; δ_3 – слой адсорбированного хрома

В результате встречной диффузии углерода и осаждения хрома на поверхности образуется карбидный слой и происходит сдвиг его внешней границы на величину δ_2 .

Изменение линейных размеров изделия (Δ) определяется как сумма двух составляющих:

$$\Delta = 2(\delta_1 + \delta_2) \pm \delta_3, \quad (2.6)$$

где δ_1 – толщина карбидного слоя вследствие фазовых превращений в диффузионном слое;

δ_2 – толщина карбидного слоя в результате встречной диффузии углерода и осаждения хрома на поверхности.

Первая составляющая может условно рассматриваться как результат только диффузионной стороны процесса, а вторая – как результат кинетической стороны процесса.

Движение внешней границы диффузионного слоя на величину δ_1 будет пропорционально глубине диффузии насыщаемого элемента в изделие, разности параметров кристаллической решетки Fe₃C и образующегося химического соединения, формула и строение которого зависят от условия насыщения стали. Изменение δ_1 подчиняется параболическому закону от времени насыщения.

Основное насыщение δ_2 происходит в результате осаждения на поверхности атомов хрома в активной фазе и встречной диффузии углерода, приводящей к образованию на поверхности карбидов хрома и диффузии атомов железа в карбидный слой. На этом этапе толщина диффузионного слоя δ_2 будет зависеть от концентрации углерода в стали и скорости его диффузии, а также фазового строения (карбидов высшего и низшего порядка). Связанный углерод при высоком содержании легирующих элементов приводит к увеличению зоны интерметаллидов, в противном случае больший размер имеет слой карбидов. Поскольку скорость образования слоя δ_2 лимитируется скоростью диффузионного потока углерода при практической постоянной для принятых условий насыщения, скорости осаждения атомов хрома, то величина δ_2 должна изменяться по параболическому закону [134].

Диффузия углерода, а следовательно, и рост слоя, будет происходить до тех пор, пока не будет достигнута критическая толщина карбидного слоя ($\delta_1 + \delta_2$). С увеличением толщины карбидного слоя снижается скорость диффузии атомов углерода, а под карбидным слоем образуется, в противоречие закона разности химических потенциалов вещества, обезуглероженная зона. В данном случае диффузионный поток углерода подчиняется термодинамическому состоянию системы и зависит от активности диффузионного вещества. К тому же хром является сильным карбидообразующим элементом.

Направление и скорость диффузионного потока атомов углерода зависит от многих факторов. На первом этапе под воздействием температуры, в однородном твердом растворе углерода, его движущей силой является разность химических потенциалов с осажденным на поверхности хромом. Дополнительное влияние на скорость потока углерода оказывают реакция карбидообразования, температурный градиент изделия и остаточное давление вакуумной камеры.

Снижение активности диффузионного процесса объясняется укрупнением с течением времени структуры металла, что приводит к снижению интенсивности потока углерода по границам раздела межзеренной поверхности. Если в начале процесса концентрация углерода достаточна для интенсивного формирования слоя δ_2 , то в конце контролирующая стадия процесса находится в прямой зависимости от скорости диффузии углерода через слои ($\delta_1 + \delta_2$) из внутренних слоев изделия и от его концентрации под карбидным слоем.

Однако от наличия концентрации свободного углерода в стали зависят толщина диффузионного слоя и изменение линейных размеров деталей [134].

Толщина наращиваемого слоя лишь изначально превышает толщину карбидной зоны при понижении содержания углерода. В остальных случаях толщина диффузионного слоя превышает толщину наращиваемого слоя, что подтверждает теорию образования наращиваемого слоя в изделии [126]. В процессе вакуумного хромирования сталей происходит в основном наращивание карбидного слоя наружу (δ_2), глубина диффузии хрома в сталь незначительна. С

увеличением концентрации свободного углерода в стали толщина диффузионного слоя возрастает.

Из литературных источников [126, 134] известна следующая зависимость определения толщины карбидного слоя:

$$\xi = v\sqrt{D\tau}, \quad (2.7)$$

где τ – продолжительность диффузии;

D – скорость потока (коэффициент диффузии);

v – константа, зависящая от концентрации насыщающего элемента и температуры процесса.

Количество продиффундировавшего вещества в общем случае можно представить как произведение скорости потока на продолжительность процесса диффузии:

$$Q = D\tau, \quad (2.8)$$

где Q – количество продиффундировавшего вещества.

Таким образом, теоретически обоснована возможность диффузионного хромирования стальной пластины.

2.2 Теоретическое обоснование влияния основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора

При рыхлении происходит разрушение в почве капиллярных токов, способствующих её иссушению, а также приведение слежавшейся почвы в мелкокомковатое состояние. Плоскорезная обработка обеспечивает крошение, рыхление почвы и подрезание подземных частей корней сорных растений на глубину 27–30 см с сохранением на поверхности до 90% жнивья (стерни). Плоскорезная обработка широко применялась в почвозащитной системе земледелия, разработанной академиком ВАСХНИЛ А.И. Бараевым для целинных земель северного Казахстана. В ее основу положена система обработки под зерновые культуры без оборота пласта с сохранением стерни на поверхности [146]. Для выполнения глубокого рыхления в плоскорезной системе обработки почвы широкое применение получили плоскорезы-культиваторы (КПГ-2-150, КПГ-250, -

7; STAVR ПГ-7, -5; КПШ-5, -7, -9; КУН-7) – лаповые культиваторы, предназначенные для глубокого (до 30 см) и поверхностного (до 16 см) рыхления с сохранением на поверхности до 80% стерни (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Плоскорез-культиватор КУН

Рабочий орган (лапа культиватора) в плане имеет стрелчатую форму, по краям которой расположены режущие кромки, образующие угол 80° в плане. В поперечном сечении верхние поверхности образуют угол $\lambda = 150^\circ$ с вершиной на продольной оси лапы (рисунок 2.3).

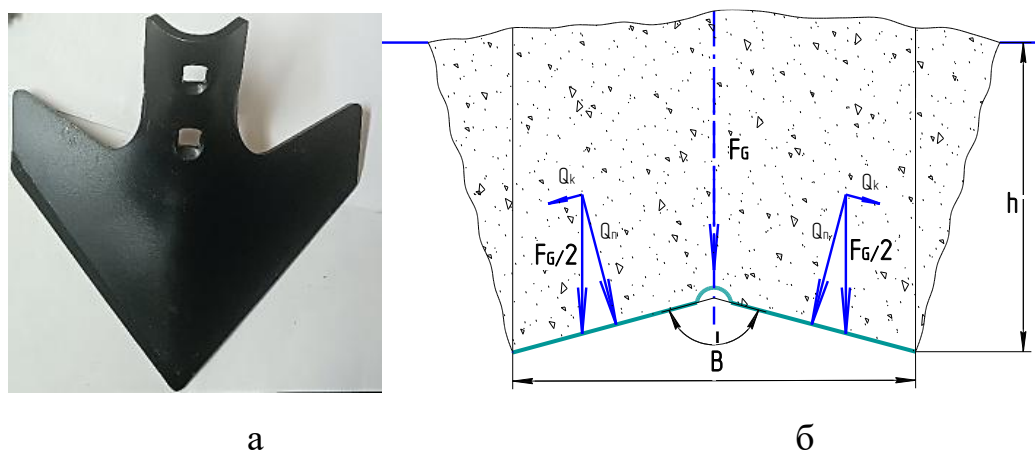


Рисунок 2.3 – Сечение лапы культиватора: а – общий вид; б – поперечное сечение лапы с зоной разрыхлённой почвы

Изучение закономерностей физических процессов, происходящих при воздействии рабочего органа на грунт, является довольно сложной задачей в основном из-за неоднородности почвы и изменчивости ее механических характеристик в зависимости от различных факторов, таких как гранулометрический состав, степень окультуренности, засорённости посевов, и агрофизических свойств почвы [146].

Соппротивление рыхлению является важным показателем агрегата, влияющим на тягово-сцепные характеристики, экономичность, производительность, износ режущих кромок рабочего органа. Следует отметить, что большинство существующих методов расчёта тягового усилия культиваторов основано на эмпирических данных. Так, в работе [147] приведены достаточно подробные рекомендации по проектированию лапы культиватора с определением всех размеров, углов и построением развёртки заготовки. Однако тяговое усилие рекомендуется определять зависимостью:

$$F_k = qb + \mu Q,$$

где q – удельное сопротивление почвы, кгс/м;

b – ширина захвата, м;

Q – вертикальная нагрузка на колёса культиватора;

μ – коэффициент перекатывания.

Удельное сопротивление почвы q определяется по опытным данным в зависимости от глубины рыхления. При увеличении глубины от 6 до 12 см удельное сопротивление изменяется от 80–100 до 150–240 кгс/м.

Этот метод удобно применять для ориентировочной оценки тягового усилия агрегата. В расчёте не учитываются свойства обрабатываемой среды, состав почвы, плотность, влажность, не приведено данных для выбора q при более глубокой обработке, желательно до глубины 0,3–0,4 м, не учитывается такой важный параметр, как угол резания, а также влияние износа режущей кромки лапы. Длительное взаимодействие лапы культиватора с абразивной средой способствует износу режущей кромки, и как следствие, увеличению тягового усилия. Кроме того, в предшествующих исследованиях мало уделялось внимания изучению

качества рыхления, однородности агрегатов разрыхлённой почвы по глубине обработки, распределению размеров агрегатов в верхнем слое, что важно учитывать при посеве различных культур.

Резание и рыхление всеми элементами лапы представляют собой сложный физико-механический процесс. При этом рабочий орган полностью находится на глубине 0,15–0,3 м, что является блокированным резанием. Обработка почвы происходит без оборота пласта.

При движении агрегата режущие кромки лапы, представляющие собой в плане клин, осуществляют отрыв определённого объёма почвы от массива. Пласт, отделяемый лапой, перемещаясь по ее наклонной верхней поверхности, установленной с определённым углом резания, поднимается пласт вверх и в обе стороны от продольной оси лапы. Под силовым воздействием происходит разрушение почвы в зоне действия лапы.

Анализируя процесс взаимодействия лапы культиватора с почвой, силу сопротивления рыхлению можно представить как сумму основных составляющих. В первую очередь следует определить силу резания при отделении некоторого объёма почвы от массива, которая зависит от параметров лапы и физико-механических свойств почвы. Сила тяжести отделяемого объёма почвы возникает при его подъёме. Величину силы тяжести F_G (Н) можно определить по формуле

$$F_G = V\rho g,$$

где V – объём поднимаемой почвы, см³;

ρ – плотность почвы, г/см³;

$g = 9,81$ м/с².

Объём почвы V зависит от угла резания α , глубины рыхления, размеров лапы. При расчёте объёма учитываются основная часть над поверхностью лапы V_1 и объёмы в боковых зонах V_2 в виде двух призм с углом при вершине = 15°:

$$V_1 = A_{\text{л}}h, \quad V_2 = lh^2 \text{tg}15^\circ,$$

где $A_{\text{л}}$ – площадь верхней поверхности лапы, см²;

l – длина лапы, см.

Пласт почвы, перемещаясь по поверхности лапы, создаёт силу трения почвы по стальной поверхности. При подъёме почвы и перемешивании её слоёв в результате пространственного перемещения агрегатов в зоне рыхления возникает сила трения почвы по почве. Преодоление инерции движущейся лапой относительно массива почвы, находящейся в состоянии покоя, возникает сила инерции, зависящая от скорости движения и массы перемещаемой почвы. При рыхлении происходит увеличение объёма почвы, вытеснение её вверх, образование полосы разрыхлённой почвы. Форма полосы и высота над дневной поверхностью в основном зависят от свойств почвы и угла резания. При увеличении угла резания происходит более интенсивное выпирание почвы вверх [147, 148, 149].

На основании выполненных исследований предлагается метод расчёта силы сопротивления рыхлению F с учётом физических основ разрушения почвы как сумма отдельных силовых составляющих

$$F = F_p + F_{Tp} + F_G + F_{Tp.зр} + F_g,$$

где F_p – сила резания;

F_{Tp} – сила трения почвы по стали;

F_G – сила тяжести почвы;

$F_{Tp.зр}$ – сила внутреннего трения почвы;

F_g – сила инерции.

Сила резания определяется как произведение удельного сопротивления резанию k_p и площади поперечного сечения режущего профиля A :

$$F_p = k_p A.$$

Удельное сопротивление резанию для суглинистых почв средней плотности, которые преобладают на полях Нечерноземья, рекомендуется принимать в пределах $k_p = 0,11–0,16$ МПа [147, 150, 151].

Плотность суглинистой почвы поля в большинстве случаев принимается как $\rho = 1,4–1,6$ г/см³ [147, 152]. Сила тяжести, действующая вертикально, на поверхности лапы раскладывается на две составляющие, так как поверхность лапы с горизонталью образует угол резания α . Составляющая перпендикулярная

поверхности лапы (нормальная сила G_n) определяется как $G_n = F_G \cos \alpha$. Сила, действующая вдоль лапы (касательная G_k), – $G_k = F_G \sin \alpha$ (рисунок 2.4).

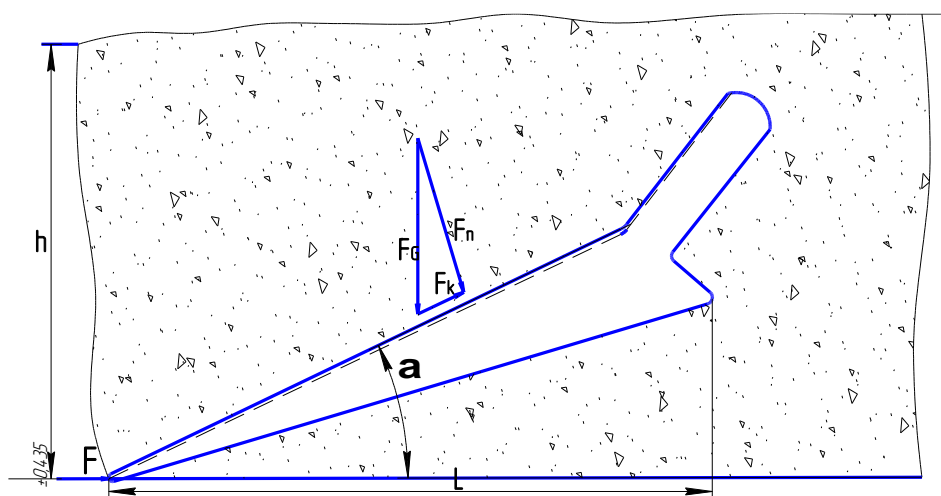


Рисунок 2.4 – Дополнительное сопротивление рыхлению, которое создаёт касательная сила G_k

Нормальная сила G_n создаёт силу трения $F_{Tr} = G_n f$, где f – коэффициент трения почвы по стали ($f = 0,45$ для влажной суглинистой почвы) [147, 152]. Касательная сила G_k создаёт дополнительное сопротивление рыхлению.

Теоретически установлено, что вертикальные составляющие усилий, действующие на элементы рабочего органа, способствуют подъёму и рыхлению пласта почвы. При этом агрофизические свойства почвы, а также параметры рыхления и рабочего органа взаимно связаны, оказывают влияние на тяговое сопротивление и качество обработки почвы.

Таким образом, получена модель влияния основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора. Среди них следует выделить коэффициент трения почвы по стали и угол резания.

2.3 Обоснование коэффициента трения рабочего органа культиватора с почвой

Фрикционные свойства при рыхлении почвы проявляются в виде двух видов трения: трение почвы по стали и внутреннее – почвы по почве при перемешивании

слоёв разрыхлённой массы. Силы трения создают дополнительное сопротивление перемещению агрегата. Силу трения при скольжении пласта почвы по стали определяют по формуле

$$F_{TP} = Nf = Ntg\varphi, \quad (2.9)$$

где N – сила, нормальная к плоскости трения;

f – коэффициент трения;

φ – угол трения почвы.

Величина угла трения φ зависит от многих факторов, в основном от механического состава почвы и влажности [153, 154, 155].

Зависимость коэффициента трения $f = \text{arctg}\varphi$ почвы по стали от содержания песка в почве приведена на рисунке 2.5.

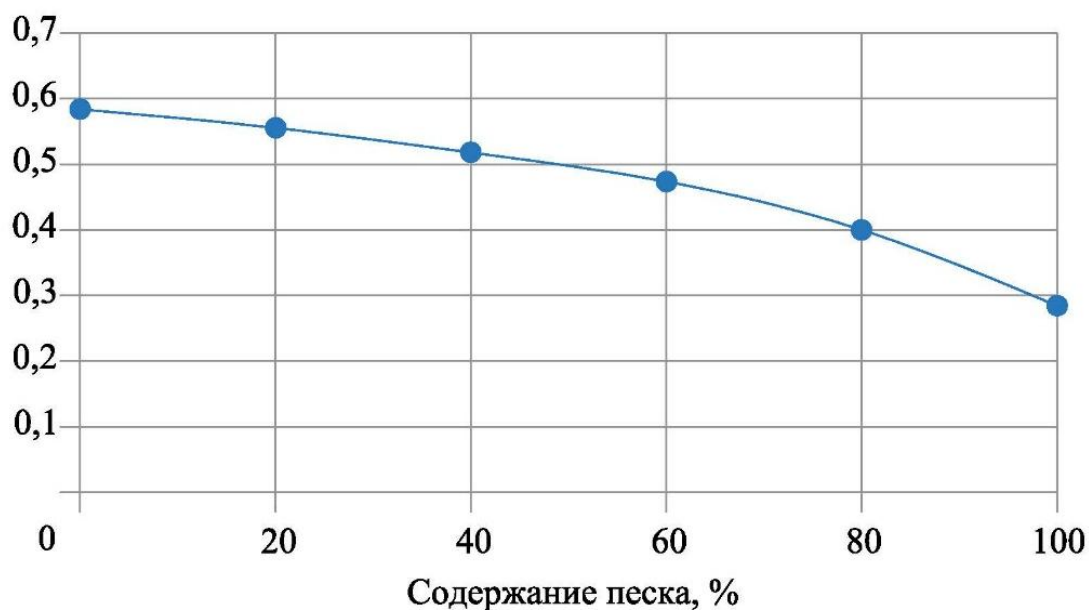


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента трения f почвы по стали от содержания песка

Влажность почвы оказывает существенное влияние на величину коэффициента трения f почвы по стали. Однако, как приведено в работе [151], увеличение коэффициента трения наблюдается до определённого значения влажности, при дальнейшем увеличении влажности коэффициент трения уменьшается (рисунок 2.6), максимум был при влажности 28–30%.

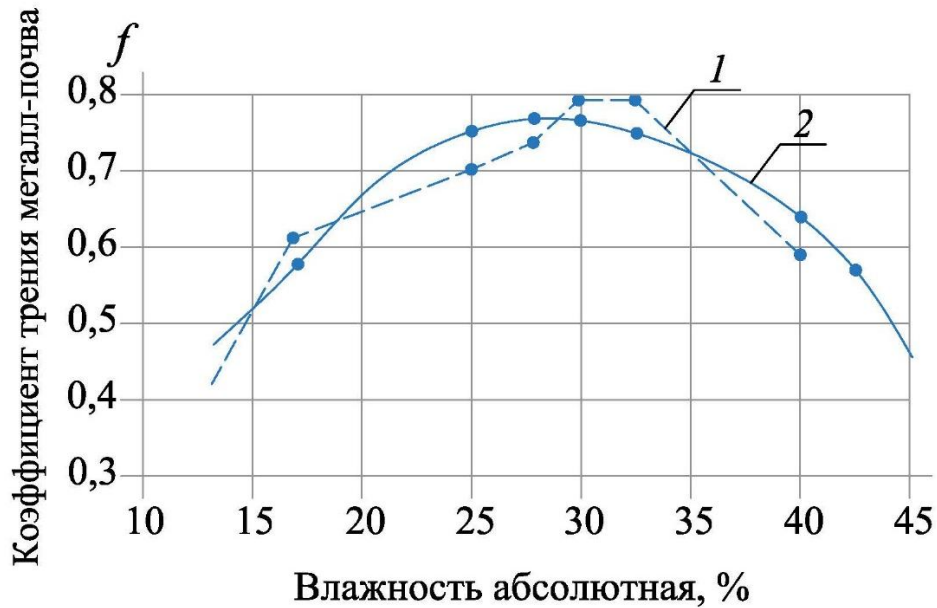


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента трения почвы по стали от влажности почвы: 1 – коэффициент трения из опыта; 2 – расчётный коэффициент трения

Изменение коэффициентов трения почвы по стали и почвы по почве зависит от величины давления на рабочий орган. При определённых величинах влажности наблюдается переход коэффициентов через минимум. При влажности 24–26% значения коэффициентов отличаются незначительно (рисунок 2.7).

Между твёрдостью почвы и степенью влажности имеется обратная корреляционная зависимость. По данным П.У. Бахтина, коэффициент корреляции составляет 0,9–1,0 [151]. Эта связь может быть представлена линейным уравнением типа:

$$B = -0,472x + 59,15.$$

Полученные зависимости можно использовать для обоснования физико-механических свойств покрытия для восстановления работоспособности рабочих органов машин. В связи с этим рассмотрим процесс восстановления лапы путем нанесения на нее упрочняющего материала (хрома), коэффициент трения которого превышает коэффициент трения почвы по почве, создавая на наиболее изнашиваемом ограниченном участке эффект залипания поверхности и защищая ее таким образом от абразивного изнашивания.

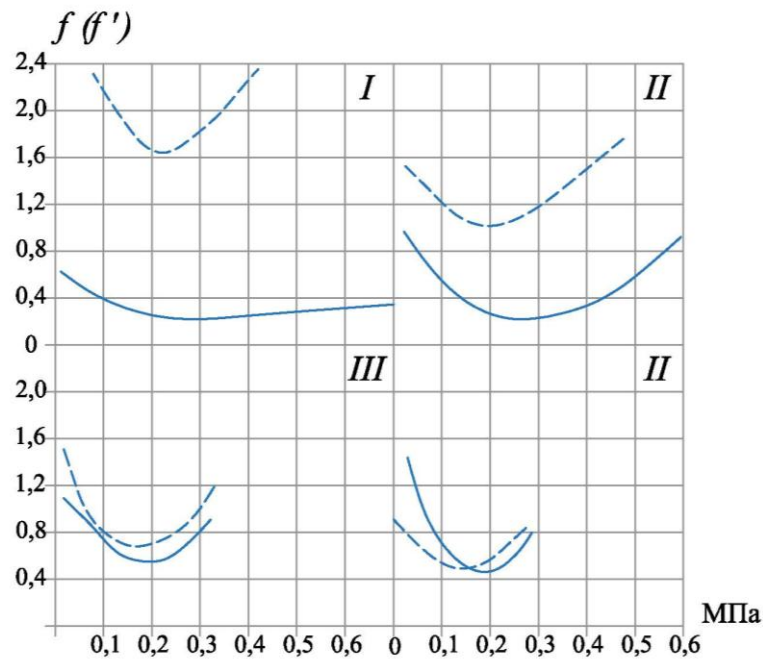


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента трения стали по почве (сплошная линия) и почвы по почве (пунктирная) от нормального давления p и влажности почвы: I – 9,8%; II – 13,9; III – 24,7; IV – 26,4%

Для обеспечения условий залипания поверхности лапы при культивации рассмотрим схему сил (рисунок 2.8), действующих на почвенные частицы m и k . Частица m соприкасается с поверхностью лапы, а частица k – с частицей m , т.е. с тонким слоем на поверхности лапы.

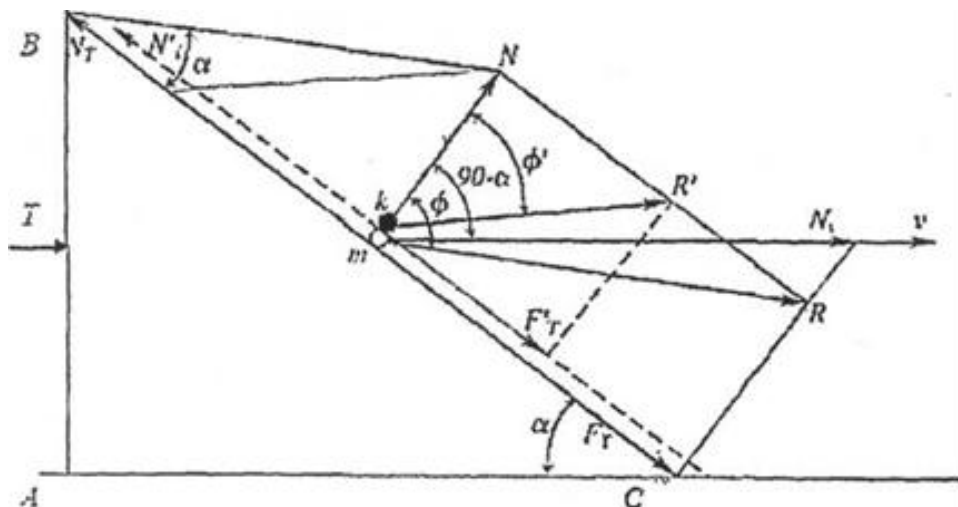


Рисунок 2.8 – Силы, действующие на почвенные частицы, соприкасающиеся с клином (Г) и почвенным слоем (С)

В общем случае лапа представляет собой клин, который перемещается под действием движущей силы T слева направо. Сила реакции пласта:

$$N = T \cdot \sin \alpha,$$

где α – угол наклона рабочей грани клина.

Нормальную силу N , действующую на почвенную частицу m со стороны рабочей поверхности, разложим на две составляющие, N_v и N_T , действующие в направлении движения клина v и вдоль его рабочей грани BC . Кроме нормального давления N на частицу m действует сила трения F_T . Силы N и F_T дают результирующую силу R , отклоненную от нормали на угол трения φ . В зависимости от угла возможны два режима работы клина: частица m скользит вдоль рабочей поверхности и частица m перемещается вместе с рабочей поверхностью (почва сгруживается перед рабочей поверхностью).

Как было отмечено, частица m контактирует с частицей k почвенного слоя. Здесь возможны три варианта работы: частица k движется вместе с частицей m по рабочей поверхности клина; частицы m и k движутся вместе с рабочей поверхностью клина, сгруживаясь перед ней; частица m движется вместе с рабочей поверхностью клина, а частица k перемещается вдоль поверхности клина.

Последний вариант наиболее интересен с точки зрения защиты рабочей поверхности от изнашивания, так как в этом случае отсутствует трение по ней.

Движение частицы m вдоль рабочей поверхности окажется невозможным, если максимальная сила трения почвы о поверхность клина F_l будет больше, чем составляющая нормального давления N_T , т.е. $F_T > N_T$. Но $N_T = N \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha)$, а $F_T = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$.

где φ – угол трения почвы о рабочую поверхность клина.

Следовательно, условие, при котором скольжения почвы по поверхности клина не будет, имеет вид:

$$N \operatorname{tg} \varphi > N \operatorname{tg}(90 - \alpha) \text{ или } \varphi > 90 - \alpha.$$

На частицу k через частицу m также действуют нормальная сила N , сила трения F'_T почвы по почве и составляющая нормального давления N'_T . При этом скольжение почвы по почве появится когда N'_T будет больше F'_T , т.е. $N'_T > F'_T$.

Но $N'_T = N \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha)$, $F'_T = N \operatorname{tg} \varphi'$,

где φ' – угол трения почвы по почве.

Следовательно, условие, при котором будет скольжение почвы по почве, имеет вид:

$$N \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha) > N \operatorname{tg} \varphi.$$

Совмещая эти условия, можно сделать вывод, что защита рабочей поверхности клина от изнашивания за счет залипания возможна при условии, если угол трения почвы о рабочую поверхность клина больше угла между нормалью и направлением движения $90 - \alpha$, а последний больше угла трения почвы о почву, т.е.:

$$\varphi > 90 - \alpha > \varphi'.$$

Другими словами, для защиты рабочей поверхности клина от изнашивания необходимо создать условия, чтобы на участке наибольшей интенсивности изнашивания коэффициент трения скольжения почвы по поверхности этого участка был равен коэффициенту трения почвы по почве или несколько превышал его.

Коэффициенты трения скольжения почва–сталь или другой материал, а также почва–почва – величины непостоянные и зависят от многих факторов, прежде всего от механического состава почвы и ее влажности, удельного давления на поверхности контакта и скорости скольжения.

Трение скольжения почва–сталь очень близко по своей природе к липкости почва–сталь. Под липкостью почвы понимается способность ее частиц прилипать к контактируемой с ней поверхности, а также склеиваться. В определенные моменты, главным образом в зависимости от влажности почвы и давления, трение скольжения почвы по поверхности рабочего органа переходит в основном в преодоление липкости.

Учитывая абразивные и фрикционные свойства в зависимости от влажности и давления при обработке, очень важно определить свойства материала, которым можно защитить изнашиваемую металлическую поверхность, прежде всего его фрикционные свойства, а также износостойкость.

Изучение зависимостей коэффициентов трения почвы о сталь, покрытие хромом показывает, что при влажности супесчаной и песчаной почв в пределах 12–16% коэффициент трения почвы о хромовое покрытие превышает коэффициент трения почвы о почву, обеспечивая, таким образом, залипание поверхности, покрытой этой композицией, и защищая ее от изнашивания. Коэффициент трения почвы о хромовое покрытие в данном случае составляет 0,50–0,60, а коэффициент трения почва–сталь в этом случае был бы 0,48–0,50.

При влажности менее 12% коэффициент трения почва–почва будет больше коэффициента трения хромового покрытия, поэтому почва станет «скользить» по покрытию, изнашивая его. Хромовое покрытие, таким образом, будет выполнять роль упрочняющего покрытия.

2.4 Обоснование толщины режущей кромки компенсирующей пластины

Износ лапы культиватора (рисунок 2.9) происходит неравномерно, наибольшей степени износа подвержена носовая часть 1, затем боковые режущие кромки 2, средняя часть 3 наиболее интенсивно изнашивается в передней части и области, прилегающей к режущим кромкам. Такой характер износа можно объяснить тем, что носок лапы, выступающий вперед, первым взаимодействует с почвой. В результате внедрения носка в массив почвы в зоне носка возникают большие давления от сил сопротивления почвы. Значения средних давлений в зоне носка существенно превышают среднее в его центральной части – примерно в 2,8–4,6 раза [12].

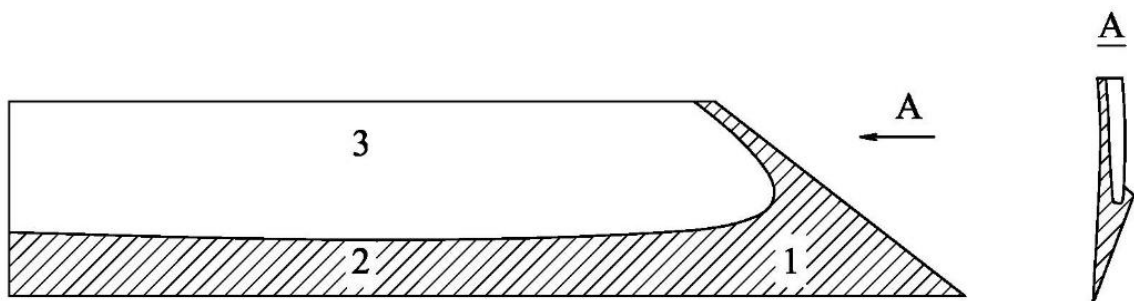


Рисунок 2.9 – Зоны износа носка и режущей кромки лапы: 1 – носовая часть; 2 – режущие кромки; 3 – средняя часть

В процессе длительной работы лапы культиватора величина вылета носка уменьшается, угол его закругляется, толщина пластины изнашивается, увеличивается сопротивление рыхлению, на твёрдых почвах рабочий орган теряет способность заглубляться. В результате предельного износа лапы культиватора выбраковываются, несмотря на запас неизношенного металла (рисунок 2.10).

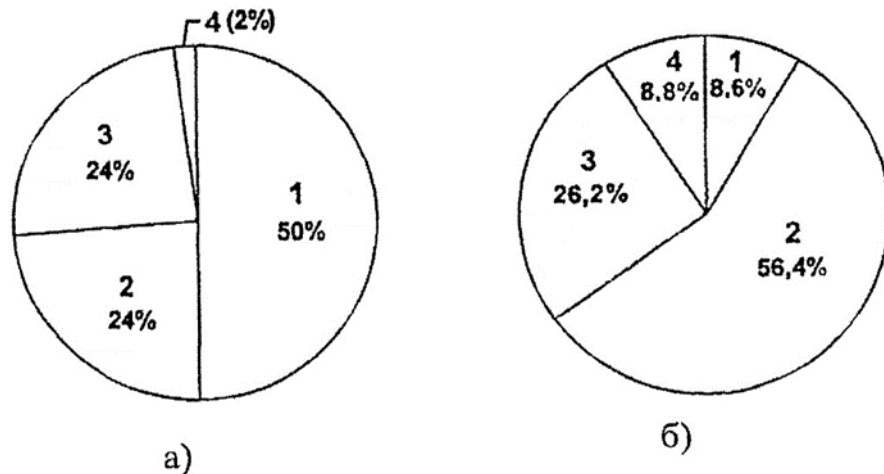


Рисунок 2.10 – Структура причин выбраковки лап: а – наплавленных (почва чернозёмная); б – ненаплавленных (почва подзолистая, суглинистая): 1 – затупление лезвия; 2 – износ носка; 3–1 и 2 одновременно износ по ширине

При обработке глинистых почв ресурс лапы составляет 9–12 га, при этом лапа подлежит ремонту или выбраковывается с износом лишь на 10–15%, а 85–90% металла теряются. При рыхлении песчаных почв, обладающих большими абразивными свойствами, ресурс лапы составляет 14–16 га.

Довольно часто выход из строя лап культиватора происходит в результате образования на режущей кромке площадки износа с отрицательным углом γ . Установлено, что угол наклона и величина износа лапы зависят от механического состава и агрегатного состояния почвы [153]. При обработке глинистых почв угол γ достигает 35° , режущая кромка наиболее тупая, в результате рыхления твёрдых почв происходит выталкивание лапы вверх под действием составляющей силы P_6 . Горизонтальная составляющая P_2 увеличивает сопротивление рыхлению. При работе на суглинистых почвах угол $\gamma = 8\text{--}15^\circ$, на песчаных и супесчаных почвах γ

= 5–10°, характер износа имеет вид плоской площадки, происходит как бы самозатачивание, но с уменьшением толщины пластины.

В зависимости от характера износа режущей кромки и образования так называемой фаски на почвах различной твёрдости происходит увеличение сопротивления рыхлению на 20–60% [153, 154]. Влияние толщины режущей кромки лапы на тяговое сопротивление культиватора показано на рисунке 2.11.

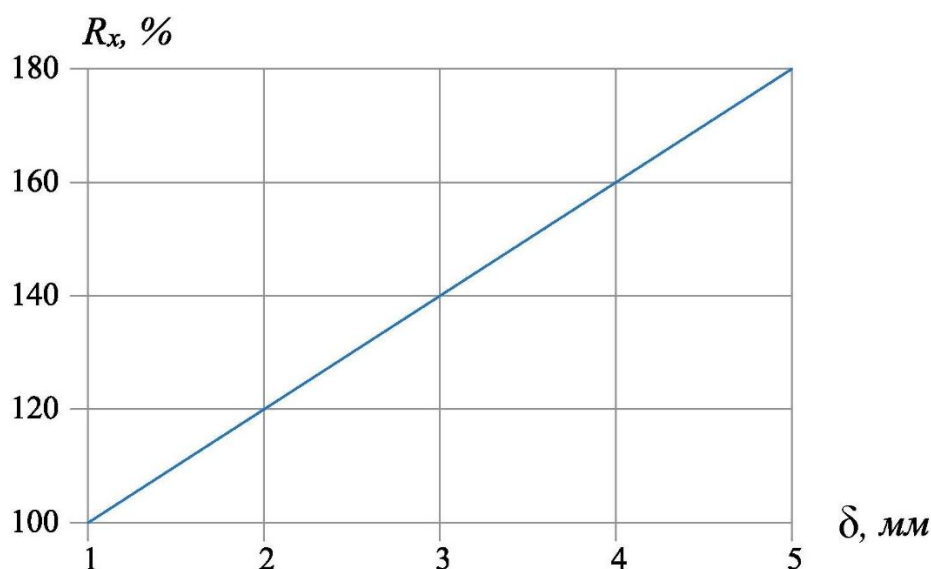


Рисунок 2.11 – Влияние толщины режущей кромки лапы на тяговое сопротивление культиватора

Верхняя поверхность лапы при рыхлении глинистой и суглинистой почв практически не изнашивается, наиболее интенсивный износ происходит при рыхлении песчаной почвы, в результате чего носок может изгибаться из-за уменьшения его прочности.

Полученные зависимости можно использовать для обоснования необходимой толщины режущей кромки компенсационной пластины для восстановления работоспособности лапы культиватора.

2.5 Обоснование необходимой износостойкости компенсирующей пластины

Интенсивность изнашивания деталей зависит от разрушения поверхностного слоя металла, который подвержен воздействию ряда факторов, комплексно

связанных между собой. В числе влияющих факторов имеют место давление, влажность, твёрдость почвы, механический состав почвы, особенно количество абразивных твёрдых частиц, которые существенно увеличивают интенсивность износа. Аналитическое описание процесса изнашивания весьма разнообразно.

В своих работах Крагельский И.В. [154] приводит определение коэффициента износостойкости металла с учётом его структурных компонентов и микротвёрдости:

$$K = \frac{1,11\eta H_{Дк} + (1-\eta)H_{До}}{1,11\eta' H'_{Дк} + (1-\eta')H'_{До}},$$

где K – сравнительная износостойкость;

η, η' – доля твердых зерен в общей их сумме испытуемого и эталонного материалов;

$H_{Дк}$ – микротвердость более твердого зерна в испытуемом металле;

$H_{До}$ – микротвердость основы испытуемого металла;

$H'_{Дк} H'_{До}$ – микротвердость наиболее твердого зерна и основы эталона.

Значение коэффициента позволяет определить сравнительную износостойкость, однако определить величину износа и долговечность нельзя.

Крагельским И.В. предложена зависимость для оценки износа деталей по определению удельной изнашиваемости стали $i_{И}$ [154]:

где V_I – объём материала;

S_{ϕ} – фактическая площадь контакта;

d' – средний диаметр пятна контакта.

Интенсивность износа J связана с площадями выступа контактирующего материала – номинальной S_n и фактической S_{ϕ} , взаимодействующего с поверхностью металла, а также с номинальным давлением P_n и фактическим P_{ϕ} :

$$J = i_{И} \frac{S_{\phi}}{S_n} = i_{И} \frac{P_n}{P_{\phi}},$$

Предлагаемый метод оценки имеет теоретическое значение, применение его на практике для определения долговечности затруднительно, так как уравнение износа имеет интегральный характер и затрудняет учитывать неравномерности износа.

Другое решение для описания динамики изнашивания предложено Тененбаумом М.М. и Розенбаумом А.Н. в работе [155]. Они рекомендуют использовать дифференциальное уравнение мгновенной скорости изнашивания, если изнашиваются несколько сопряжённых деталей, то необходима система уравнений.

Износ рабочих органов в реальных условиях предложил Севернев М.М. [156] методом сравнения его с удельным износом в эталонных условиях, используя эталонные материал и абразив. Для испытания эталонных образцов были выбраны следующие условия: скорость перемещения образца $V_{отн} = 1$ см/с; площадь трения $S = 1$ см²; давление абразива $p = 1$ МПа; время $t = 1$ с.

В результате исследований была предложена зависимость для определения износа эталонного образца $\Delta G_{эм}$ в предположении пропорциональности давлению, пути трения, площади контакта и обратной пропорциональности твердости металла с учётом коэффициента, учитывающего абразивность почвы:

$$\Delta G_{эм} = K \frac{pV_{отн} \cdot tS\gamma}{H_{эм}},$$

где K – коэффициент пропорциональности;

p – давление абразива;

γ – объёмный вес эталонного образца;

$H_{эм}$ – твердость эталонного образца.

Износ любого другого материала при тех же условиях равен:

$$\Delta G = \Delta G_{эм} \cdot m \cdot \varepsilon \frac{K_{\gamma}}{K_{H}},$$

где $\Delta G_{эм}$ – удельный износ эталонного образца;

ε – относительный износ материала;

m – коэффициент относительной изнашивающей способности почвы, который равен отношению интенсивности износа детали данной почвой к интенсивности износа той же детали эталонной абразивной средой;

K_y – отношение объёмных весов детали и эталонного образца;

K_H – отношение твердостей детали и эталонного образца ;

K_H – отношение твердости детали к твердости эталонного образца ($K_H = \frac{H}{H_{эм}}$).

В методе прогнозирования износостойкости рабочего органа, предложенном Северневым М.М. при определении $\Delta G_{эм}$, влияющего на изнашиваемость, основным фактором принимается только его твердость, что является недостатком аналитического выражения. Очевидно, что твердость металла – основной показатель изнашиваемости, однако существует ряд других факторов, влияющих на интенсивность изнашивания, которые в расчётах не учитываются, отмечается, что условия работы, давление абразива не влияют на относительную изнашиваемость. К тому же в работе нет рекомендаций, как определить коэффициент пропорциональности почвы для практического применения.

При определении износа рабочих органов почвообрабатывающих машин Сидоров С.А. [157] предлагает формулу с учётом давления, наработки, свойства металла и состава почвы:

$$W = C \cdot p \cdot \tau ,$$

где W – износ, мм;

p – давление, МПа;

C – переходный коэффициент, зависящий от ряда факторов, мм/МПа;

τ – наработка на рабочий орган, га.

Определение значений C и p рекомендуется в зависимости от условий изнашивания, материала рабочего органа, свойств почвы и др. Сидоров С.А. даёт аналитические выражения для расчёта износа лапы в зависимости от давления p и коэффициента C .

Метод расчёта износа, предлагаемый Сидоровым С.А., является наиболее удобным для практических расчётов при некоторых затруднениях в определении поправочных коэффициентов и отдельных параметров. Вызывает сомнение утверждение автора об уменьшении коэффициента износостойкости C при увеличении давления абразива на поверхность рабочего органа.

Анализируя экспериментальные данные, можно отметить, что относительная износостойкость с повышением давления не снижается, а имеет тенденцию к повышению. Износостойкость при малых значениях давления абразива для стали различной твёрдости незначительно различается. С увеличением давления абразива на поверхность рабочего органа различие по относительной износостойкости существенно для разных материалов.

Это явление можно объяснить меньшей потерей остроты абразивных зёрен почвы при малых давлениях как для металлов сравнительно мягких, так и с твёрдой поверхностью рабочих органов. При большой нагрузке, а следовательно, значительном давлении острота зёрен притупляется при микрорезании стали несколько быстрее, чем при легко изнашивающихся поверхностях рабочих органов. Хотя при увеличении давления для сталей с мягкой и твёрдой поверхностью интенсивность изнашивания повышается, тем не менее темп износа для более твёрдых поверхностей меньше.

Формула, предлагаемая для оценки изнашивания рабочих органов, обрабатывающих почву, применима в основном для одной марки стали с определённой твёрдостью (сталь 45, 40 HRC). Для применения формулы в расчётах с другими материалами необходимы корректировка и уточнение, о которых не содержится данных. Следует использовать более очевидные универсальные показатели процесса работы культиватора для оценки изнашивания. Эти показатели должны быть основой аналитического метода практического расчёта величины износа рабочего органа и оценки его долговечности.

При исследованиях изнашивания в эталонных условиях для определённого образца материала выбирается эталонный абразив. В таких условиях абразивом выбирается кварц влажностью 1%, для которого изнашивающая способность

принимается $m_{эм} = 1$. Образец эталонного материала принимается из стали 45 с твёрдостью 90 HRB и относительной износостойкостью $w_{эм} = 1$.

Условия эталонного эксперимента следующие: давление абразива на поверхность образца $p_{эм} = 1$ МПа; скорость перемещения абразива по поверхности стали $V_{отн.эм} = 1$ км/ч; площадь поверхности трения $S_{эм} = 1$ см², время проведения опыта на изнашивание $t_{эм} = 1$ ч.

Известно, что износ пропорционален факторам, воздействующим на рабочие органы почвообрабатывающих машин. Следует отметить основные факторы, к которым относятся: изнашивающая способность почвы, особенно с большим содержанием абразивных зёрен; давление, зависящее от твёрдости почвы, пути трения, определяемое временем работы, а также площадью контакта рабочего органа с почвой. Однако износ обратно пропорционален относительной износостойкости стали. В этом случае износ образца можно определить в весовом измерении по выражению:

$$w_{эм} = K \frac{m_{эм}}{\varepsilon_{эм}} p_{эм} \cdot V_{отн.эм} \cdot S_{эм} \cdot t_{эм},$$

где K – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент K определяется экспериментально в эталонных условиях из отношения износа к эталонным параметрам для определённого образца стали и абразива:

$$K = \frac{w_{эм} \cdot \varepsilon_{эм}}{m_{эм} \cdot p_{эм} \cdot V_{отн.эм} \cdot S_{эм} \cdot t_{эм}} \cdot \frac{z}{\text{МПа} \cdot \text{км} \cdot \text{см}^2};$$

При известных значениях износа стали, полученного в эталонных условиях, и используя параметры эталонных испытаний по этому выражению можно определить значение коэффициента K . По результатам испытаний образца из стали 45 определённой твёрдости на стенде РИМ-01 конструкции ВИСХОМа получена величина износа $w_{эм} = 0,0125$ г, время эталонных испытаний составляло 1 ч.

При весовом измерении износа стального образца коэффициент $K_г$:

$$K_г = 0,125 \frac{z}{\text{МПа} \cdot \text{км} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Приняв плотность стали $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$, при линейном представлении износа образца коэффициент K_l

$$K_l = \frac{K_v}{\gamma} = \frac{0,125}{7,8} = 0,016 \text{ см/МПа} \cdot \text{км} \cdot \text{ч}$$

При определении износа с другими механическими свойствами и в других условиях необходимо учитывать неодинаковую изнашивающую способность почвы и износостойкость стали от действия давления, в формулу эталонного износа вводятся поправочные коэффициенты, которые учитывают изнашивающую способность почвы η_1 и износостойкость стали η_2 от давления. В этом случае износ другой стали в весовом измерении будет равен:

$$w = K_v \frac{m_{эм} \cdot \eta_1}{\varepsilon_{эм} \cdot \eta_2} p \cdot v_{отн} \cdot S \cdot t, \text{ г};$$

Износ в линейном измерении с учётом зависимости объёма материала от массы и плотности, приняв для практических расчётов $S = 1 \text{ см}^2$, будет равен:

$$h = K_l \frac{m_{эм} \cdot \eta_1 \cdot p \cdot v_{отн} \cdot t}{\varepsilon_{эм} \cdot \eta_2}, \text{ см},$$

где h – линейная величина износа, см;

η_1 – коэффициент изменения изнашивающей способности почвы в зависимости от давления;

η_2 – коэффициент изменения износостойкости материала в зависимости от давления.

Интенсивность износа весовая определяется по формуле

$$\frac{w}{t} = K_v \frac{m_{эм} \cdot \eta_1}{\varepsilon_{эм} \cdot \eta_2} v_{отн} \cdot p, \text{ г/ч}.$$

Интенсивность износа линейная:

$$\frac{h}{t} = K_l \frac{m_{эм} v_{отн} p \eta_1}{\varepsilon_{эм} \eta_2}, \text{ см/ч}.$$

Определив предельный износ рабочего органа, можно вычислить предполагаемый срок службы для оценки работоспособности агрегата:

$$T = \frac{\Delta h_{np} \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \eta_2 \cdot \chi \cdot A}{K_l \cdot m_{эм} \cdot \eta_1 \cdot p \cdot v_n}, \text{ ч},$$

где h_{np} – предельный износ рабочего органа, см;

$m_{эм}$ – изнашивающая способность почвы при эталонном давлении абразива;

p – давление почвы на участке рабочего органа, МПа;

v_n – поступательная скорость рабочего органа, км/ч;

t – время работы, ч;

χ – отношение скорости рабочего органа к скорости перемещения почвы по рабочему органу;

A – производительность лапы, га/ч.

При необходимости учёта влажности почвы, её состава, их влияния на интенсивность изнашивания в формулу расчёта износа вводятся поправочные коэффициенты, например коэффициент η_3 , учитывающий влияние влажности. Тогда интенсивность изнашивания можно определить по формуле

$$h = K_l \frac{m_{эм} \cdot \eta_1}{\varepsilon_{эм} \cdot \eta_2} p \cdot v_{отн} \cdot t \cdot \eta_3, \text{ см}^2,$$

Срок службы рабочего органа:

$$T = \frac{h_d \cdot \varepsilon_{эм} \cdot \eta_2}{K_l \cdot m_{эм} \cdot \eta_1 \cdot p \cdot v_{отн} \cdot \eta_3}, \text{ ч},$$

Относительную скорость перемещения частиц $v_{отн}$ для рабочего органа культиватора, имеющего форму клина, можно определить по формуле:

$$v_{отн} = \frac{v_n}{\cos \gamma \cdot \cos \alpha},$$

где v_n – скорость движения рабочего органа, км/ч;

γ – угол резания рабочего органа;

α – угол наклона рабочей поверхности клина к горизонту в поперечном сечении ($\alpha = 30^\circ$).

Для лицевой поверхности лапы культиватора скорость движения частиц почвы можно определить из выражения:

$$V_{опт} = \frac{V_n}{\cos 42 \cdot \cos 30} = \frac{V_n}{0,643};$$

Таким образом, анализируемые зависимости показывают, что работоспособность лапы культиватора определяется износом рабочего органа, изнашивающей способностью почвы и давлением почвы на участке рабочего органа.

2.6 Обоснование необходимости оценки напряженного состояния культиватора и его рабочих органов

Средой взаимодействия рассматриваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин, в частности лаповых культиваторов, являются почвы. В некоторых случаях возможно наличие почвогрунтов. Длительная эксплуатация рабочих органов, особенно их частей, находящихся в контакте с абразивной средой, приводит к износу. Более абразивной средой для почвообрабатывающих рабочих органов являются граничные слои между почвой и грунтами. Процесс взаимодействия рабочих органов со средой с учетом тяговых сопротивлений сопровождается возникновением напряжений сжатия, изгиба и кручения, которые ведут к износу поверхностных частей рабочего органа [158, 159, 160]. Взаимодействие рабочих органов почвообрабатывающих машин сопряжено с неизбежным износом тех их частей, которые находятся на острие конструкции. Аналогичное взаимодействие наблюдается и у лаповых культиваторов как с почвами, так и с почвогрунтами.

Под почвогрунтами понимаются те слои среды взаимодействия рабочего органа, которые находятся на стыке верхних почвенных слоев с нижерасположенными грунтами. Почвенный слой обычно находится в пределах до 30–40 см. Однако часто слои почвы могут быть незначительными, в пределах до 20 см. В таких случаях рабочий орган частично взаимодействует с грунтами. Грунты, рассматриваемые в сельском хозяйстве и мелиорации, по трудности разработки по классификации Зеленина А.Н. делятся на VIII категорий. Первые четыре категории считаются талыми, последующие четыре – мерзлыми. Очевидно, что почвы, т.е.

верхние слои, будут относиться к I или II категории. Несмотря на легкие категории почвогрунтов, износ элементов рабочих органов в процессе длительной эксплуатации в этой среде очевиден [161, 162, 163, 164]. Их значения зависят от величин возникающих тяговых сопротивлений со стороны обрабатываемой среды, т.е. почв и почвогрунтов. Для обеспечения надежности конструкции рабочего органа, а именно наиболее нагруженных частей (таковым является лемех) необходимо, чтобы величины возникающих напряжений были меньше допускаемых. В случае если они оказываются выше допускаемых, их применение в составе рабочего оборудования исключается. Однако возможны случаи, когда запас прочности заведомо задается высоким – в пределах до 5; 7 или 9 единиц, если речь идет об ответственных конструкциях, выход из строя которых может повлиять на здоровье обслуживающего персонала и в целом на работоспособность машины, выполняющей технологическую операцию. В проведении исследования по действующим в детали напряжениям возможны случаи, когда коэффициент запаса прочности находится в допускаемых пределах, но имеет величины, близкие к минимальным показателям. При таких значениях целесообразно проводить уточненные прочностные расчеты [165, 166, 167, 168].

Для оценки тяговых сопротивлений, возникающих при работе почвообрабатывающих машин, существуют разные способы, которые учитывают множество факторов, влияющих на данную характеристику. Очевидно, каждый метод расчета тяговых сопротивлений выдает разные результаты, хотя и близкие по численному порядку значений. Это говорит о том, что сама обрабатываемая среда – почва неоднородна, вместе с тем ее состояние по твердости, влажности и структуре также может быть различным. Более того, конфигурация рабочего органа также может влиять на тяговые сопротивления. При конструировании рабочих органов, в нашем случае лапы культиватора, необходимо получить такую конфигурацию, при которой тяговые сопротивления будут минимальными. С учетом того, что в рабочем оборудовании культиватора количество лап может достигать нескольких десятков, можно утверждать о возникновении больших тяговых сопротивлений при их эксплуатации. Соответственно оптимальная

конфигурация каждой конструкции лап позволит обеспечить снижение расхода топлива, уменьшение износа деталей и повышение долговечности [159].

В определении тяговых сопротивлений при работе культиваторов некоторые параллели можно провести с работой рабочих органов землеройных машин [150–152]. К примеру, тяговые сопротивления отделению грунта от массива (H) при работе землеройного рабочего органа определяются по формуле

$$F = kBh \cos \alpha,$$

где B – ширина рабочего органа, м;

h – глубина резания, м;

α – угол установки рабочего органа в плане;

k – удельное сопротивление резанию на единицу лобовой площади рабочего органа, Н/м^2 (при угле резания $\delta = 55^\circ$ для грунта I категории $k = 70 \times 10^3 \text{ Н/м}^2$, III категории $k = 170 \times 10^3 \text{ Н/м}^2$).

Кроме того, при работе лапы культиватора возникают сопротивления перемещению накапливающейся почвы и растительности перед рабочей поверхностью. Также возникают сопротивления трению почвы вдоль поверхности лапы. Если в целом рассматривать рыхлительную машину, то следует учитывать и сопротивление движению базовой машины, которое зависит от ее массы, коэффициента сопротивления движению машины и величины уклона поверхности движения. Угол резания культиваторных лап обычно находится в пределах от 20° до 30° , но существуют конструкции, у которых данный угол может достигать значений 47° и 60° . Рабочая площадь условно взятого плоского рабочего органа – лапы культиватора составляет $0,0154 \text{ м}^2$. При этом для первой категории почвогрунтов и при угле установки рабочего органа в плане, равном 0° , тяговые сопротивления будут равны 1078 Н или $1,078 \text{ кН}$, тогда как средние значения тяговых сопротивлений в стандартных условиях для лап культиватора составляют от 5 до 15 кгс или от 49 до $147,1 \text{ Н}$. Как видно из полученных значений, условно принятый плоский вертикальный рабочий орган имеет значительные тяговые сопротивления по сравнению с конструкцией лапы культиватора с криволинейной режущей кромкой.

Удельные сопротивления культиваторов при работе с рыхлительными лапами, в зависимости от вида обработки и типа рабочих органов при глубине обработки от 8 до 12 см для предпосевной обработки почвы рыхлителями на упругой стойке составляют от 180 до 230 кгс/м. При глубоком рыхлении почвы лапами на жесткой основе при глубине обработки от 14 до 20 см удельные сопротивления находятся в пределах от 300 до 480 кгс/м [158].

Анализ напряженного состояния всей конструкции культиватора, проведенный методом конечных элементов в системе Inventor Pro показывает, что при задании суммарных нагрузок величиной 2500 Н на каждую из лап коэффициент запаса прочности n равен 0,72; при задании данной суммарной нагрузки на все лапы исследуемая характеристика имеет значения 4,83. Очевидно, полученные значения не входят в требуемый диапазон по запасу прочности для стальных конструкций.

Анализ нагружения каждой из лап культиватора в процессе их работы показывает, что наиболее нагруженными являются передние три – вследствие их взаимодействия с твердым массивом почвогрунтов в режиме заблокированного резания слоя (концепция Баловнева В.И.). Во втором ряду наиболее нагруженными являются две крайние лапы – это следует из условий полублокированного резания. Наименее нагруженными являются две внутренние лапы второго ряда, это следует из того, что они работают в условиях свободного резания. Результаты расчета культиваторного оборудования на прочность методом конечных элементов с учетом перечисленных условий представлены на рисунке 2.12. В рамках этого метода расчета на прочность предварительно спроектирована объемная конструкция, затем задан ее материал (сталь), далее определены граничные опорные условия в местах ее соединения с базовым трактором посредством трехзвенной системы навески и опорных колес, и заданы расчетные нагрузки на режущих кромках каждой лапы.

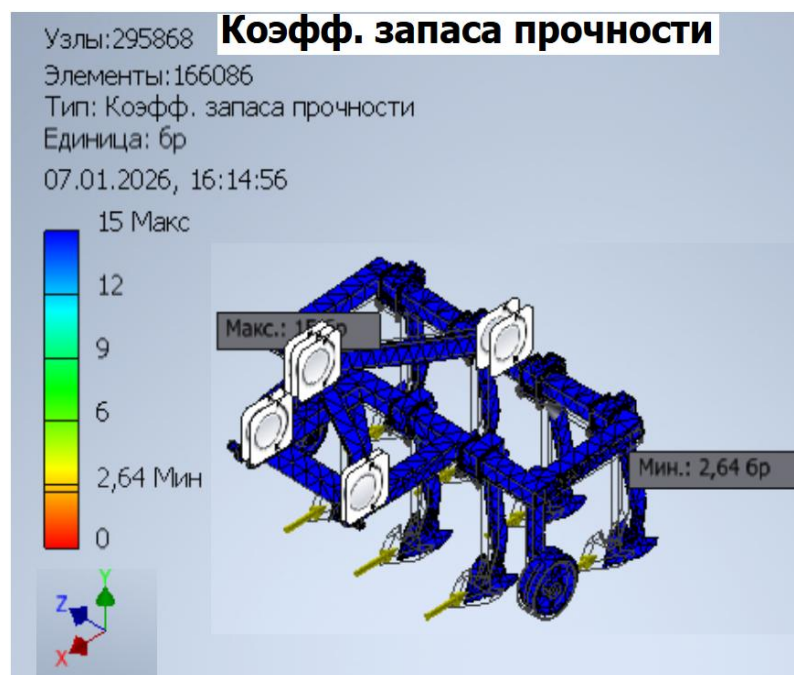


Рисунок 2.13 – Прочностной расчет конструкции культиватора методом конечных элементов с учетом условий нагружений каждой лапы

Тяговые сопротивления при работе культиваторных лап с увеличением глубины рыхления ускоренно возрастают, это объясняется тем, что по мере увеличения глубины почвогрунтов возрастает их плотность, соответственно категория грунта по трудности разработки.

Расположение лап культиватора на раме рабочего оборудования может быть обеспечено в 2 или 3 ряда. Очевидно, что большие сопротивления возникают на первом ряду, и здесь сравнительно часто происходят поломки или выход из строя лап. Кроме того, большое количество лап на одной раме в целом увеличивает общие тяговые сопротивления, которые в итоге необходимо сравнить с тягово-сцепными характеристиками транспортно-энергетической установки. Результаты этих сравнений должны удовлетворять условию, при котором касательная сила тяги по сцеплению движителя с грунтом (кН) должна быть больше касательной силы тяги по двигателю. По этим показателям наиболее подходящими базовыми машинами для разработанной конструкции культиватора являются пневмоколесные тракторы тяговых классов от 0,6 до 1,6 кН.

Таким образом, обоснована необходимость оценки напряженного состояния конструкции культиватора.

Выводы

1. Теоретически обоснована возможность восстановления работоспособности рабочих органов культиваторов диффузионным хромированием.

2. Дано теоретическое описание диффузионных процессов при хромировании.

3. Теоретически обосновано влияние основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора.

4. Обоснованы физико-механические свойства покрытий и геометрические параметры компенсирующей пластины при восстановлении работоспособности рабочих органов культиваторов (коэффициент трения покрытия, толщина и износостойкость режущей кромки компенсирующей пластины).

5. Обоснована необходимость оценки напряженного состояния конструкции культиватора.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

Программа научных исследований состоит из следующих основных этапов.

На первом этапе проведен анализ состояния проблемы восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Показаны основные способы восстановления и упрочнения рабочих органов машин. Установлено, что одним из эффективных способов повышения ресурса рабочих органов является способ диффузионного хромирования, позволяющий формировать на их режуще-лезвийных частях износостойкие покрытия. В результате поставлена цель работы и определены задачи для ее реализации.

На втором этапе исследований рассмотрен комплекс вопросов, связанных с теоретическим обоснованием возможности диффузионного хромирования для восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Обоснованы физико-механические свойства покрытий и геометрические параметры компенсирующей пластины (коэффициент трения покрытия, толщина и износостойкость режущей кромки). Обоснована необходимость оценки напряженного состояния конструкции культиватора.

Третий этап исследований связан с разработкой общей и частных методик исследования влияния параметров диффузионного хромирования на толщину, микротвердость и износостойкость покрытий, конструированием и изготовлением компенсационных пластин на лапы культиватора с различными углами заострения режущих кромок, выбором программ и методик расчета конструкции экспериментальной лапы культиватора на прочность. На данном этапе были разработаны методики определения влияния параметров восстановленной лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления, оценки степени разрыхления почвы восстановленной лапой, полевых испытаний восстановленных стрельчатых лап, оценки функциональных характеристик (потребительских свойств) культиватора с восстановленными лапами.

На четвертом этапе проведены исследования физико-механических свойств покрытий, полученных термодиффузионным хромированием, ускоренные износные испытания пластин с хромовыми покрытиями, получены результаты прочностного расчета восстановленной лапы культиватора. Представлено влияние параметров восстановленной лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления, проведена оценка степени разрыхления почвы восстановленной лапой, даны анализ результатов полевых испытаний стрельчатых лап и оценка функциональных характеристик (потребительских свойств) экспериментального культиватора.

На пятом этапе разработаны технологические рекомендации по восстановлению работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и дана их экономическая оценка.

3.2 Методика исследования параметров диффузионного хромирования образцов

3.2.1 Оборудование и материалы для диффузионного хромирования

Диффузионное насыщение образцов хромом проводилось в камерной вакуумной электропечи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ ГОСТ 20553-85. Электропечь предназначена для проведения различных термических процессов (спекания, отжига, дегазации и т.п.) в вакууме или в инертном газе. Работа с инертным газом допускается при давлении, не превышающем 0,12 МПа.

Электропечь имеет следующие основные характеристики [169]:

1. Установленная мощность, кВт – 20.
2. Габариты рабочей камеры, мм – 100x300x100.
3. Масса садки, кг – 15.
4. Рабочая температура, °С – до 1600.
5. Остаточное давление, Па – $6,65 \cdot 10^{-3}$.
6. Число фаз, шт. – 3.

Электропечь СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ состоит из нагревательной камеры, трансформатора, щита управления, вакуумных механического и диффузионного паромасляного насосов, вентилях, мановакуумметра. Внешний вид электропечи показан на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Внешний вид вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ

Для укладки образцов при диффузионном хромировании использовали контейнеры из листовой стали. К контейнерам изготавливались соответствующие крышки (рисунок 3.2). Исходным материалом для диффузионного хромирования служил порошок хрома Х97 (ГОСТ 5905-79) гранулометрического состава 0,4–0,6 мм. Хром определенной грануляции предварительно измельчался и просеивался через сита с различными размерами ячеек.



Рисунок 3.2 – Контейнер для диффузионного хромирования

Для исследования процессов диффузионного насыщения были подобраны марки сталей: из углеродистых – 45, У8, 08кп; легированных – 65Г, 30ХГСА, ХВГ. Среди образцов представлены: малоуглеродистые стали, конструкционные, высокоуглеродистые, легированные и высоколегированные стали. Рассматривалась основная номенклатура сталей, применяемых в сельскохозяйственном машиностроении. Из сталей отобранных марок шлифовали плоские образцы толщиной 0,4; 0,6; 0,8; 4; 10 мм, которые после различных комбинаций режимов диффузионного хромирования шлифовались. Диффузионное хромирование проводилось в интервале температур от 1100 до 1200°С, продолжительность (время выдержки) – от 2 до 6 ч. Далее для определения толщины диффузионного слоя, твердости и изменения линейных размеров образцы протравливались в 3%-ном растворе азотной кислоты в спирте. После полировки и травления выполнялись измерения.

3.2.2 Методика исследования влияния режимов диффузионного хромирования на микротвердость, твердость и микроструктуру образцов

Основными параметрами хромирования являются: скорость нагрева, температура процесса, время выдержки, остаточное давление (глубина вакуума). Регулирование теплового режима рабочей камеры электропечи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ осуществлялось путем изменения подводимого к нагревателям напряжения с помощью регулятора напряжения РН-1-160 УХЛН на блоке управления

регулятором БУ-12 через первичную обмотку трансформатора. Скорость нагрева регулировалась резистором, изменяя ток управления от 0 до 5 мА (0–100%), что вызывает изменение напряжения нагрузки на входе в трансформатор печи и, следовательно, ток нагрева печи [169]. Контроль температуры процесса осуществлялся автоматически с помощью самописца, патенциометра модели КСП4-200-УХЛ ГОСТ 7164-78, датчиком которого является вольфрам-рениевая термопара ТВР, установленная в рабочей камере печи. Измерения температуры в течение всего процесса хромирования проводились автоматически, со скоростью движения ленты самописца 20 мм/ч. Измерение остаточного давления (глубины вакуума) при проведении парофазного вакуумного хромирования проводилось с помощью вакуумметра модели НИТ-3. Датчики вакуумметра, термопарный ПМТ-2 и ионизационный ПМИ-2 установлены на корпусе нагревательной камеры. Откачивание нагревательной камеры проводилось последовательно: сначала при помощи двух пластинчато-роторных вакуумных насосов модели 2ННР-5ДМ выполнялась форвакуумная откачка до разряжения 13.3 Па, затем откачка велась при помощи заранее разогретого диффузионного паромасляного насоса Н250. После открытия вакуумного затвора 2ЭВЭ, имеющего электромеханический привод, электропечь СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ позволяет достигнуть остаточное давление не ниже, чем $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па.

Светло-серый цвет поверхности образцов после диффузионного хромирования свидетельствовал о нормально проведенном процессе. Наличие на поверхности образцов налипания частиц хрома, большая шероховатость поверхности, появление цветов побежалости, спекание смеси, указывающие на нарушение технологического процесса, при экспериментах не наблюдались.

Общую толщину диффузионного слоя покрытия и его твердость контролировали на протравленных микрошлифах.

Для металлографического анализа образцы шлифовались для последующего диффузионного хромирования на различных режимах. Образцы собирали в кассеты, заливали эпоксидной смолой и стягивали стяжками, далее кассеты шлифовались и полировались. Для микроанализа микрошлифы подвергали

травлению в 3%-ном растворе азотной кислоты в спирте. Общий вид кассеты с образцами для изготовления микрошлифов показан на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Кассета с образцами для изготовления микрошлифов

Микроструктуру покрытия исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEM 15C (рисунок 3.4).

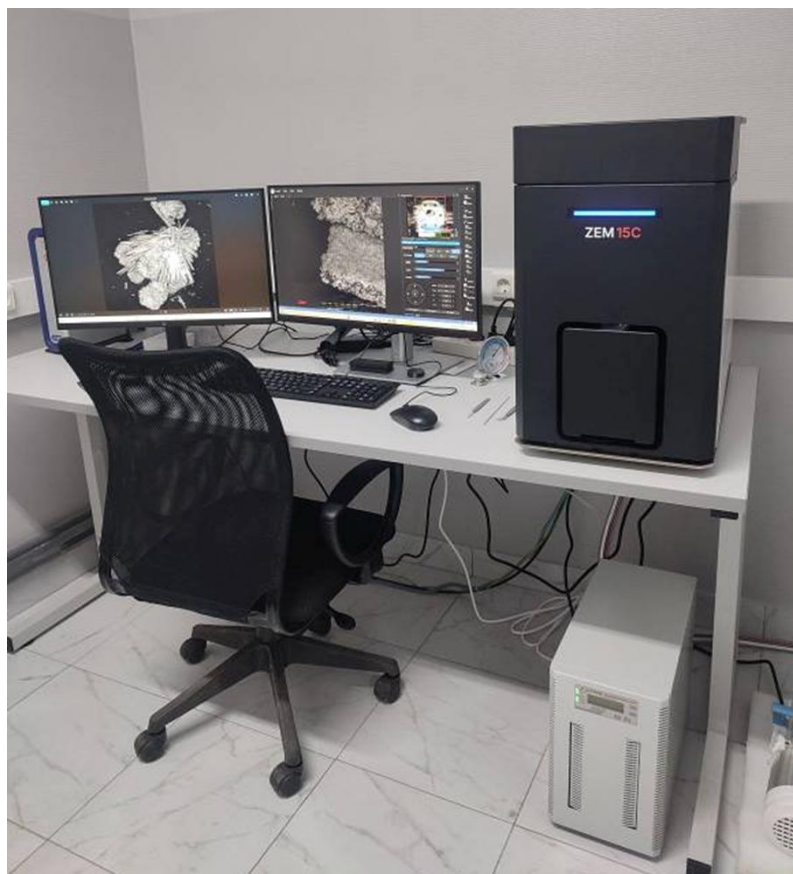


Рисунок 3.4 – Сканирующий электронный микроскоп ZEM 15C

Некоторые характеристики сканирующего электронного микроскопа даны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика сканирующего электронного микроскопа ZEM 15C

Показатели	Значение
Максимальное разрешение, нм	10
Максимальное увеличение, \times 150 000	150 000
Размер (Ш \times Г \times В), мм	283 \times 553 \times 505

За общую толщину диффузионного слоя считали кратчайшее расстояние от поверхности до перехода от нетравящейся светлой зоны к сердцевине образца. Замеры проводились с помощью оптической системы прибора ПМТ-3М [170]. Общий вид оптической системы прибора ПМТ-3М представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Общий вид оптической системы прибора ПМТ-3М

Принцип действия микротвердомеров основан на статическом вдавливании алмазного пирамидального индентора с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка. Микротвердомеры состоят из силовой рамы, на которой установлены механизм приложения нагрузки, сенсорный экран и оптическая система. ПМТ-3М – модернизированная модификация модели ПМТ-3 с автоматическим приводом турели (поворотной головки) и диапазоном увеличения оптической системы от 20х до 400х с возможностью установки цифровой видеокамеры и подключения к ПК для обработки данных измерения твёрдости с помощью специализированного ПО. Измерения проводили путем вдавливания в исследуемую поверхность алмазной пирамиды с углом при вершине 136° и нагрузкой 0,981 Н. Для определения численного значения микротвердости измеряли длину отпечатка по диагонали и определяли её значение при помощи специальной таблицы. Повторность замеров пятикратная.

3.2.3. Методика сравнительных испытаний образцов на износостойкость

Испытания образцов на износостойкость проводили на установке абразивного изнашивания ПВ-7 с помощью ролика при нагрузке $P_n = 20$ Н и частоте его вращения $n_p = 72$ мин⁻¹.

Испытания проводили в течение 30 мин. Испытаниям подвергались образцы из сталей 45, У8А, 65Г, ХВГ толщиной 4 мм после диффузионного хромирования в вакууме при $t = 1200^\circ\text{C}$ и времени выдержки $\tau = 6$ ч.

В качестве эталона использовалась закаленная сталь 45. В качестве изнашивающей среды во всех случаях использовали электрокорунд белый марки 25А зернистостью 80–100 мкм. Изнашивание образцов определяли по потере массы за время испытаний.

Испытанию подвергались также образцы, к которым методом электроконтактной приварки крепили стальные пластины толщиной 0,6 мм из ХВГ, У8А, 65Г, 45 после диффузионного хромирования. Подложка толщиной 10 мм изготавливалась из стали 45. Для электроконтактной приварки применялась установка МТ-2827УХЛ4 (рисунок 3.6). Приварка велась при силе сварочного тока

5 кА, длительности импульса 0,4 с, длительности паузы между отдельными импульсами 0,2 с, скорости приварки 1,0 м/мин.



Рисунок 3.6 – Общий вид установки МТ-2827УХЛ4

Техническая характеристика установки МТ-2827УХЛ4 приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические параметры машины контактной сварки МТ-2827 УХЛ4

Показатели	Норма
Наибольший вторичный ток, А	27800 ± 2780
Номинальный длительный вторичный ток, А, не менее	14000
Номинальный сварочный (переменный) ток, А	25000
Номинальная мощность, кВА, не более	210

Окончание таблицы 3.2

Параметры	Норма
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВА	225 ± 22,5
Номинальное усилие сжатия, МПа	
Раствор электродов, мм:	
номинальный	240
наибольший	540
наименьший	240
Номинальный расход охлаждающей воды, л/ч	700
Масса, кг	1100

3.3 Методика исследования напряженного состояния конструкции культиватора

Объектом исследований в работе являлись конструкции рабочих органов почвообрабатывающих машин, в частности рабочее оборудование лапового культиватора, разработанное в системе Inventor Pro. Также рассматривались процессы разрушения и износа поверхностей рабочих органов, взаимодействующих с почвой и почвогрунтами. Основными методами исследований, использованными в работе, стали изучение, разработка, сравнение и анализ. Напряженное состояние конструкции культиватора было исследовано с использованием системы Inventor Pro и отечественного графического пакета «Компас» [158, 159, 162]. Система Inventor Pro компании Autodesk и отечественная программа «Компас 3D-моделирование» содержат модуль для проведения прочностных расчетов методом конечных элементов. Предварительно в программе создавалась объемная конструкция, затем проводилось исследование, которое включало в себя последовательное выполнение следующих логических операций: задание материала лапы культиватора – принималась сталь 40; определение опорных зависимостей, т.е. задание опор для исследуемой конструкции опоры назначены в местах крепления лапы культиватора с корпусом рабочего

оборудования; задание действующих нагрузок на режущую кромку – в данном примере нагрузки задавались на переднюю часть режущей кромки, а также на левую и правую боковые части лапы; производилась разбивка конструкции лапы на конечные элементы – тетраэдры, т.е. создавалась конечно-элементная сетка; проведение расчета и получение отдельного файла – отчета по результатам исследования.

Данные программы довольно качественно позволяют создавать объемные конструкции и модели рабочих органов. Кроме того, они позволяют создавать техническую документацию на изготовление деталей и конструкций. В отличие от классических методов создания чертежей в данных программах используется метод ассоциативного черчения, который заключается в предварительном создании объемных конструкций и быстром переводе их в плоскость, т.е. быстром создании чертежей. Такая возможность позволяет во много раз ускорить проектирование в целом. Принципы создания объемных элементов, конструкций и деталей в рассматриваемых пакетах заключаются в предварительном формировании эскизов и на их основе – различных объемных конструкций. Основными способами создания объемных конструкций на основе эскизов являются: выдавливание, вращение, лофтинг, оболочка и изгиб. К примеру, геометрическую фигуру – цилиндр можно получить выдавливанием эскиза окружность или вращением эскиза прямоугольник вокруг одной из ее сторон.

Лапа культиватора обычно имеет относительно небольшие размеры, но сложную с точки зрения изготовления конфигурацию, и ее формирование также требует выполнения двух составляющих конструкции: во-первых, это часть, предназначенная для соединения рабочей части с основной рамой культиватора; во-вторых, формирование самой рабочей части со сложной криволинейной поверхностью, требующей учета эксплуатационных условий. При проектировании лапы кроме учета эксплуатационных агротехнологических условий необходимо было также учитывать возможности формирования такой рабочей поверхности или профиля в целом, при которых обеспечивалось минимальное сопротивление при взаимодействии с почвой.

В диссертационной работе нами представлен прочностной расчет лапы культиватора, выполненный методом конечных элементов в системе Inventor Pro. Определены виды и характер нагрузок, приходящихся на режущую кромку и поверхность конструкции лапы, а также места ее крепления, т.е. опорные зависимости. Величина нагрузок выяснена в зависимости от коэффициента удельного сопротивления резанию и от категории почвогрунтов, разрабатываемых лапой в процессе движения без оборота пласта. Определены также условия работы культиватора, которые могут повлиять на качество производства работ и на прочность конструкции лапы. Нами исследованы виды напряжений, возникающие в конструкции лапы в процессе производства работ, с учетом которых проектируются новые конструкции с достаточным коэффициентом запаса прочности. По результатам исследований рекомендованы конструкции с оптимальной конфигурацией и требуемым запасом прочности для конкретных условий эксплуатации.

3.4 Методика исследования работоспособности рабочих органов культиватора в грунтовом канале

3.4.1 Общая методика проведения экспериментальных исследований в грунтовом канале

Экспериментальные исследования рабочих органов культиватора проводились в грунтовом канале, оборудованном приспособлениями для установки опытных образцов, измерительной аппаратурой, механизмом привода, обеспечивающим реверсивное движение тележки с регулируемой скоростью. В процессе экспериментов определялось тяговое усилие тензометрическим способом, а результаты записывались в память компьютера. Степень и качество разрыхлённого грунта оценивались инструментальным способом, а также методом фрактального анализа, позволившим сделать оценку статистических показателей. Обработка результатов эксперимента осуществлялась в среде Mathcad, Excel, Word, AutoCAD и других прикладных программ [171, 172, 173, 174]. В качестве опытных образцов рабочих органов были выбраны стрелчатые лапы культиватора с

различной степенью износа и новые, а также лапы с накладной ремонтной (компенсационной) пластиной вдоль режущей кромки. Накладные пластины были изготовлены с различными углами заострения и упрочнялись диффузионным хромированием. На такую конструкцию лапы с компенсационными пластинами нами получен патент на полезную модель «Лапа культиватора» № 236632 (приложение 2). При разработке указанной конструкции лапы нами проведен анализ подобных технических решений.

Известен способ изобретения, который относится к ремонту изношенных деталей с применением сварки и может быть использован при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин, преимущественно лап культиваторов (Патент RU № 2 566 456 (13) С1). Угловую пластину изготавливают из конструкционной легированной стали марки 40ГР или 45Г2, при этом осуществляют электровибродуговое упрочнение с использованием пасты, содержащей 50% порошка на никелевой основе типа ПС-12НВК-01, 30% карбида кремния, 12–15% азотнокислого натрия и 5–8% нитрата аммония, которую расплавляют электрической дугой с помощью графитового электрода с силой тока 65–70 А, напряжением 50–55 В и частотой вибрации графитового электрода 50 Гц. Изобретение позволяет увеличить ударную вязкость в среднем в 1,6 раза и твердость упрочненной тыльной стороны лапы на 35%. В результате износостойкость восстановленных лап культиваторов почвообрабатывающих машин возрастает в 2,3 раза, а их долговечность – не менее чем в 2 раза. Недостатком известного технического решения является то, что при сварке происходит отпуск металла в местах сварки, что требует дополнительного упрочнения свариваемых поверхностей для получения необходимой твердости и прочности изделия.

Также известно устройство лапы с газопламенным напылением, которое может быть использовано при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин (патент № 2 763 820 (13) С1). Техническое решение предусматривает удаление изношенной режущей-лезвийной части рабочего органа, изготовление накладной пластины из заранее подготовленной по ширине и длине

восстанавливаемой лезвийной части заготовки листового проката шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ толщиной 2,5 мм и ее приваривание к восстанавливаемому рабочему органу контактно-точечной сваркой. Упрочнение проводят газопламенным напылением. Сначала напыляют подслоя термореагирующим порошком толщиной 0,05–0,15 мм, а затем – основной слой износостойким порошковым сплавом толщиной 2,2 мм, при этом подслоя и основной слой наносят при одних и тех же режимах напыления – давлении кислорода 0,35–0,45 МПа, давлении ацетилена 0,03–0,05 МПа, с расходом кислорода 960–1100 л/ч, расходом ацетилена 900–1000 л/ч, расстоянием от среза сопла мундштука до наплавляемой поверхности 160–200 мм, расходом порошка 2,5–3 кг/ч. Перед началом напыления рабочий орган подогревают до температуры 50–100°С. Изобретение повышает износостойкость восстановленных рабочих органов при работе в условиях каштановых почв Волгоградской области с высокими показателями интенсивного абразивного изнашивания. Недостатком изобретения является то, что оно хорошо работает только на определённых по структуре почвах, а в других структурах почв происходит интенсивное изнашивание режущей кромки восстановленной детали.

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является полезная модель, относящаяся к сельскому хозяйству (патент RU 231 815). Лапа культиватора содержит держатель, два крыла и сменную насадку в виде пары стальных полос, жестко закрепленных между собой под углом атаки лапы культиватора. Полосы выполнены заточенными с обеих сторон с образованием лезвия, и в них сделаны сквозные овальные отверстия для крепления к держателю и перемещения по мере износа. На поверхности держателя, в свою очередь, также выполнены отверстия для крепления стальных полос посредством болтового соединения. Полосы выполнены с обеспечением возможности их переворачивания после износа лезвия, с одной стороны, для того чтобы свое назначение при дальнейшем применении осуществляло второе, еще неизношенное лезвие полосы. После достижения предельного состояния обеих лезвий полос они заменяются. Обеспечивается создание лапы культиватора с увеличенным

ресурсом, который относится к восстановлению изношенных деталей. Недостатком технического решения является то, что прорези в креплениях сменных насадок выполнены как сквозные овальные отверстия для крепления к держателю, что приводит к смещению, сдвигу сменной насадки при действии на нее большой нагрузки при работе с тяжелыми почвами, а также сменная насадка требует дополнительной заточки под определенным углом и дополнительной термообработки, что только увеличивает трудозатраты при изготовлении данных насадок. Из анализа известных аналогичных технических решений выявлено, что технической проблемой в данной области является необходимость расширения арсенала средств для упрочнения и восстановления режущих кромок лемехов культиваторов различного назначения и функционирования. Предложенная конструкция лапы культиватора (рисунок 3.7), содержит корпус, два крыла и сменную насадку в виде пары стальных съемных пластин (толщина 4 мм), жестко закрепленных между собой под углом атаки лапы культиватора, заточенных с образованием лезвия и закрепленных на корпусе с возможностью их замены при изнашивании.

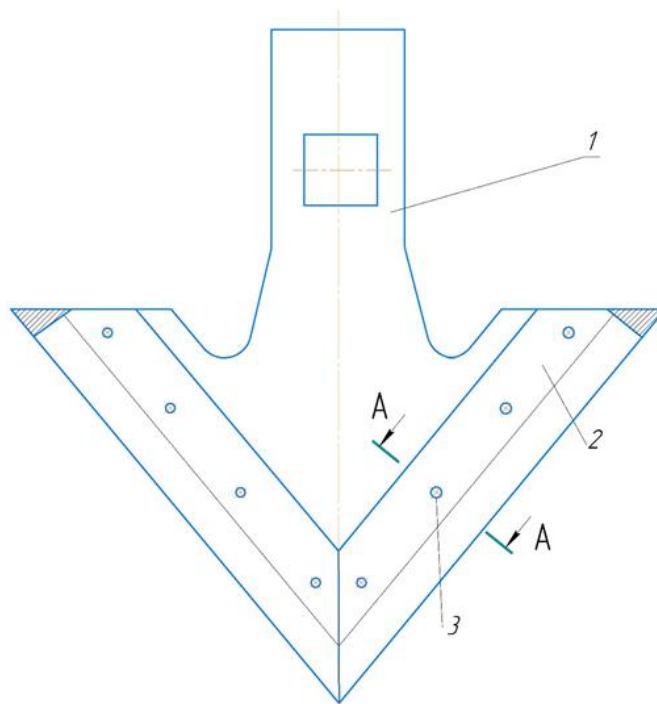


Рисунок 3.7 – Лапа культиватора

Съемная пластина лапы культиватора (рисунок 3.8, рисунок 3,9), выполнена цельнометаллической с углом резания 70° , при этом на съемной пластине выполнены сквозные круглые отверстия, а на корпусе лапы культиватора – отверстия с нарезанной резьбой, обеспечивающей крепление стальных съемных пластин к корпусу лапы с помощью четырех болтов.



Рисунок 3.8 – Стальная съемная пластина

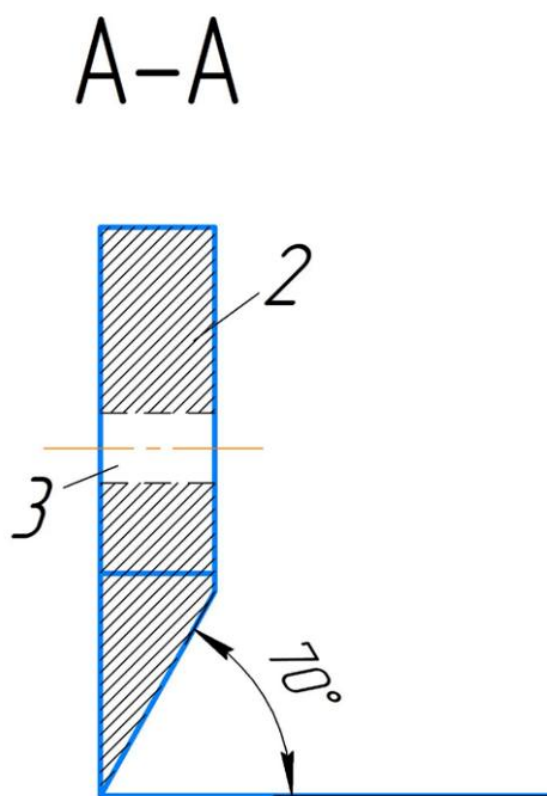


Рисунок 3.9 – Разрез А-А стальной съемной пластины

Крепление с помощью болтов стальных съемных пластин к лапе культиватора – жесткое, неподвижное, обеспечивающее необходимую прочность и жесткость режущей части стальных съемных пластин, без смещения стальных

съемных пластин под воздействием нагрузки при производстве сельскохозяйственных работ. При рыхлении почвы стальные съемные пластины выполняют роль режущей кромки, благодаря жесткому креплению с помощью четырех болтов М4, стальные съемные пластины не смещаются и производят качественный срез почвы (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Экспериментальная лапа культиватора

Для выявления факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на величину тягового усилия, были выполнены многофакторные эксперименты, а для уточнения полученных данных – проведены и однофакторные опыты. Основной целью исследования стала оценка влияния угловых параметров лапы культиватора и глубины рыхления на тяговое усилие. Исследования моделей рабочих органов проводились на суглинистом грунте, который перед каждым опытом уплотнялся до плотности $1,75 \text{ г/см}^3$, относительная влажность грунта в различных сериях опытов составляла 9–10,5%, глубина от 10 до 15 см. Повторность каждого опыта при проведении исследований была не менее 4–5.

3.4.2 Грунтовый канал и измерительные приборы для исследования работоспособности рабочих органов культиватора в грунтовом канале

Грунтовый канал (рисунок 3.12) представляет собой металлическую ёмкость 6 прямоугольного сечения, заполненную грунтом. По верхнему поясу грунтового канала установлена рама из углового прокатного профиля 1, обеспечивающая жёсткость всей конструкции. На продольных элементах рамы установлены направляющие, по которым перемещалась тележка 3. Исследования проводились в лаборатории кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на грунтовом канале. Испытания проводились при соблюдении утверждённой инструкции по работе на грунтовом канале с измерительной аппаратурой. Схема грунтового канала представлена на рисунке 3.12.

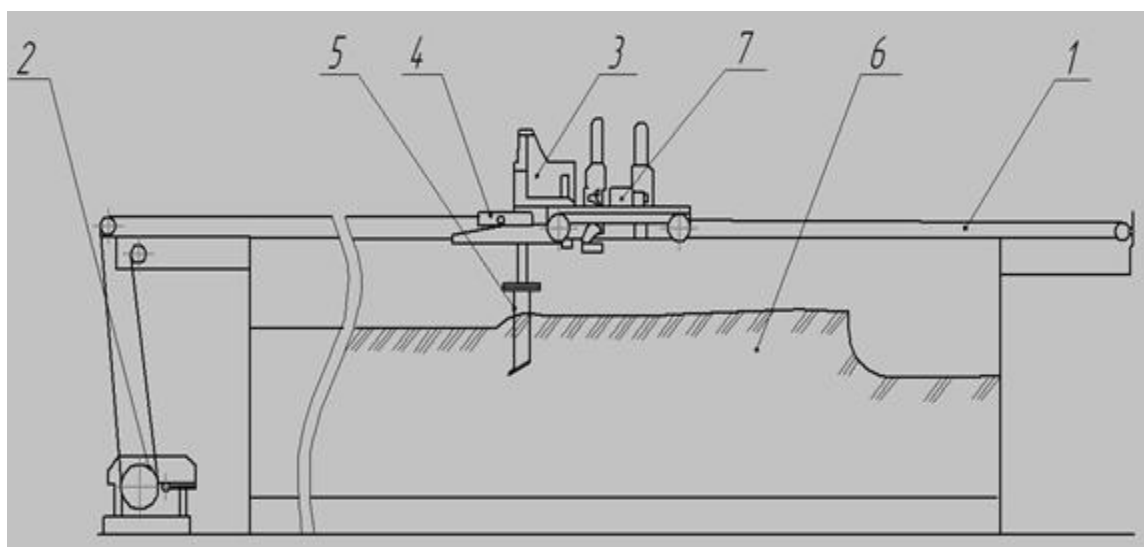


Рисунок 3.12 – Схема грунтового канала: 1 – направляющие; 2 – привод; 3 – тележка; 4 – датчик; 5 – исследуемый рабочий орган; 6 – ёмкость канала с грунтом; 7 – усилительный терминал

На тележке смонтирована вертикальная стойка, с приваренной к ней в нижней части фланцем, к которому крепится рабочий орган 5. Стойка может фиксироваться в направляющей. Изменение глубины обработки грунта осуществлялось за счёт подъёма стойки с рабочим органом при определённом уровне грунта в канале. Передвижение тележки выполнялось при помощи лебёдки с канатоведущим барабаном 2. Движение возможно вперёд и в обратном

направлении. Регулирование натяжения троса осуществлялось винтовым устройством. Для крепления рабочего органа к фланцу вертикальной стойки было сконструировано приспособление, позволяющее изменять угол резания. Управление электродвигателем производилось магнитным пускателем. Выравнивание поверхности грунта в грунтовом канале выполнялось с помощью специальных отвальных рабочих органов грейдерного типа, уплотнение – при помощи трамбовки. Степень уплотнения измерялась плотномером. Влажность грунта определялась весовым способом и влагомером. Грунт в канале, подготовленный к проведению опыта, и рабочий орган, прикреплённый к стойке, показаны на рисунок 3.13. На тележке лабораторной установки размещались усилительный терминал и датчики, преобразующие механические усилия в сигналы.

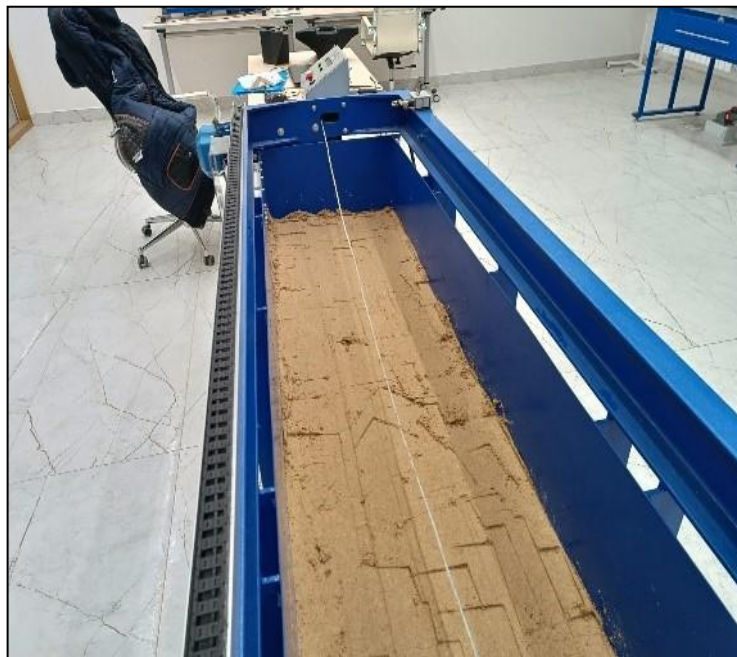


Рисунок 3.13 – Грунт в канале, подготовленный к проведению опыта по испытанию экспериментальной лапы

Общий вид стойки с рабочим органом перед началом опыта по испытанию показан на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Общий вид стойки с рабочим органом перед началом опыта

Аналоговые сигналы поступали на усилитель-преобразователь, а затем по специальному кабелю передавались на ЭВМ, где информация обрабатывается и результаты выводятся на монитор в виде таблиц и графиков, а также в память компьютера. Усилительные терминалы и датчики приведены на рисунке 3.15.



а



б

Рисунок 3.15 – Составляющие компоненты электронной аппаратуры:
а – усилительный терминал; б – датчик

При проведении эксперимента измерялись такие параметры, как угол резания, глубина рыхления и угол заострения режущей кромки лапы культиватора.

При проведении эксперимента осуществлялось выявление оптимальных факторов, при которых достигалось малое тяговое усилие при достаточном качестве рыхления, которое оценивалось однородностью почвы по всей глубине разрыхления.

3.4.3 Методика определения влияния параметров восстановленной лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления почвы

Для получения подтверждения теоретических предположений о влиянии параметров рабочего органа универсальной стрельчатой лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления был выполнен комплекс экспериментальных исследований моделей рабочих органов. Конструкция базовой модели рабочего органа стрельчатой лапы плоскореза выбрана по результатам анализа систем безотвальной обработки почвы без оборота пласта с сохранением стерни на поверхности и подрезанием сорняков. С учетом агротехнических требований к рыхлению в плоскорезной системе обработке почвы, а также обзора и анализа конструкций отечественных и зарубежных типов плоскорезов-рыхлителей, исследований в области плоскорезной обработки почвы и патентной информации.

Основными параметрами рабочих органов стрельчатых лап были выбраны угол резания, образуемый верхней кромкой лезвия стрельчатой лапы с горизонтальной поверхностью в перпендикулярном сечении – α , и включающие его углы заострения (β) и задний угол (ϵ). В качестве прототипа выбрана конструкция стрельчатой лапы плоскореза-рыхлителя, предназначенной для глубокого и поверхностного рыхления. Были сконструированы и изготовлены рабочие лапы плоскореза-рыхлителя с различными углами заострения режущих ножей. Исследуемые параметры рабочего органа культиватора показаны на рисунке 3.16.

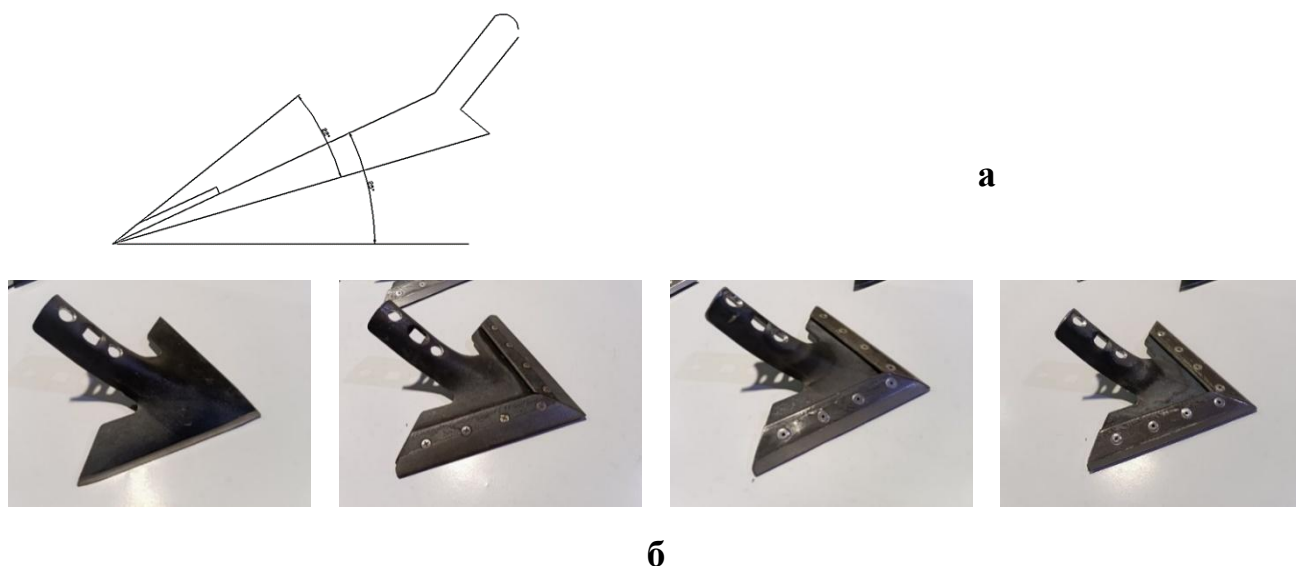


Рисунок 3.16 – Исследуемые параметры рабочего органа культиватора: а – угловые параметры лапы; б – рабочие органы с различными углами заострения режущих кромок

Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе были проведены лабораторные эксперименты рабочих органов с различной установкой углов режущих элементов. Лапы были изготовлены с различными углами резания – α и углами заострения – β (рисунок 3.16). Угол раствора был принят 80° , в поперечном сечении верхние поверхности образуют угол $\lambda = 150^\circ$ с вершиной на продольной оси лапы.

Исследования рабочих органов проводились на суглинистом грунте, который перед каждым опытом уплотнялся до 5 ударов плотномера ДОРНИИ, что соответствовало плотности $1,75 \text{ г/см}^3$, относительная влажность грунта в различных сериях опытов составляла от 9–12%. Ширина и толщина стрелчатой лапы составляли $b = 180 \text{ мм}$ и $\delta = 4 \text{ мм}$, длина $l = 100 \text{ мм}$, при максимальной глубине рыхления $h = 0,15 \text{ м}$.

Повторность каждого опыта при исследованиях – не менее 4–5. Тяговое усилие измерялось тензометрическим методом с использованием датчиков типа Д-150, результаты регистрировались при помощи специальной программы «Тензо», также определялась рабочая скорость. Каждый опыт повторялся не менее 5 раз.

С целью определения влияния основных углов на качество и сопротивление рыхлению был выполнен трехфакторный эксперимент с регрессионным анализом результатов. При подготовке к эксперименту выбраны изменяемые факторы и определены пределы их варьирования. Минимальные и максимальные значения углов составляли α от 15 до 35°, β – от 14 до 35°, глубина рыхления h – от 10 до 15 см.

В соответствии с теорией планирования эксперимента было составлено уравнение регрессии, связывающее исследуемый параметр со всеми влияющими на него факторами. Кроме того, дана оценка значимости каждого фактора, и менее значимый в дальнейших исследованиях исключался. В качестве параметра оптимизации выбрано тяговое усилие рабочего органа. В общем виде математическое описание процесса можно представить зависимостью:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3),$$

где Y – зависимая переменная или функция отклика, т.е. усилие, f, X_1, X_2, X_3 – независимые переменные, влияющие на Y , т.е. α, β, γ соответственно.

Для каждого фактора устанавливается верхний ($X_{i \max}$) и нижний ($X_{i \min}$) уровни, среднее значение фактора, базовый уровень (X_{0i}). При этом интервал варьирования $\Delta X_i = X_{i \max} - X_{0i}$. При планировании эксперимента произведено преобразование размерных независимых факторов X_i в безразмерные Z_i , нормированные:

$$Z_i = \frac{(x_i - x_{0i})}{\Delta x_i} \text{ п.}$$

В этом случае получаем $X_{i \max} = +1$ и $X_{i \min} = -1$ (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Основные характеристики факторов эксперимента $2^3 = 8$

Уровень фактора	Факторы		
	$X_1 (\alpha)$	$X_2 (\beta)$	$X_3 (h), \text{ см}$
Верхний (+)	35°	35°	15
Нижний (-)	15°	14°	10
Интервал варьирования	10°	12,5°	2,5

На следующем этапе были проведены однофакторные эксперименты по определению зависимости удельного сопротивления рыхлению от глубины обработки и влиянию угла заострения режущей кромки рабочего органа на качество рыхления и тяговое усилие для плоскореза-рыхлителя с оптимальными параметрами.

Кроме того, в процессе исследований изучали характер деформации и разрушения почвы. Оценивались и измерялись параметры разрыхленного грунта, такие как высота подъема призмы на входе в рабочий орган (между боковыми стойками) h_1 , высота рыхлого грунта над исходной поверхностью h_2 , характер и величина деформации грунта перед рабочим органом $L_{\text{деф}}$, перемещение верхнего слоя грунта в процессе рыхления по ходу движения $L_{\text{перем}}$, поперечные размеры почвенных агрегатов (рисунок 3.17).

На следующем этапе были проведены однофакторные эксперименты по определению зависимостей удельного сопротивления рыхлению от глубины обработки и влиянию затупления режущей кромки рабочего органа в результате износа на качество рыхления и тяговое усилие для плоскореза-рыхлителя с оптимальными параметрами.

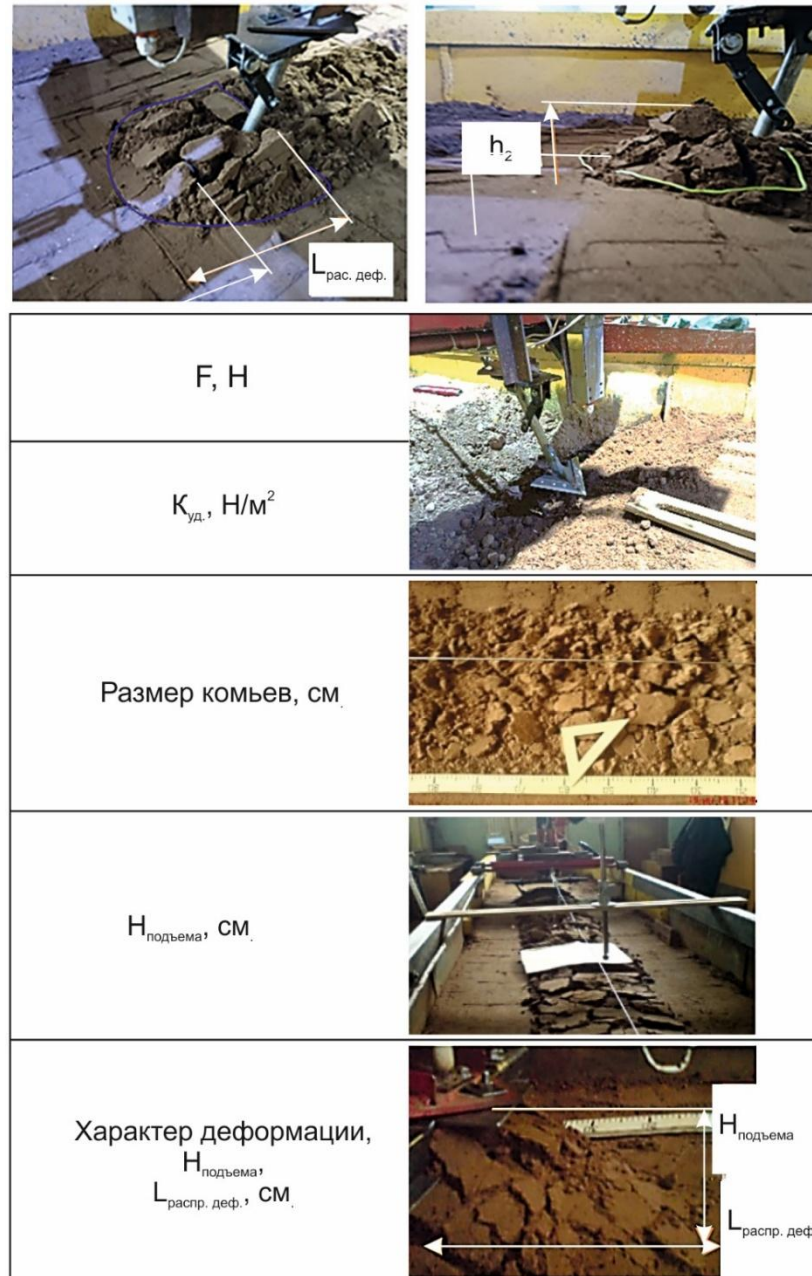


Рисунок 3.17 – Исследуемые параметры почвы: характер деформации почвы в сечении вертикальной продольной плоскостью области рыхления, кривые, ограничивающие зону деформации почвы для плоскорезов с различными угловыми параметрами; измерение параметров разрыхлённой почвы

3.5 Методика оценки степени разрыхления почвы восстановленной лапой методом фрактального анализа

Изучение строения почвы позволяет узнать её структуру и состав, в который входят мелкие минеральные и органические частицы, большая часть которых образует агрегаты различного размера. Применение фрактального анализа при

изучении строения почв, грунтов и других материалов известно давно и продолжает развиваться. Известны работы по изучению фрактальной структуры полостей и трещин в различных материалах [129, 130]. Фрактальный анализ применяется при изучении фильтрации жидкостей через грунт [131, 177]. Механическая обработка почвы способствует рыхлению и изменению её структуры. При этом изменяются и фрактальные характеристики.

Процесс работы культиватора является безотвальной обработкой почвы, в ходе которой происходит блокированное резание с большой толщиной слоя почвы, перемещение его относительно неподвижного массива почвы, а также сложные перемещения слоёв почвы и разрыхление на более мелкие агрегаты. При таких условиях рыхления традиционные методы определения и оценки параметров обработанной почвы дают недостаточную точность результатов. Применение фрактального анализа позволяет получить характеристики для количественной оценки структурного изменения разрыхлённой почвы по всей глубине рыхления и энергетические затраты на изменение структуры почвы. Анализируя динамику фрактальных характеристик, можно рекомендовать наиболее рациональные параметры рабочего органа и технологические режимы работы агрегата.

Опыты проводились с каждым рабочим органом (лапой) культиватора последовательно. В качестве опытных образцов использовались лапы культиватора с тремя вариантами угла резания (15° , 25° , 35°).

Подготовка грунта осуществлялась в том же порядке, как было описано выше.

В процессе исследования измерялось тяговое усилие тензометрическим методом с регистрацией результатов на ЭВМ. С целью исследования влияния поступательной скорости перемещения рабочего органа на процесс рыхления были проведены опыты рыхления почвы с разной скоростью. Каждая модель рабочего органа испытывалась при разных скоростях. Диапазон скоростей составил от 0,15 до 0,3 м/с с шагом 0,05 м/с. После каждого опыта делались косые срезы почвы с применением устройства, позволяющего срезать без нарушения структуры разрыхлённой почвы и осыпания на всю глубину рыхления. Для получения срезов

было использовано спроектированное и изготовленное специальное устройство (рисунок 3.18), состоящее из неподвижного основания и подвижного лезвия, перемещающегося по направляющим основания под углом в 75° , при котором происходит наименьшее осыпание нормально увлажнённого грунта.

После каждого опыта делались срезы обработанной почвы и производилось их фотографирование с последующей обработкой снимков.

Срезы маркировались листками с нанесенными параметрами и номером эксперимента. Фотографирование производилось в высоком разрешении в формате *bmp* до и после обработки грунта. Фотографирование грунта проводилось в разных масштабах. Масштабирование осуществлялось приближением или удалением фотоаппарата. Снимки среза грунта приведены на рисунке 3.19.

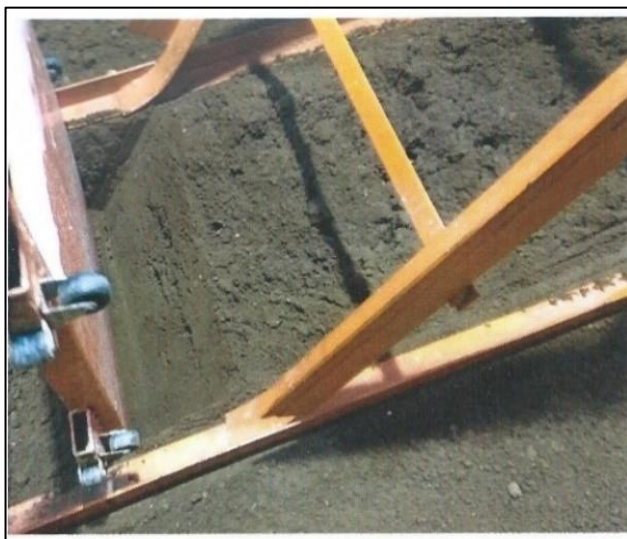
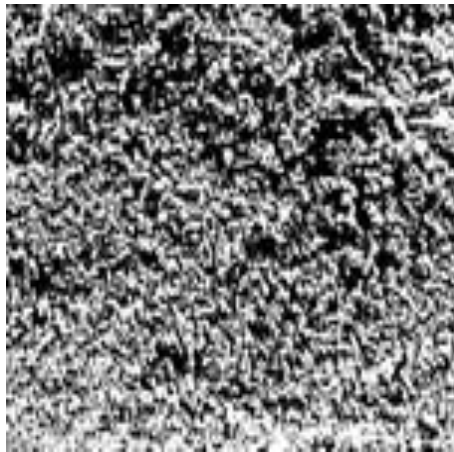


Рисунок 3.18 – Приспособление для получения срезов грунта



Рисунок 3.19 – Срезы грунта в разных масштабах фотосъёмки

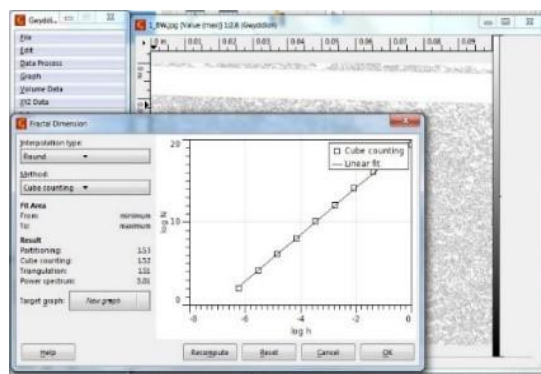
При использовании компьютера производились сортировка, предварительная подготовка и анализ снимка, которые далее были конвертированы в черно-белый формат. По фотографиям осуществлялось измерение фрактальной размерности клеточным методом с использованием программы анализа данных Gwyddion, которая содержит функцию определения фрактальной размерности Fractal Dimension. Эта функция позволяет производить статистическую обработку изображений [177, 178]. Обработка изображений осуществлялась с помощью приложения Shade Data, позволяющего выделять на снимках однородные графические образования и представлять более точное изображение структуры снимка (рисунок 3.20).



а



б



в

Рисунок 3.20 – Шейдерное представление изображения среза грунта: а – структура поверхности среза грунта до шейдерной обработки; б – после; в – окно инструмента Fractal Dimension программы Gwyddion с шейдерным отображением снимка среза грунта

3.6 Методика проведения полевых испытаний экспериментального культиватора

Для исследования тягового сопротивления и, соответственно, оценки расхода топлива при культивировании восстановленными стрелчатými лапами и серийными проводились испытания на полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Также выполнялись исследования износостойкости восстановленных стрелчатых лап и ее сравнение с износостойкостью новой детали. Тип почвы – суглинистые тяжелые.

Для проведения исследований по нахождению тягового сопротивления использовался трактор МТЗ-1523 в сцепке с культиватором КСП-4 (рисунок 3.21), на который устанавливались стрелчатые лапы со сменными пластинами (рисунок 3.22), изготовленными по предлагаемой нами технологии и имеющие наименьший коэффициент трения, полученный при испытании на машине трения и подтвержденный испытаниями в почвенном канале.

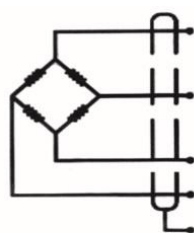


Рисунок 3.21 – К методике полевого опыта: а – стрелчатые лапы плоскореза с установленными ножами после диффузионного хромирования; б – культиватор КПС-4 в сцепке с трактором МТЗ-1523 при подготовке к работе



Рисунок 3.22 – Стрельчатые лапы, со сменными пластинами

При испытании на тяговое сопротивление бралось 20 стрельчатых лап с установленными ножами, изготовленными из стали 45, подвергшимися диффузионному хромированию, имеющими наименьший коэффициент трения по результатам испытаний на машине трения и самое низкое тяговое сопротивление при проверке в почвенном канале, с углами заострения 17° . Стрельчатые лапы были установлены на стойки культиватора КПС-4, агрегируемого с трактором МТЗ-1523, угол резания составлял 25° . Обработку поля проводили на глубину 15 см под посев. Между дышлом культиватора и скобой трактора установлено тяговое звено с тензометрическим датчиком, в кабине – измерительная аппаратура и ноутбук для регистрации сигнала (рисунок 3.23).



(+) ПИТАНИЕ КРАСНЫЙ

(+) СИГНАЛ ЖЁЛТЫЙ

(-) ПИТАНИЕ СИНИЙ

(-) СИГНАЛ ЗЕЛЁНЫЙ

Номинальный выходной сигнал	mV/V	2
Нелинейность	%П.Ш.	<0,017
Гистерезис	%П.Ш.	<0,017
Повторяемость	%П.Ш.	<0,017
Баланс ноля	$\mu V/V$	<20
Ползучесть (от н.с., 30 мин)	%П.Ш./30 мин	<0,023
Темпер, дрейф баланса ноля	%П.Ш./10°C	<0,04
Темпер, коэфф. для выходного сигнала	%П.Ш./10°C	<0,012
Входное сопротивление	Ω	385
Выходное сопротивление	Ω	350
Допустимая перегрузка	%П.Ш.	150
Сопrotивление изоляции	M Ω	>5000
Температурный диапазон, компенсированный	°C	-10-+40
Напряжение питания	V	5-15



Рисунок 3.23 – Схема установки датчика ES-1-10t при проведении экспериментов

Для измерения и регистрации тягового усилия был использован аналого-цифровой преобразователь ZET 210 Sigma USB. Предназначен для измерений параметров сигналов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 400 кГц), поступающих с различных первичных преобразователей. ES-1-10t, сигнал от которого поступал на предварительный усилитель ZET 410 и аналого-цифровой преобразователь ZET 210 Sigma USB с сохранением данных во внутренней памяти сигнального процессора и дальнейшей их передачей контроллеру USB на компьютер или записи на флеш-диск (рисунок 3.24).

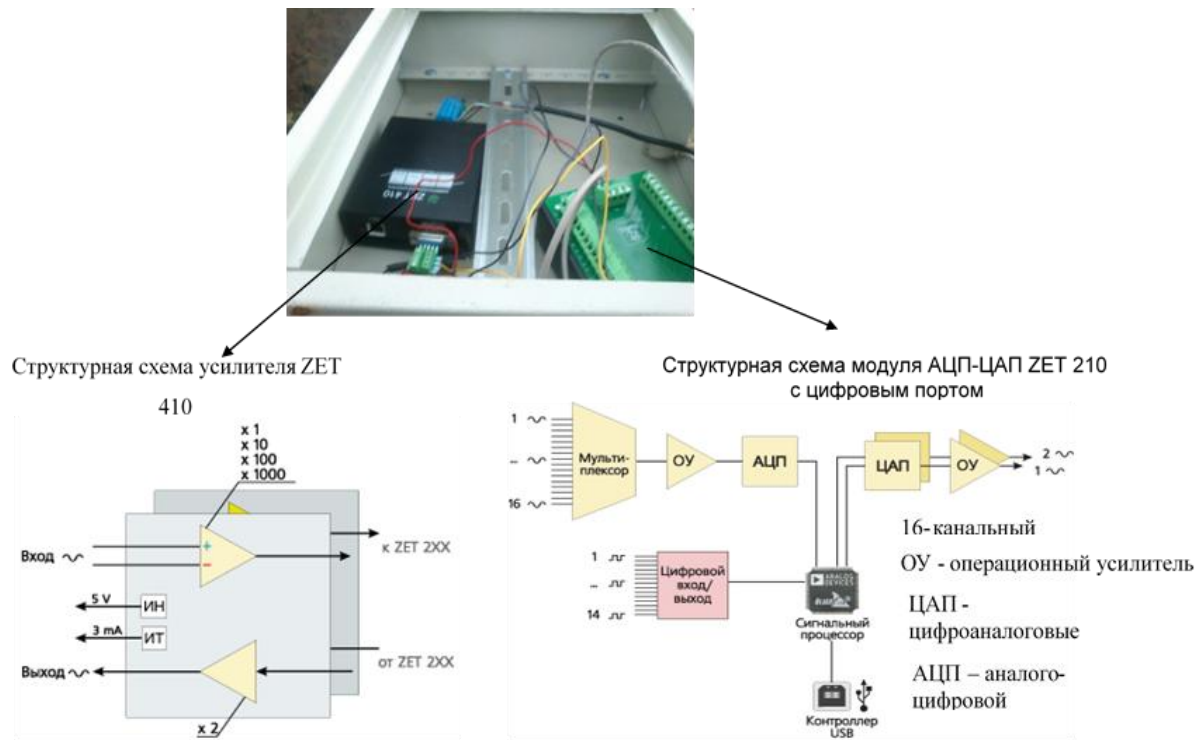


Рисунок 3.24 – Схема подключения тензорезистивного датчика силы ES-1-10t при проведении экспериментов

16-канальный мультиплексор коммутирует последовательно все выбранные каналы к одному операционному усилителю через равные промежутки времени. После момента переключения каналов от сигнального процессора поступает команда на начало преобразования для АЦП, по окончании преобразования АЦП поднимает флаг готовности данных преобразования и происходит прерывание в сигнальном процессоре. Сигнальный процессор сохраняет данные во внутренней памяти для дальнейшей передачи контроллеру USB или записи на флеш-диск. Данные из внутренней памяти сигнального процессора поступают на два независимых цифроаналоговых преобразователя ЦАП. Выходной сигнал ЦАП формируется операционными усилителями. Предварительный усилитель ZET 410 предназначен для усиления входных сигналов, поступающих от различных тензодатчиков и передачи их на измерительный прибор – модуль ZET 210, а также для питания подключаемого датчика. На рисунке 3.25 приводится схема подключения тензорезистивного датчика силы ES-1-10 t к модулям АЦП/ЦАП ZET 210.

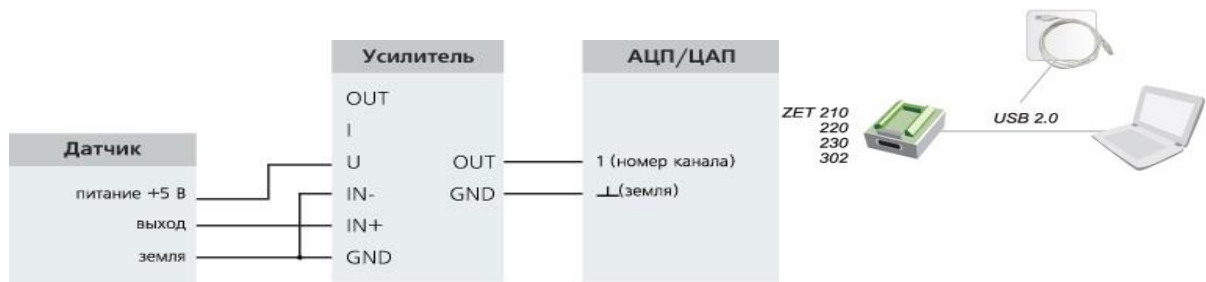


Рисунок 3.25 – Схема подключения аналого-цифрового преобразователя ZET 210 при проведении опытов

Для подключения требуется предварительный усилитель ZET 410. Для питания датчика используется встроенный источник напряжения усилителя – это обеспечивает стабильное питание +5 В.

Культиватор транспортировался трактором к месту проведения эксперимента. Глубина обработки устанавливалась максимальная для данной модели – 0,15 м. Сигнал от датчика поступал на предварительный усилитель ZET 410 с установленным на нем максимальным коэффициентом усиления 1000, затем на аналого-цифровой преобразователь с установленным предварительно в настройках программы «Настройка аналоговых входов и выходов» числом дискретизации, откуда оцифрованный сигнал поступал через USB-разъем на ЭВМ с установленным, настроенным и запущенным (режим записи) программным обеспечением и записывался в бинарный файл. После чего обрабатывался при помощи данного программного обеспечения программой «Конвертер файлов», предназначенной для открытия бинарных файлов и перевода хранимой информации в текстовый вид. В дальнейшем, созданный текстовый файл может быть открыт в любом текстовом редакторе, либо информация может быть скопирована в табличный редактор MS Excel для более подробного анализа, также возможна обработка данных при помощи программы «Отображение Просмотр результатов» (рисунок 3.26).

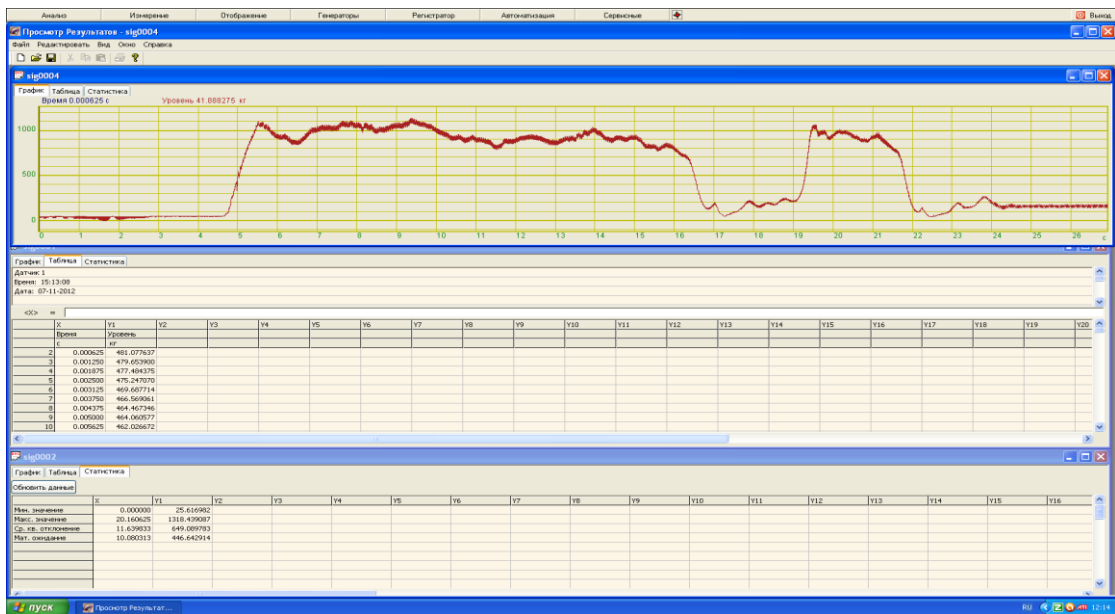


Рисунок 3.26 – Обработка данных в приложении «Тензометр»

В измерительную информационную систему поступают также значения скорости движения трактора, с помощью которых устанавливается необходимая нам величина скорости. Данный сигнал приходит с датчика скорости 11.3843-У-ХЛ, установленного, базово, в тракторе. Значения пройденного пути, обработанной площади, расхода топлива – часового и удельного берутся из системы дистанционного мониторинга, которая в автоматическом режиме отслеживает изменение параметров работы трактора в реальном времени и оповещает пользователя о неисправностях в работе оборудования.

Далее проводились эксперименты, повторностью не менее 5 раз, в процессе которых измерялось тяговое усилие описанным выше тензометрическим методом, оценивались степень рыхления – плотность грунта по глубине обработки, характер деформации грунта перед рабочим органом, характер деформации и размеры агрегатов грунта после прохода рабочего органа, рабочая скорость, удельная энергоёмкость процесса, коэффициент сопротивления рыхлению. Перед началом культивирования, а в дальнейшем во время работы, через каждые 10 га осуществлялись замеры геометрических размеров стрельчатой лапы: толщина, ширина и длина лезвия лапы. Замеры проводились штангенциркулем ШПЦ-1-150-0,02 6" DIGITAL CALIPER – STRONG.

3.7 Методика оценки потребительских свойств культиватора с восстановленными лапами

На полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проведены испытания культиватора с восстановленными лапами. Для испытания использовались методики, которые установлены приказом Минсельхоза России от 18 декабря 2018 г. № 573 «Об утверждении способов проведения испытаний для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования федеральными государственными бюджетными учреждениями, осуществляющими проведение испытаний машин и оборудования агропромышленного комплекса, находящимися в ведении Министерства сельского хозяйства Российской Федерации». Полученные результаты сравнивались с показателями, которые определены постановлением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования» (с изменениями и дополнениями). Для культиваторов для сплошной обработки почвы (лаповые) они представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Показатели критериев оценки культиваторов

Показатели	Значение
Глубина обработки, см	4–12
Крошение почвы, комки размером до 25 мм включительно, %, не менее	80
Крошение почвы, комки размером свыше 100 мм, %, не более	0
Подрезание сорняков, %, не менее	100
Гребнистость поверхности почвы, см, не более	4
Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее	120

Глубина обработки (взрыхленного слоя) измерялась линейкой, погруженной в почву до необработанного слоя. Для этого по каждой из четырехкратной (две – по ходу движения агрегата, две – при движении агрегата в обратную сторону) повторности проводятся не менее 25 измерений. Измерения выполняются по следу рабочего органа с интервалом 1 м по ходу движения машины. Если след рабочих органов предопределили, то измерения ведутся на равном расстоянии по всей ширине захвата машины. За рабочими органами, образующими гребнистую поверхность, осуществляются парные измерения глубины на гребне и в борозде с последующими вычислениями средней из двух измерений. Для секционных машин измерения проводятся по каждой секции. Погрешность измерения глубины ± 1 см. Данные измерений обрабатываются статистическим методом с получением среднего арифметического значения глубины обработки, стандартного отклонения и коэффициента вариации.

Крошение почвы определялось по пробам, отбираемым в четырех точках участка (две – при движении агрегата в прямом направлении, две – при движении агрегата в обратном направлении) с площадок $0,25 \text{ м}^2$ на глубину обработки, не ранее чем через час после прохода машины. Отобранные пробы разделялись на фракции, указанные в ТУ на испытуемую машину. Проба переносилась на специальный комплект решет с диаметрами отверстий, соответствующими размерам фракции почвы. Решета в наборе располагаются в порядке уменьшения отверстий. Колебаниями решет обеспечивалось распределение (просеивание) почвы на соответствующие фракции. Каждая фракция взвешивалась с погрешностью ± 40 г. Результаты взвешивания записывались, и вычислялась массовая доля каждой фракции комков.

Гребнистость поверхности почвы определялась по результатам измерений высоты гребней. Высота гребней измерялась с помощью рейки и линейки в четырехкратной повторности. После прохода машины по ширине захвата накладывалась рейка на вершины гребней в местах, выбранных случайным образом. Измерения проводили от дна борозды между гребнями до нижней плоскости рейки. Погрешность измерений ± 5 мм. Количество измерений – не менее 40 (в каждой

повторности 10 измерений). Результаты измерений записываются, и вычисляется среднее арифметическое значение с округлением до целого числа. Для определения сохранения стерни до прохода машины на каждой повторности накладываются по две рамки длиной 0,5 м и шириной, равной ширине захвата машины. В пределах каждой рамки собирается вся стерня и определяется ее масса с погрешностью взвешивания ± 10 г. После прохода машины эти же рамки накладываются в местах рядом с первоначальным расположением, и учитывается оставшаяся в пределах рамки стерня. Стерня с каждой рамки взвешивается. Сохранение стерни определяется в процентах по отношению массы стерни после прохода машины к массе пожнивных остатков до прохода машины.

Наработка на отказ культиватора определялась на основании наблюдений за безотказностью культиваторов. В качестве исходных материалов были также использованы: основные технические характеристики культиваторных лап, которые регламентируются действующим отраслевым стандартом ОСТ 23.2.164-87 «Лапы и стойки культиваторов. Общие технические условия»; материалы отчетов НИР с моделями расчетов и испытаний лап культиватора в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; сведения Минсельхоза России, Ассоциации «Росспецмаш», данные, доступные в открытом информационном поле интернет-ресурсов предприятий-изготовителей культиваторов, научных организаций и др. Для анализа отказов и дефектов стрельчатых лап использовались данные протоколов испытаний культиваторов на различных машиноиспытательных станциях Минсельхоза России, в том числе ФГБНУ «Кубанская МИС», ФГБУ «Северо-Кавказская МИС», ФГБУ «Центрально-Черноземная МИС».

Выводы

1. Разработаны общие и частные методики исследования влияния параметров диффузионного хромирования на толщину, микротвердость и износостойкость покрытий. Исследование микротвердости покрытий образцов проводилось при помощи прибора ПМТ-ЗМ. Испытания образцов на износостойкость проводили на установке абразивного изнашивания.

2. Расчет напряженного состояния конструкции лапы культиватора выполнялся с использованием системы Inventor Pro и отечественного графического пакета «Компас».

3. Исследования операций резания грунта при движении лапы культиватора были проведены в специализированной лаборатории мелиоративных машин кафедры организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Для этого использовали грунтовый канал и специальные измерительные приборы.

4. Для изучения влияния углов резания и заострения режущей кромки лапы при рыхлении на величину тягового усилия и характер структуры разрыхлённого грунта проведён трёхфакторный эксперимент. Для этого были сконструированы и изготовлены сменные компенсационные пластины на лапы культиватора с различными углами заострения режущих кромок.

5. Оценка степени разрыхления почвы восстановленной лапой проводилась методом фрактального анализа. Измерение фрактальной размерности проводилось клеточным методом с использованием программы анализа данных Gwyddion.

6. Полевые испытания восстановленных стрельчатых лап проводили на полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Для этого использовался трактор МТЗ-1523 в сцепке с культиватором КСП-4.

7. Для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) культиватора с восстановленными лапами при обработке почвы определяли глубину обработки (взрыхленного слоя), крошение и гребнистость поверхности почвы и наработку на отказ. Испытания проводили в соответствии с приказом Минсельхоза России от 18 декабря 2018 г. № 573 «Об утверждении способов проведения испытаний для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования федеральными государственными бюджетными учреждениями, осуществляющими проведение испытаний машин и оборудования агропромышленного комплекса, находящимися в ведении Министерства сельского хозяйства Российской Федерации».

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Исследования физико-механических свойств покрытий, полученных диффузионным хромированием

4.1.1 Исследования влияния режимов хромирования на толщину диффузионного слоя

Для исследований выбраны стали 45, У8А, ХВГ, 65Г, 30ХГСА, 08кп. Выбор марок сталей обусловлен тем, что он охватывает практически все наиболее распространенные стали, применяющиеся для изготовления стальных лент. На скорость роста толщины диффузионного слоя оказывает влияние ряд факторов. Основными из них являются температура процесса, обуславливающая увеличение подвижности атомов хрома и фазовое превращение $\gamma \leftrightarrow \alpha$ – железа, область которого характеризуется «ослабеванием межатомных связей и возникновением множества вакансий, распространяющихся в направлении движения зоны фазового превращения» [126, 142]. На рисунках 4.1–4.14 показано изменение толщины диффузионного слоя на образцах из различных марок сталей толщиной 0,4–0,8 мм после хромирования в вакууме при температурах 1100–1200°C и выдержках 2–6 ч.

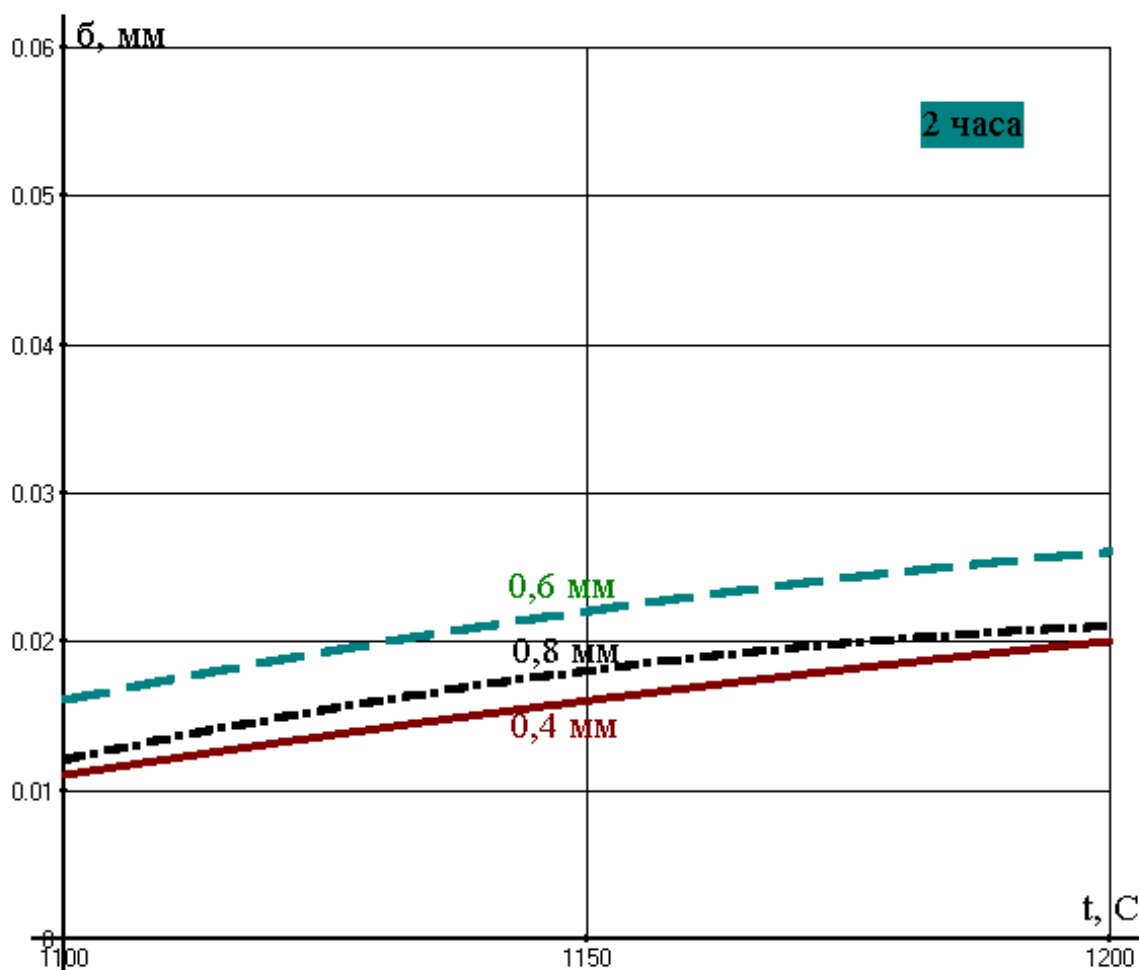


Рисунок 4.1 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 45) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 2 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 - (5,5 \cdot 10^{-4})t - 0,0352;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00197t - 0,879;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (1 \cdot 10^{-6})t^2 - 0,00221t + 1,233.$$

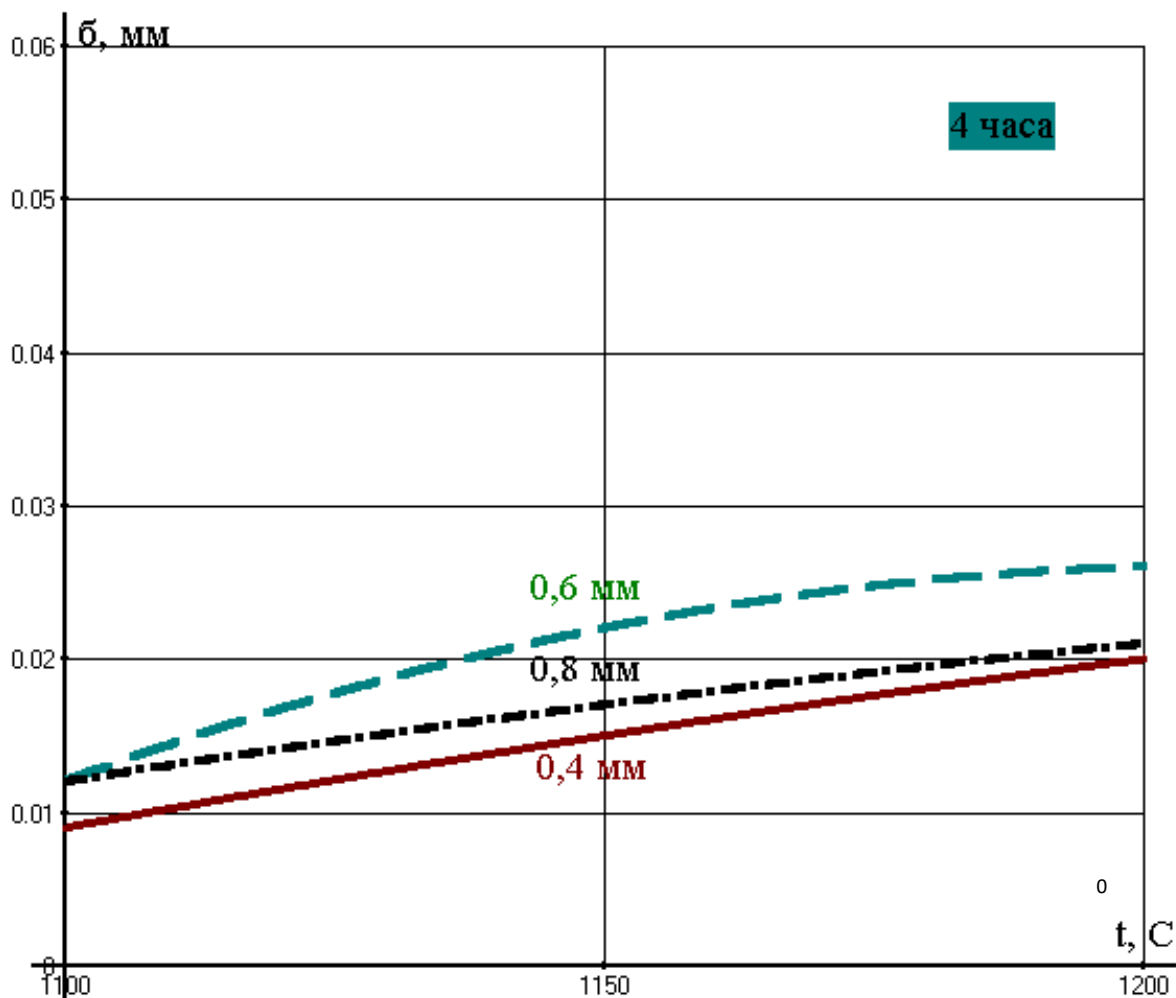


Рисунок 4.2 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 45) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 4 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,7 \cdot 10^{-4})t - 0,376;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (1,2 \cdot 10^{-6})t^2 + 0,0029t - 1,726;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,5 \cdot 10^{-4})t - 0,351.$$

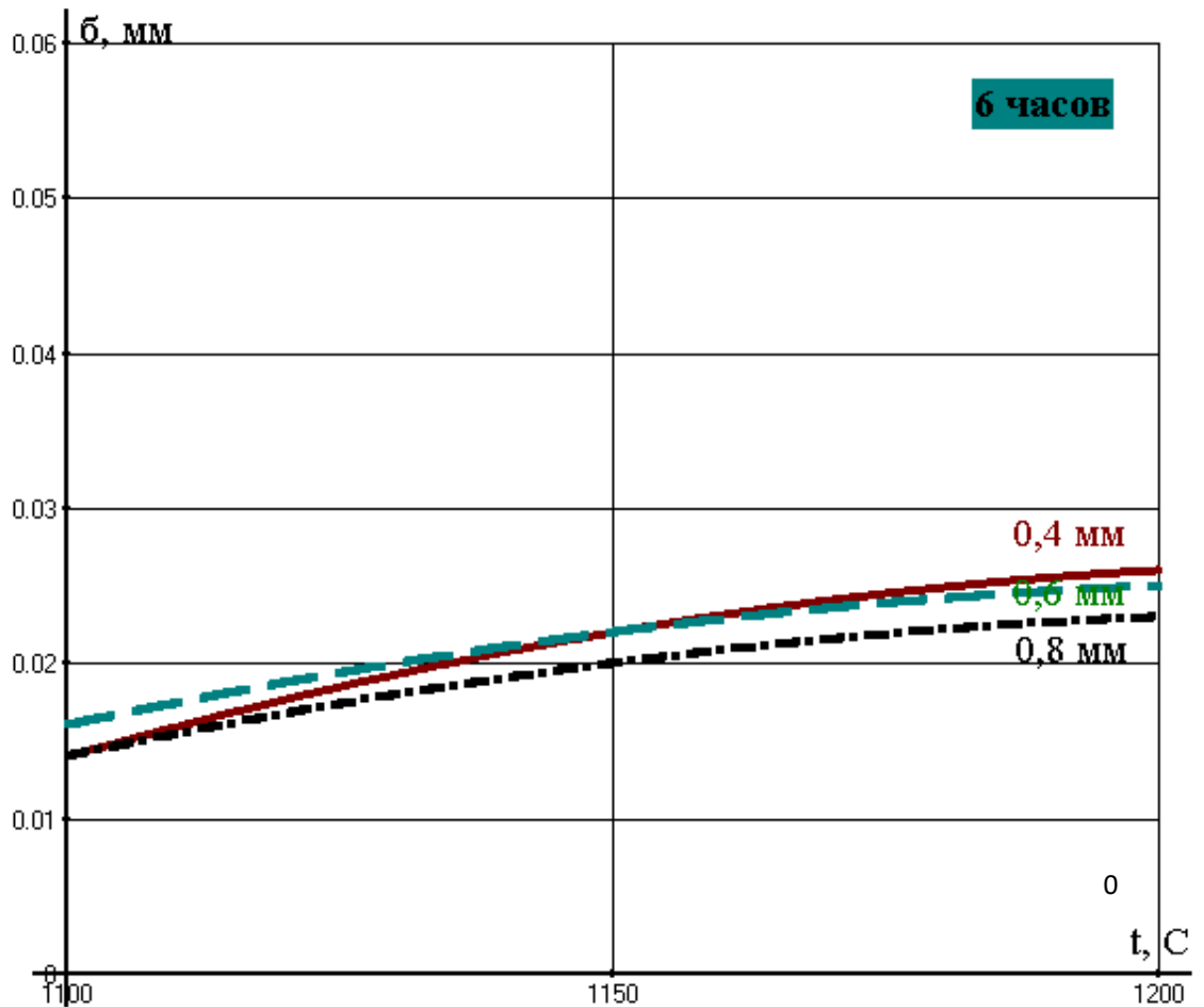


Рисунок 4.3 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 45) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 6 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (8 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00196t - 1,174;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00147t - 0,875;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00147t - 0,877.$$

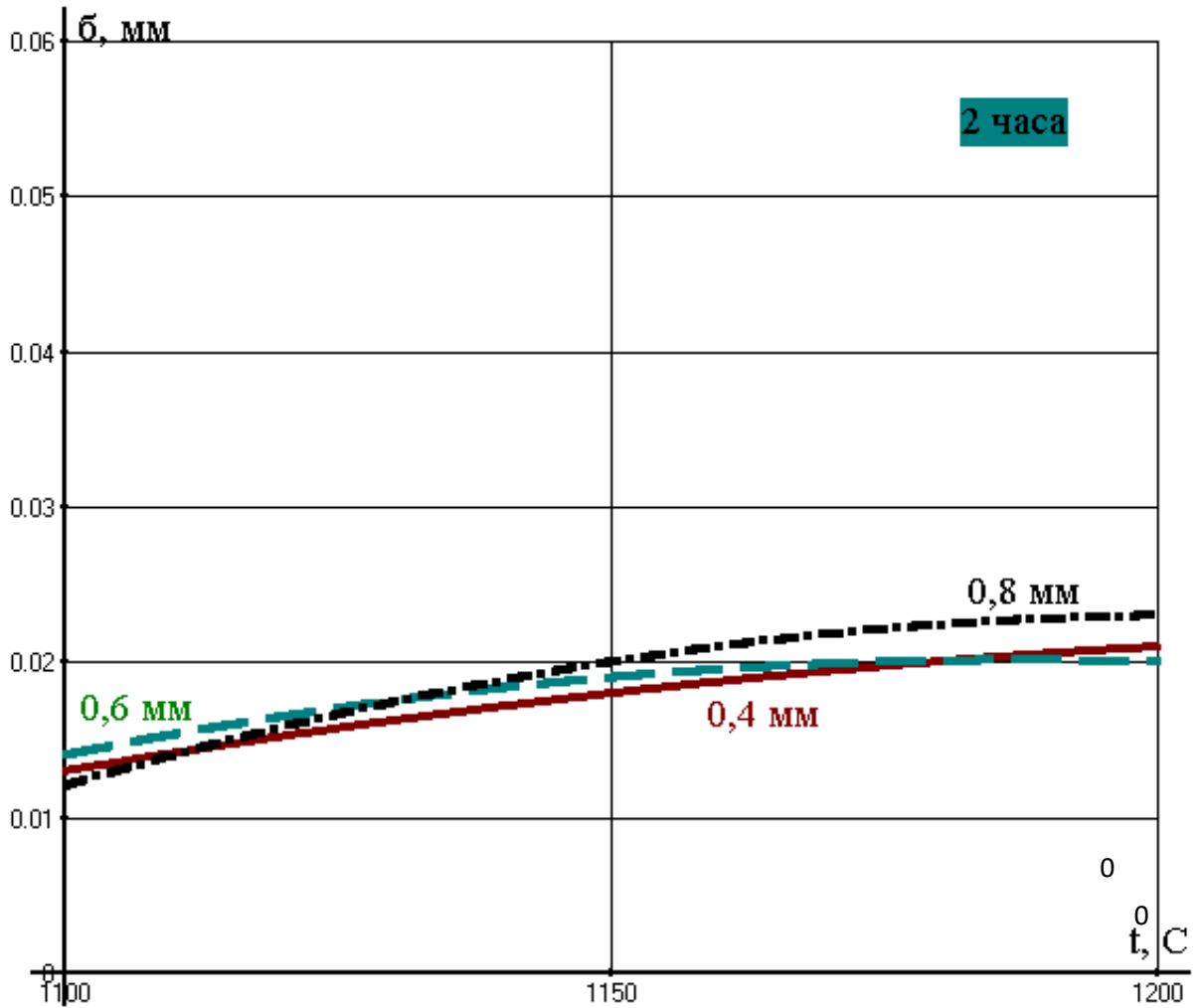


Рисунок 4.4 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь У8А) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 2 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,001t - 0,603;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (8 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,0019t - 1,108;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (1 \cdot 10^{-6})t^2 + 0,00241t - 1,429.$$

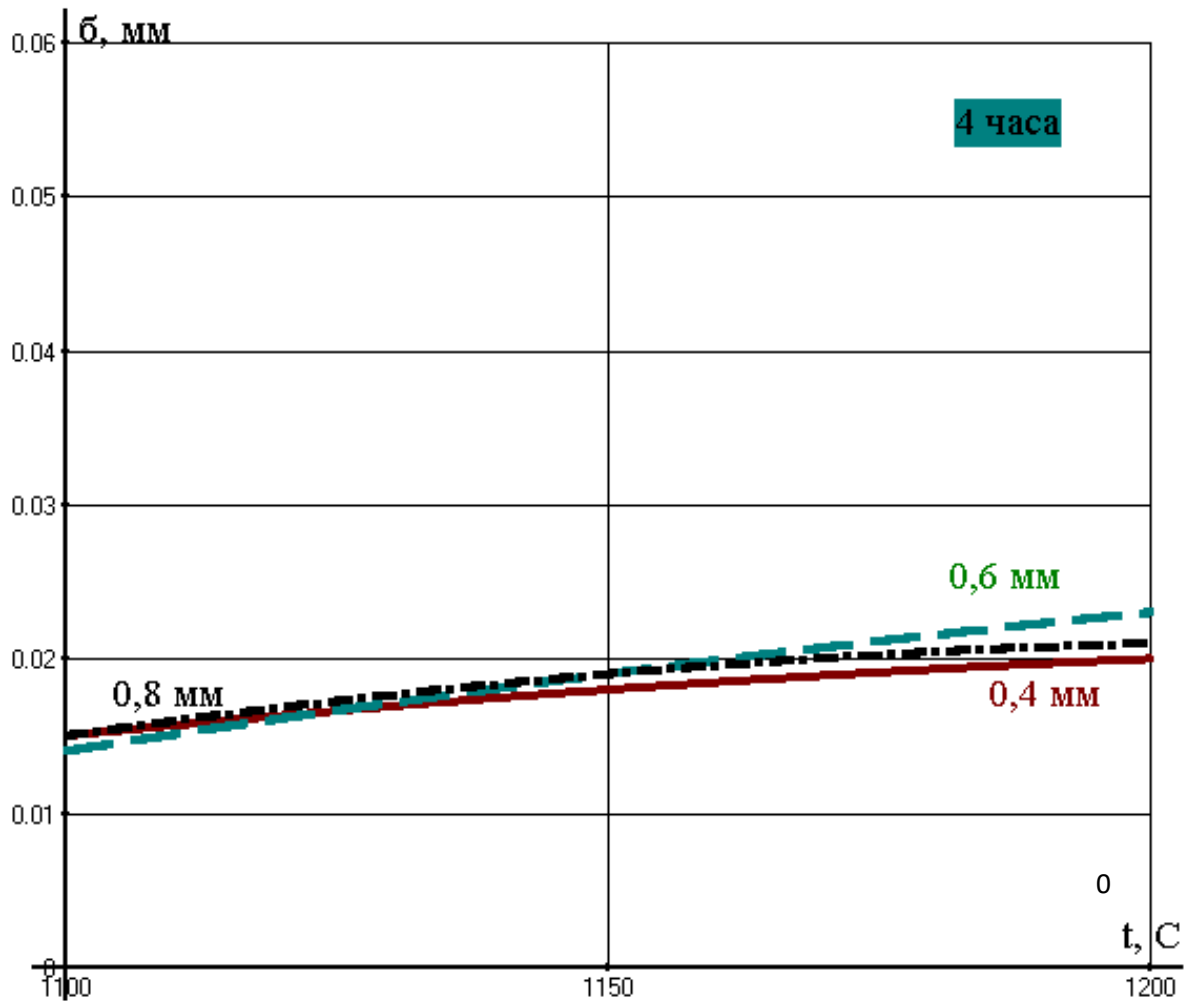


Рисунок 4.5 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь У8А) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 4 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,1 \cdot 10^{-4})t - 0,304;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = (1 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,5 \cdot 10^{-4})t - 0,349;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = (4 \cdot 10^{-7})t^2 + (9,8 \cdot 10^{-4})t - 0,574.$$

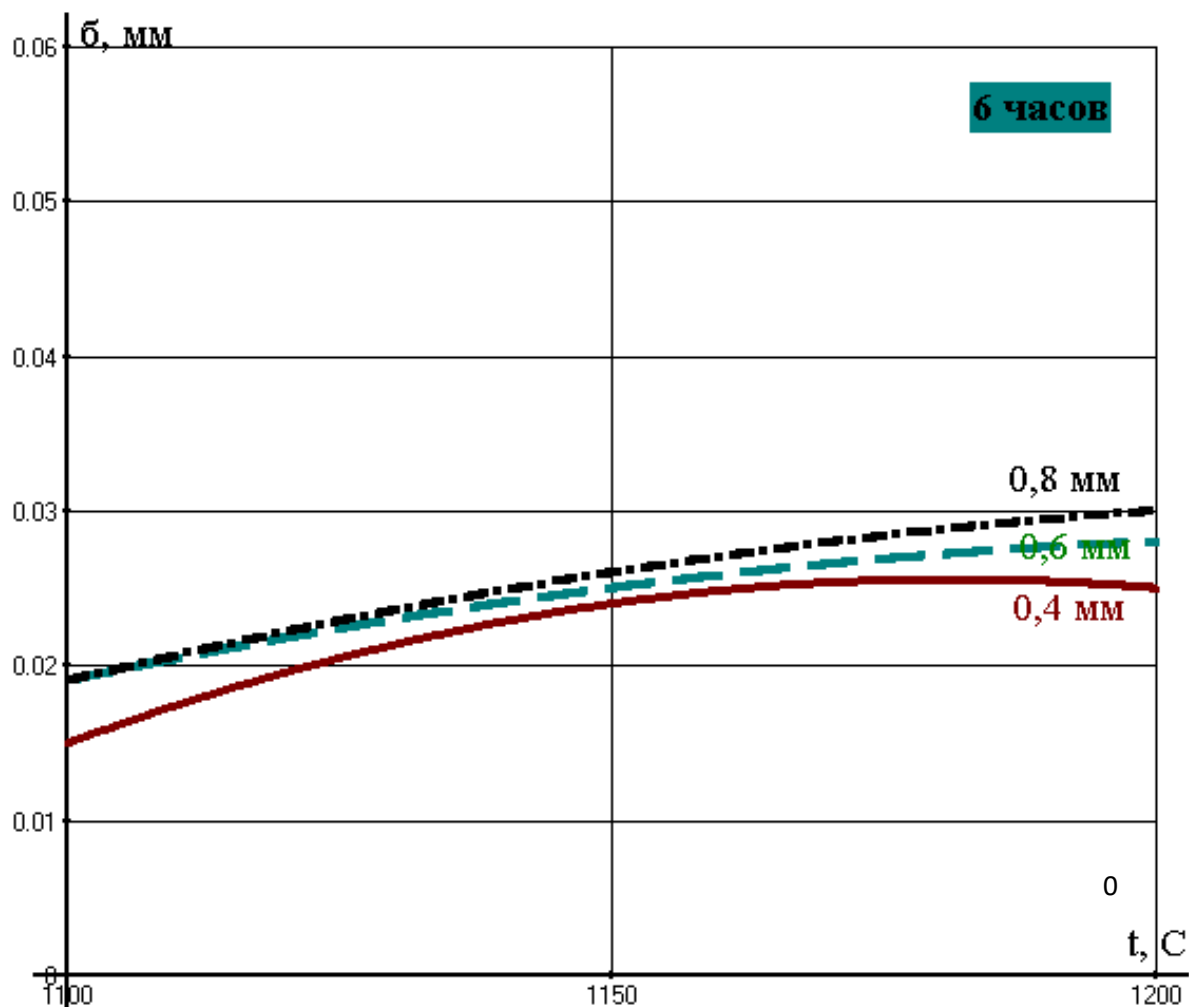


Рисунок 4.6 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь У8А) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 6 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (1,6 \cdot 10^{-6})t^2 + 0,00378t - 2,207;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00147t - 0,872;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00149t - 0,894.$$

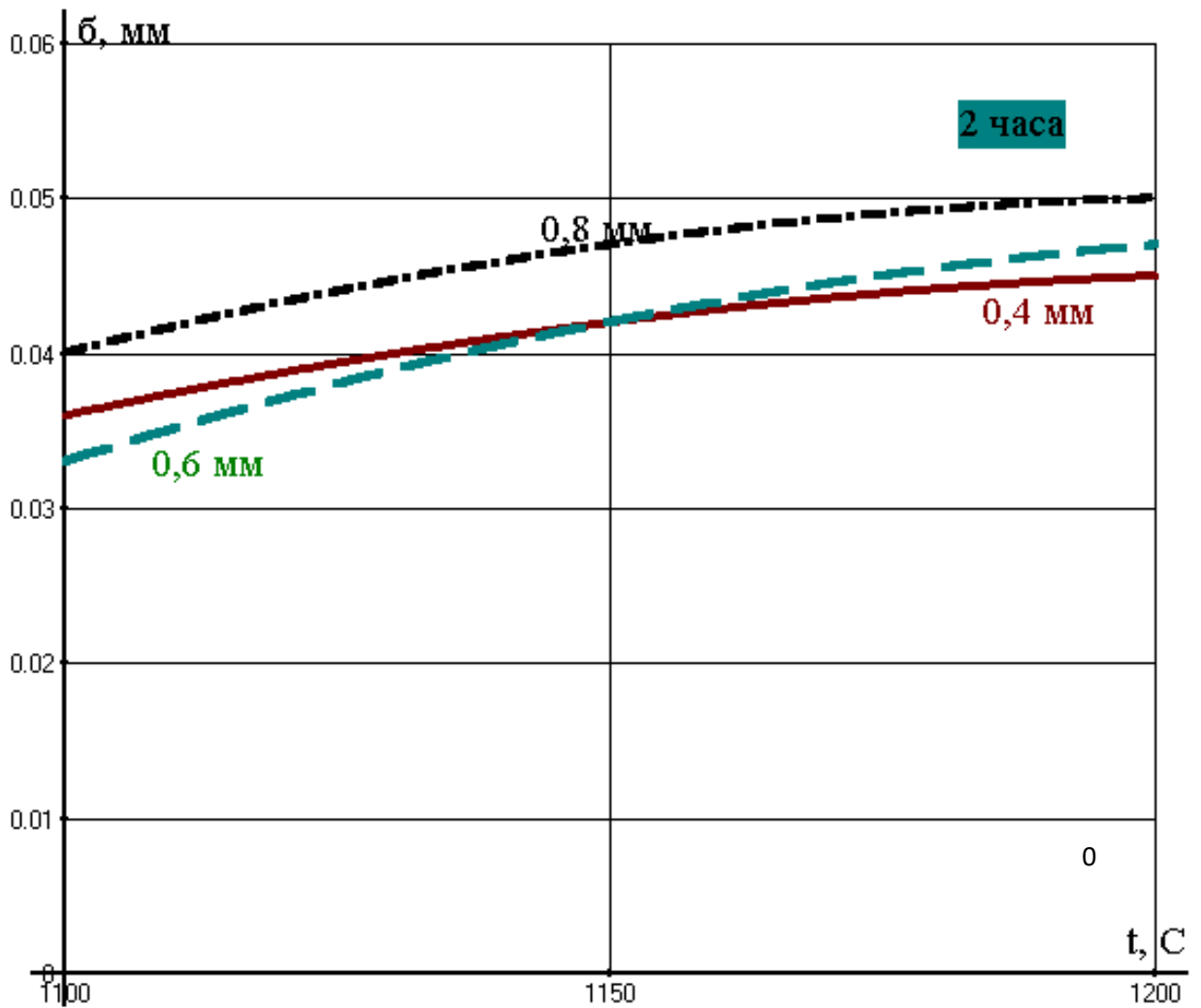


Рисунок 4.7 – Зависимость изменения толщины диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 08кп) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 2 ч

Уравнения зависимости толщины диффузионного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00147t - 0,855;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (8 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00198t - 1,177;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (8 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00194t - 1,126.$$

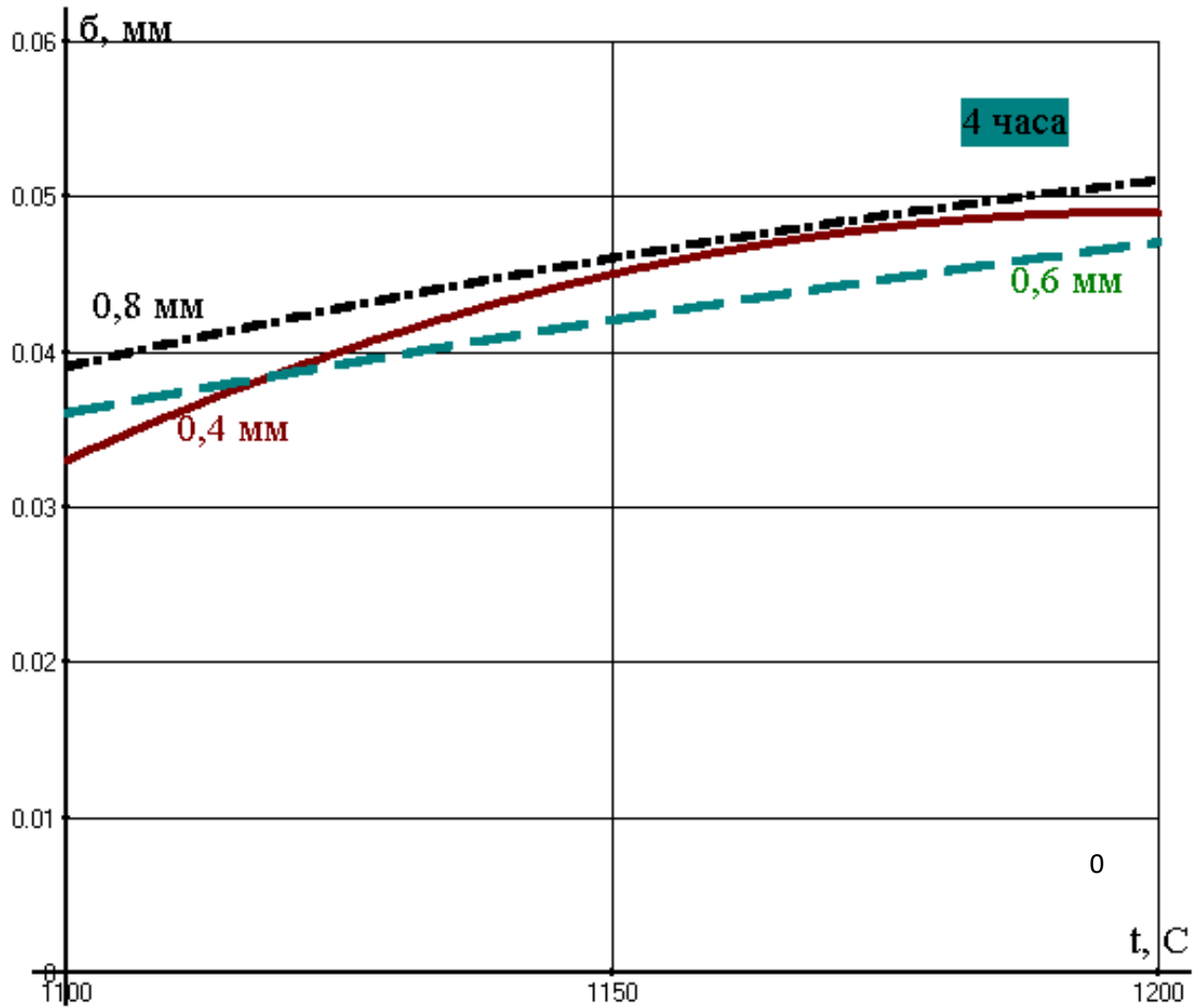


Рисунок 4.8 – Зависимость изменения толщины диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 08кп) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 4 ч

Уравнения зависимости толщины диффузионного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (1,6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00348t - 2,255;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,7 \cdot 10^{-4})t - 0,349;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00104t - 0,625.$$

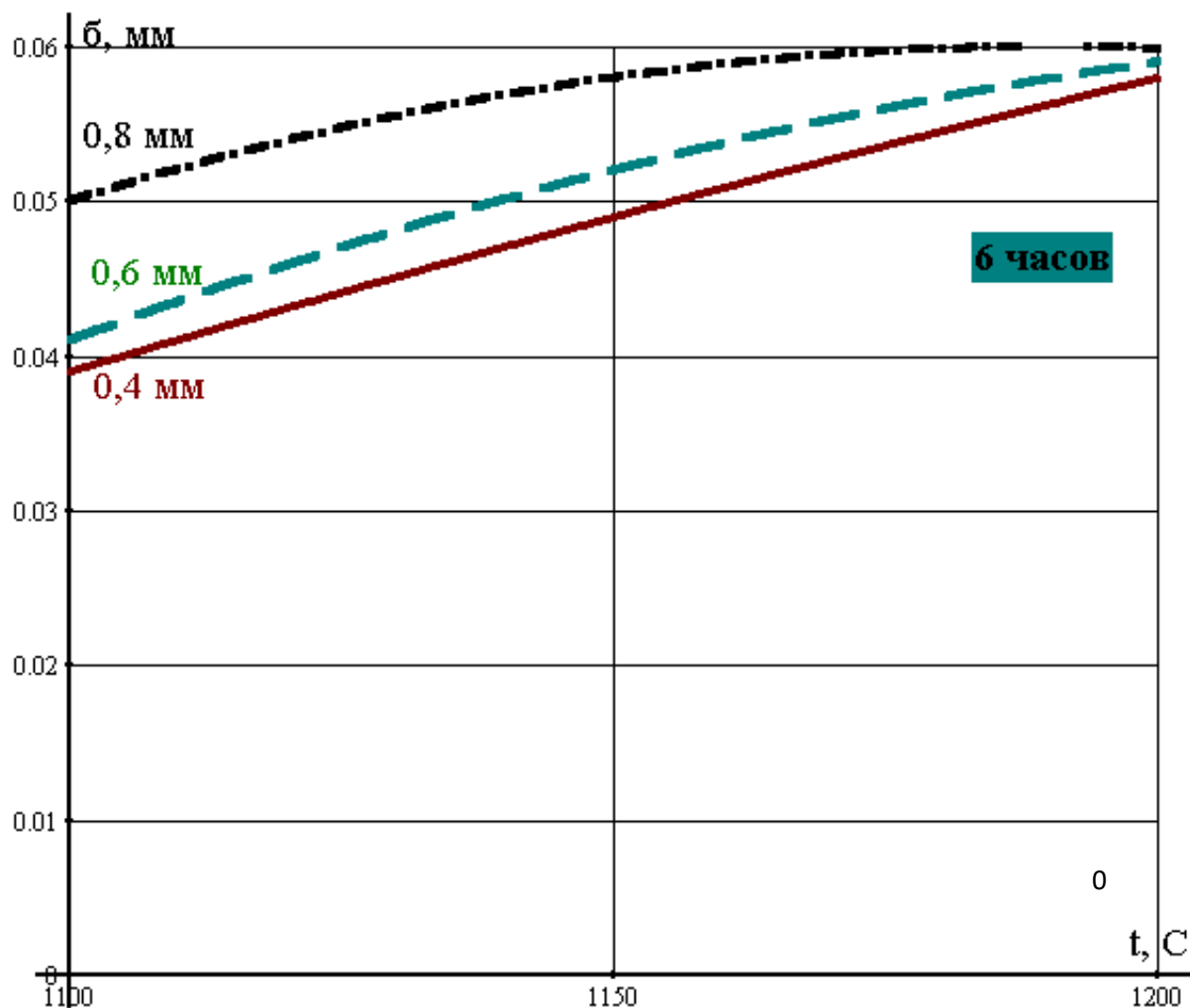


Рисунок 4.9 – Зависимость изменения толщины диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 08кп) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 6 ч

Уравнения зависимости толщины диффузионного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (6,5 \cdot 10^{-4})t - 0,434;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (8 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00202t - 1,213;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (1,22 \cdot 10^{-6})t^2 + 0,002905t - 1,6693.$$

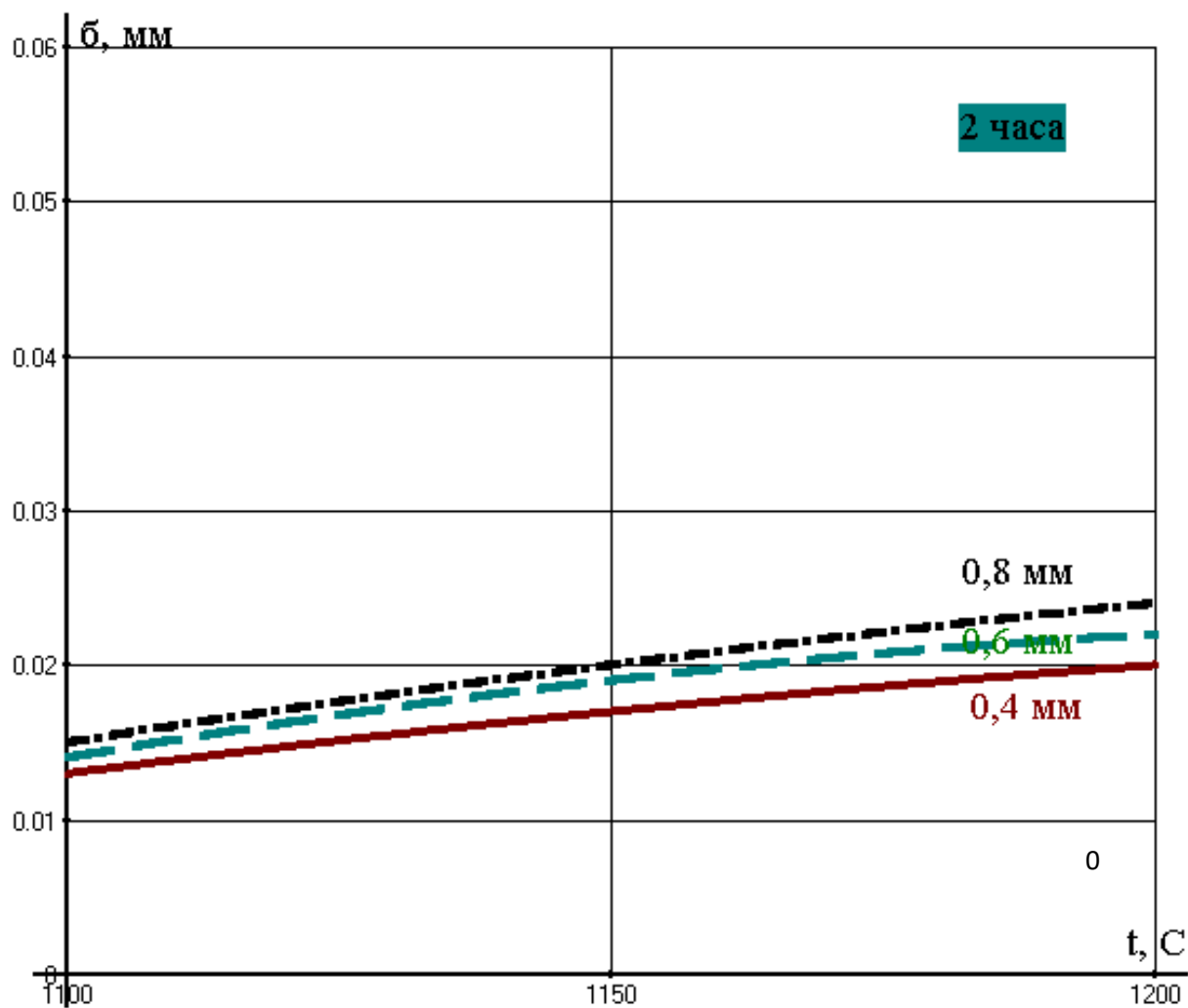


Рисунок 4.10 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 65Г) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 2 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,3 \cdot 10^{-4})t - 0,328;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,001t - 0,602;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,5 \cdot 10^{-4})t - 0,348.$$

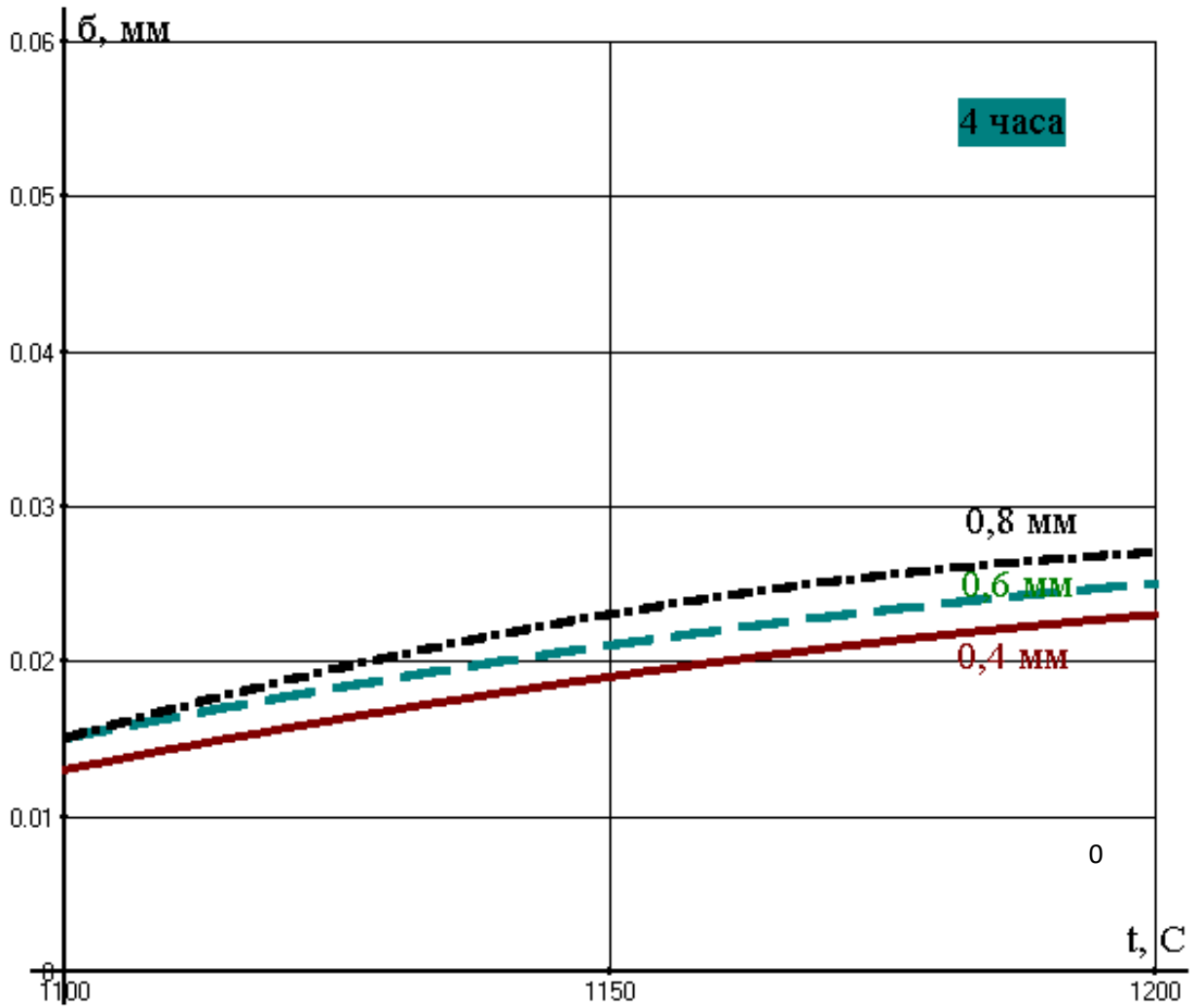


Рисунок 4.11 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 65Г) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 4 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00102t - 0,625;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00102t - 0,623;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (8 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00196t - 1,173.$$

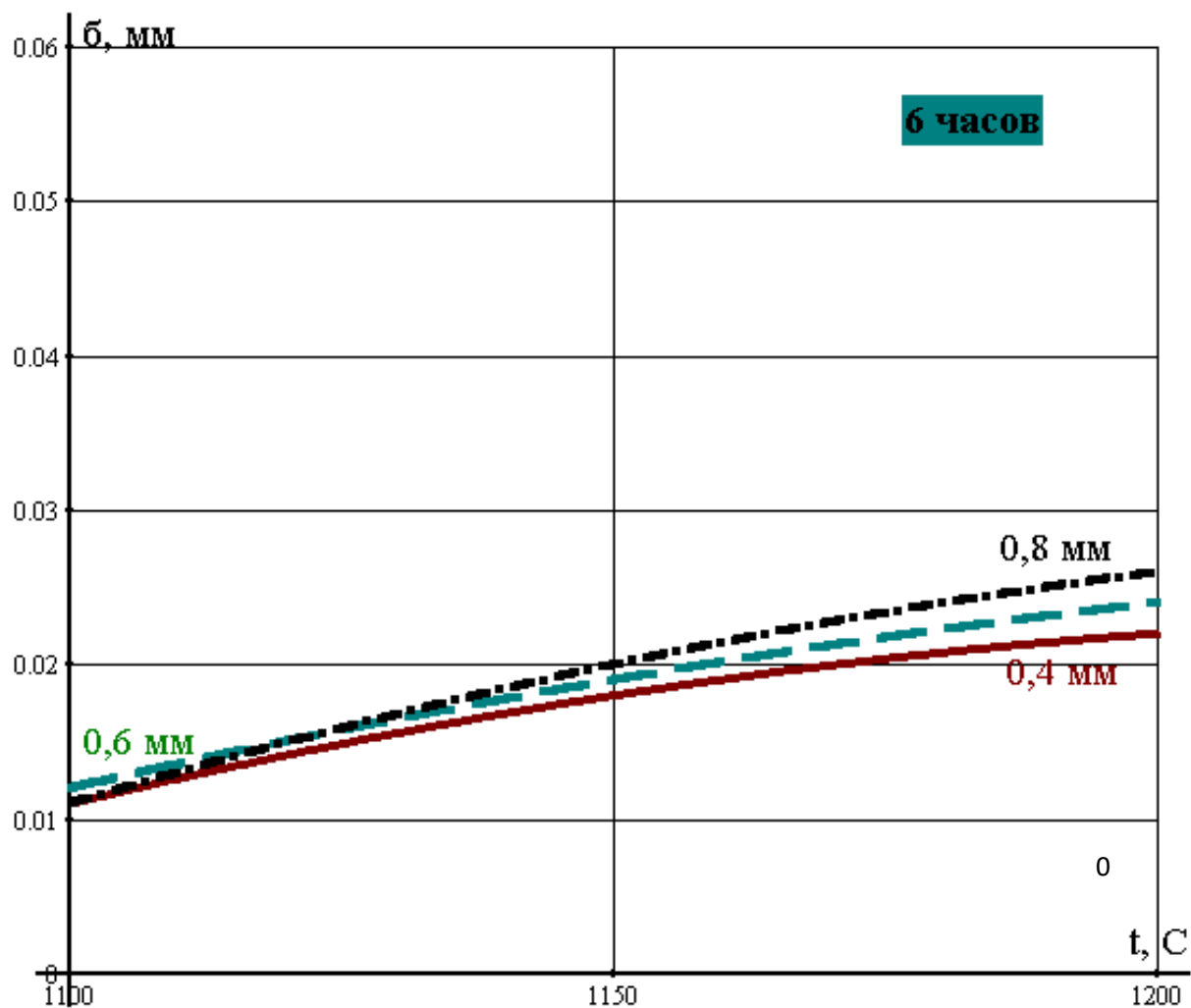


Рисунок 4.12 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 65Г) от температуры диффузионного хромирования и толщины образцов. Продолжительность диффузионного хромирования 6 ч

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$0,4 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00149t - 0,902;$$

$$0,6 \text{ мм} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00104t - 0,648;$$

$$0,8 \text{ мм} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00153t - 0,946.$$

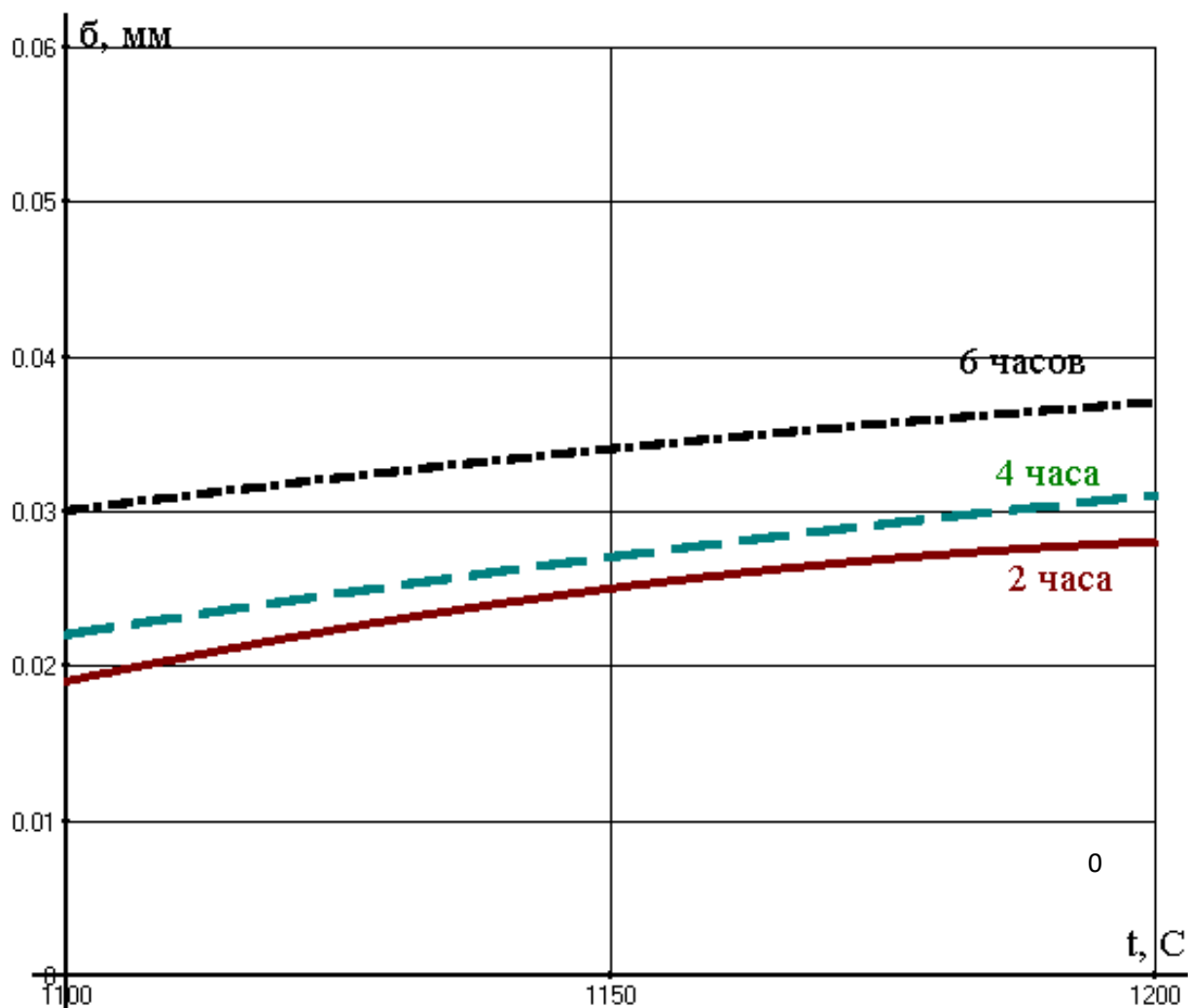


Рисунок 4.13 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь 30ХГСА) от температуры диффузионного хромирования и времени выдержки образцов. Толщина ленты 0,8 мм

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$2 \text{ ч} - \delta(t) = - (6 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00147t - 0,872;$$

$$4 \text{ ч} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,7 \cdot 10^{-4})t - 0,361;$$

$$6 \text{ ч} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,3 \cdot 10^{-4})t - 0,343.$$

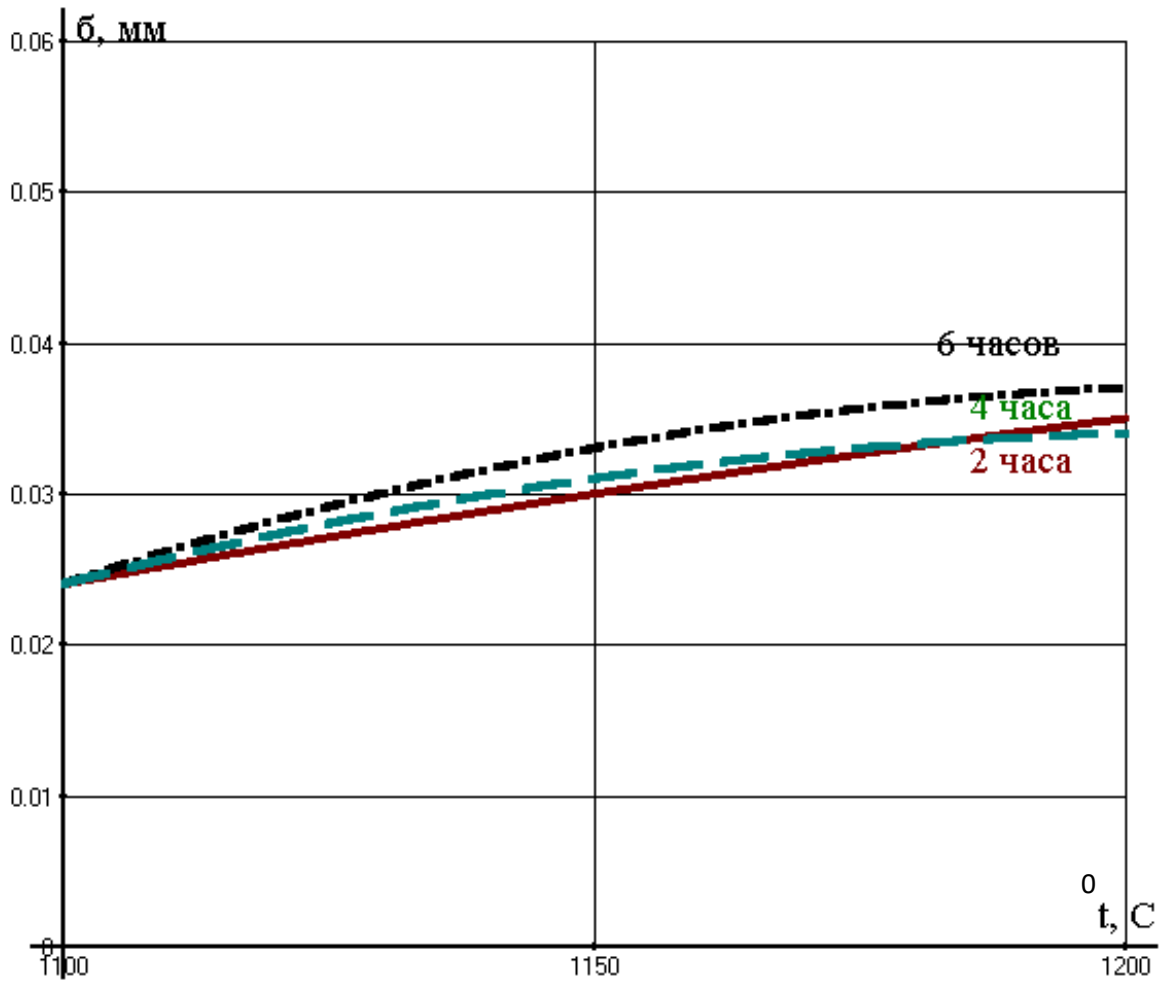


Рисунок 4.14 – Зависимость изменения толщины карбидного слоя на стальной пластине (сталь ХВГ) от температуры диффузионного хромирования и времени выдержки образцов. Толщина ленты 0,8 мм

Уравнения зависимости толщины карбидного слоя от температуры диффузионного хромирования имеют следующие параметры:

$$2 \text{ ч} - \delta(t) = - (2 \cdot 10^{-7})t^2 + (5,7 \cdot 10^{-4})t - 0,361;$$

$$4 \text{ ч} - \delta(t) = - (4 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00102t - 0,614;$$

$$6 \text{ ч} - \delta(t) = - (1 \cdot 10^{-7})t^2 + 0,00243t - 1,439.$$

Приведенные данные показывают, что при температуре 1100°С для углеродистых сталей 45 и У8А толщина диффузионного слоя составляет 0,015–0,019 мм, а для легированных 65Г, 30ХГСА, ХВГ – 0,025–0,030 мм на сторону.

Повышение температуры до 1200°С приводит к росту толщины слоя на углеродистых сталях до 0,025–0,03 мм, для легированных сталей – 0,028–0,039 мм на сторону.

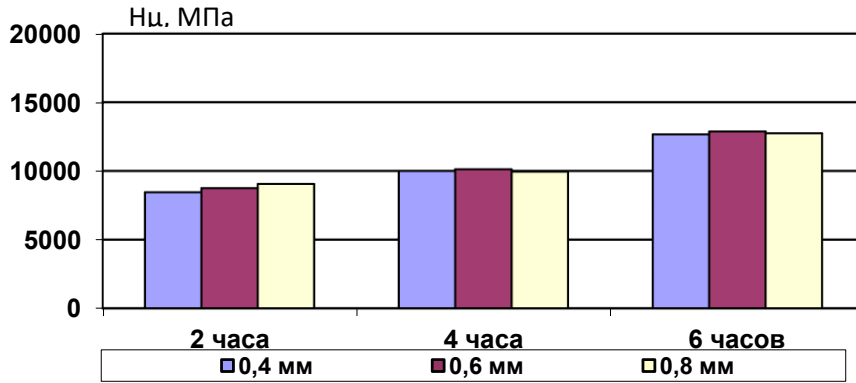
4.1.2 Исследования влияния режимов диффузионного хромирования на микротвердость, твердость и микроструктуру образцов

Эксплуатационные показатели пластин, подвергнутых хромированию в вакууме, определяются структурой и физико-механическими свойствами диффузионных слоев, которые во многом обусловлены такими параметрами насыщения, как температура и продолжительность процесса. Немаловажное значение играет и химический состав насыщаемых сталей. Работоспособность диффузионного покрытия связана прежде всего с его поверхностной твердостью. Она определяет сопротивляемость материала абразивному изнашиванию. В приложении 3 приведены значения микротвердости стальных пластин, полученные диффузионным парофазным хромированием в вакууме, при различных температурах и продолжительности процесса (выдержки). Анализ показал, что микротвердость поверхностного слоя не остается постоянной величиной, а колеблется в некоторых пределах, ввиду анизотропии свойств карбидных фаз и их распределения в диффузионном слое. Однако средняя микротвердость высока, особенно после хромирования при температуре 1200°С, из-за наличия в слое карбидов хрома более высокого порядка, что обусловлено ростом скорости диффузии углерода к поверхности образца, вызванного повышением температуры и наличием вакуума. Результаты измерения микротвердости стальных пластин в зависимости от температуры хромирования показаны в приложении 3.

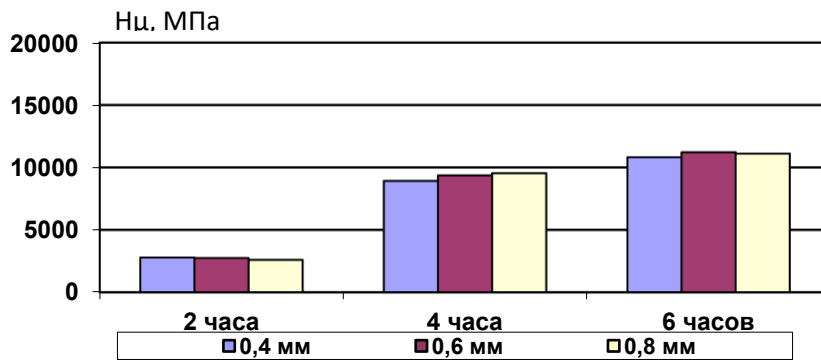
На рисунках 4.15–4.17 представлены диаграммы микротвердости поверхности стальной пластины из сталей 45, У8А, 08кп в зависимости от температуры и времени проведения процесса диффузионного хромирования. На указанных образцах максимальное значение показателя микротвердости поверхности наблюдается при температурах 1100–1150°С при 6-часовой выдержке образцов на режиме хромирования. При температуре 1200°С значение

микротвердости для указанных сталей несколько снижается, это может быть связано с тем, что при данной температуре на сталях толщиной менее 1 мм начинает происходить процесс истощения углерода в сердцевине.

$t = 1100^{\circ}\text{C}$



$t = 1150^{\circ}\text{C}$



$t = 1200^{\circ}\text{C}$

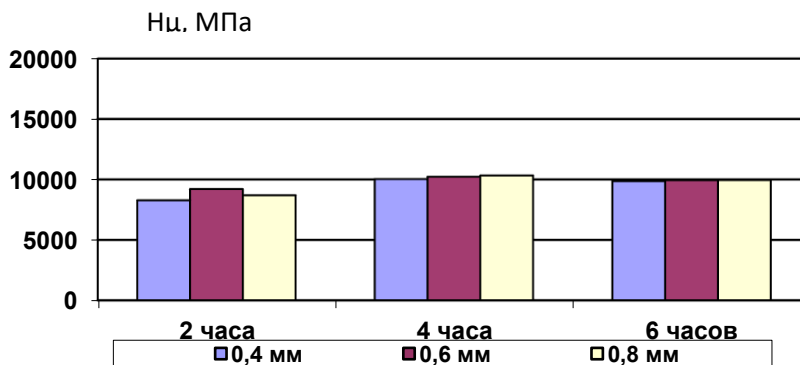
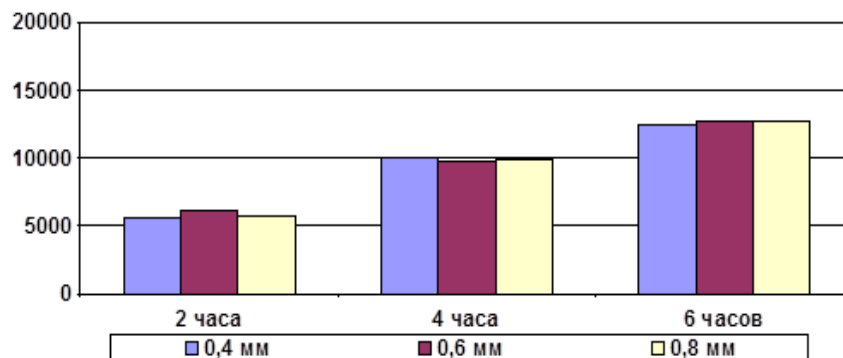


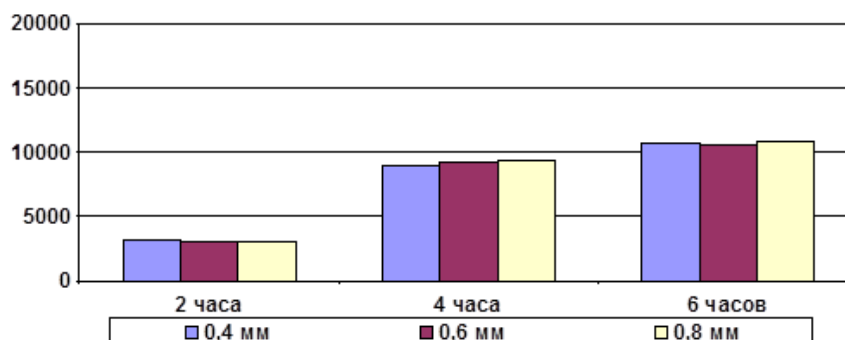
Рисунок 4.15 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 45) от температуры и времени диффузионного хромирования

$t = 1100^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

 $t = 1150^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

 $t = 1200^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

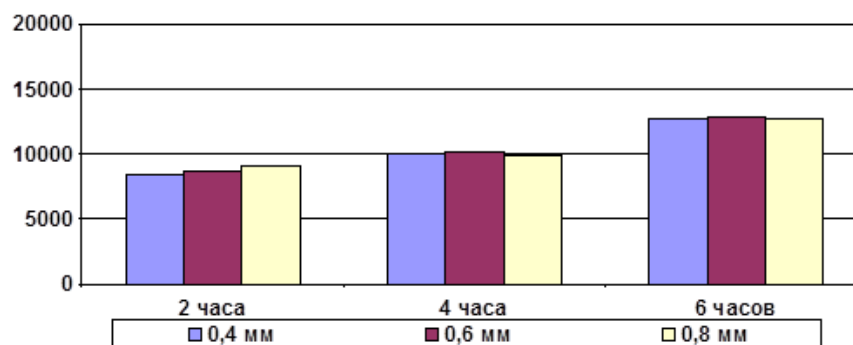
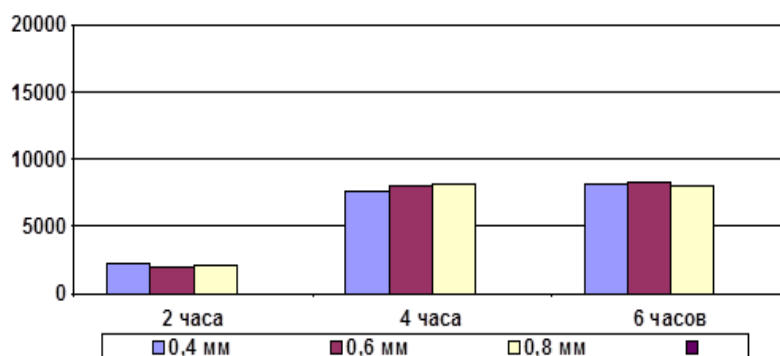


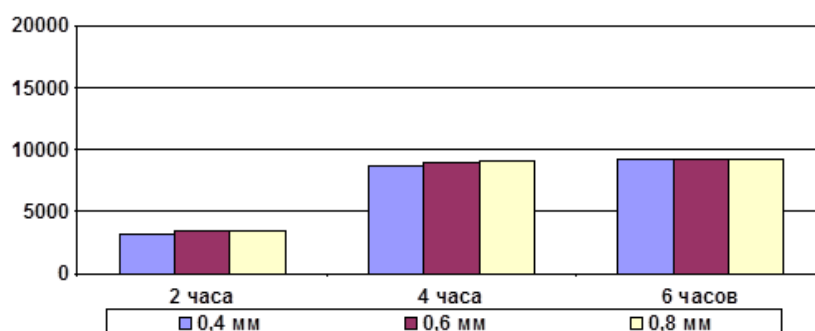
Рисунок 4.16 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине (сталь У8А) от температуры и времени диффузионного хромирования

$t = 1100^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

 $t = 1150^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

 $t = 1200^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

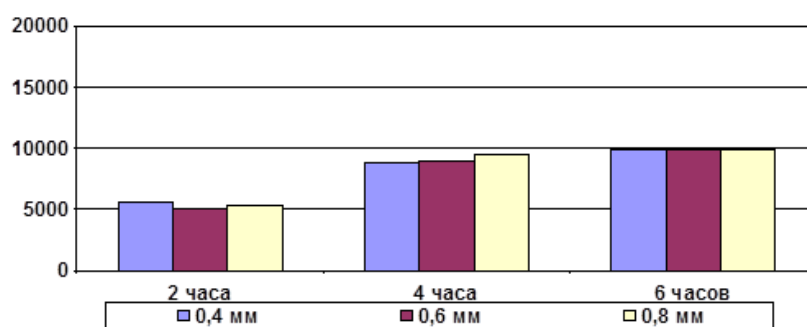
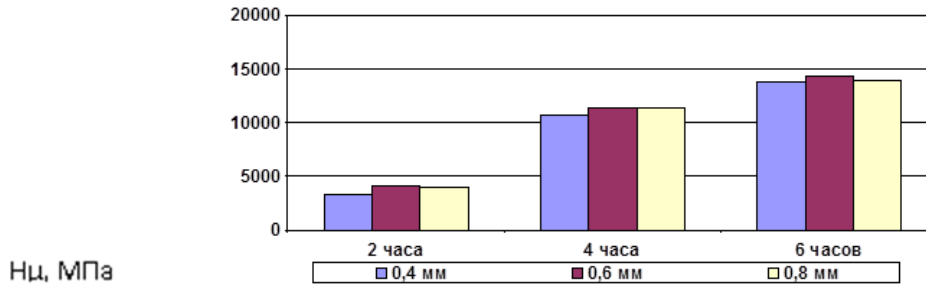


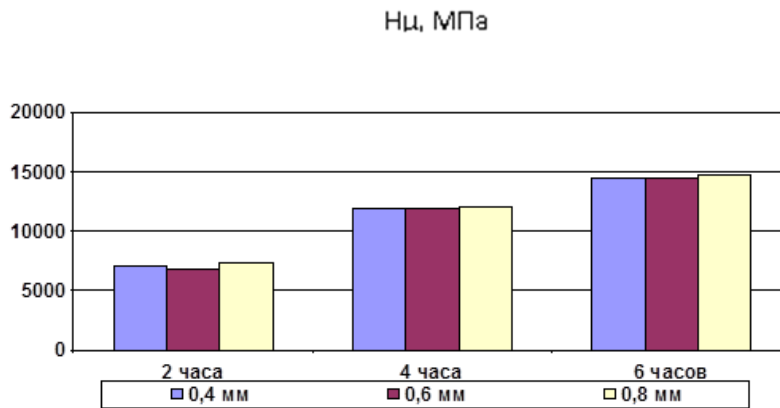
Рисунок 4.17 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 08кп) от температуры и времени диффузионного хромирования

На рисунках 4.18–4.20 представлены значения микротвердости поверхности на сталях 65Г, 30ХГСА, ХВГ. Как видно из рисунков, максимальное значение поверхностной микротвердости получено для этих сталей при температуре 1200°С и времени выдержки 6 ч.

$t = 1100^{\circ}\text{C}$



$t = 1150^{\circ}\text{C}$



$t = 1200^{\circ}\text{C}$

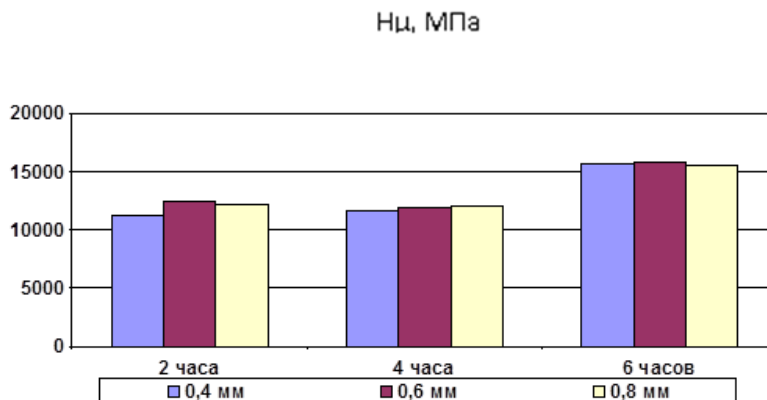
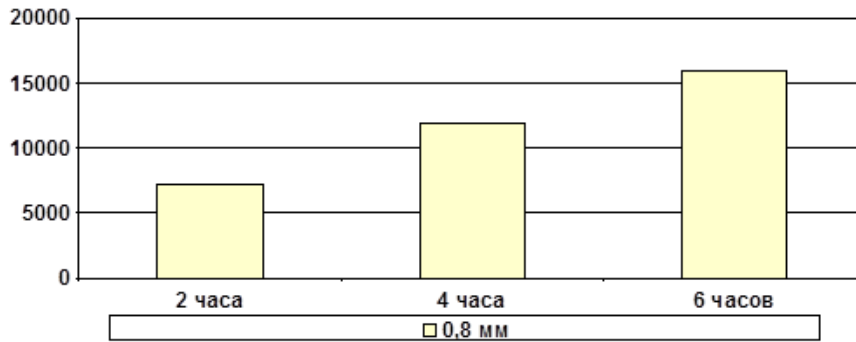


Рисунок 4.18 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 65Г) от температуры и времени диффузионного хромирования

178

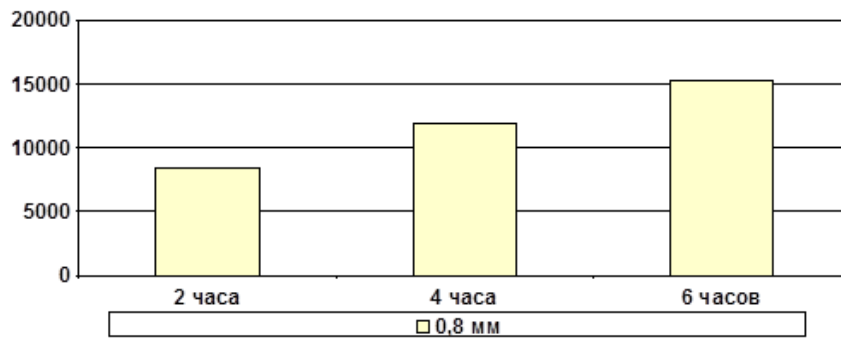
$t = 1100^{\circ}\text{C}$

Hц, МПа



$t = 1150^{\circ}\text{C}$

Hц, МПа



$t = 1200^{\circ}\text{C}$

Hц, МПа

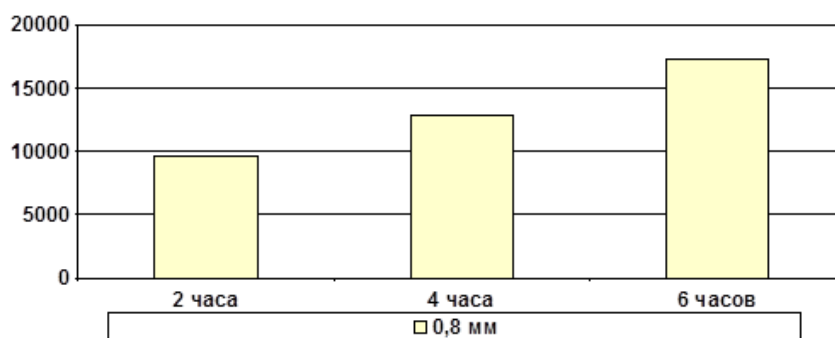
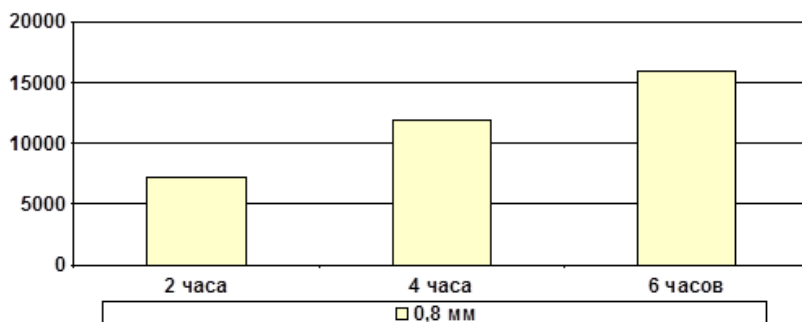


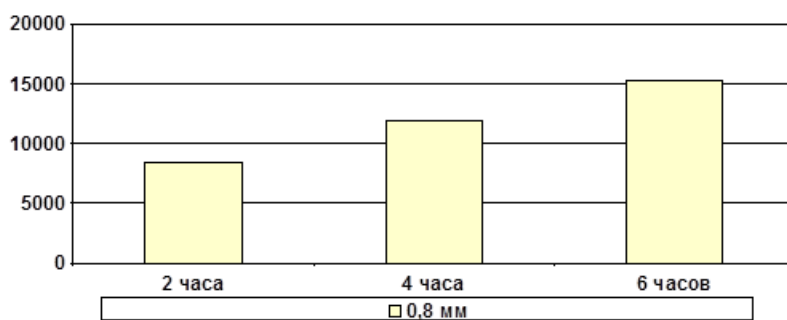
Рисунок 4.19 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине (сталь 30ХГСА) от температуры и времени диффузионного хромирования

$t = 1100^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

 $t = 1150^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

 $t = 1200^{\circ}\text{C}$

Нц, МПа

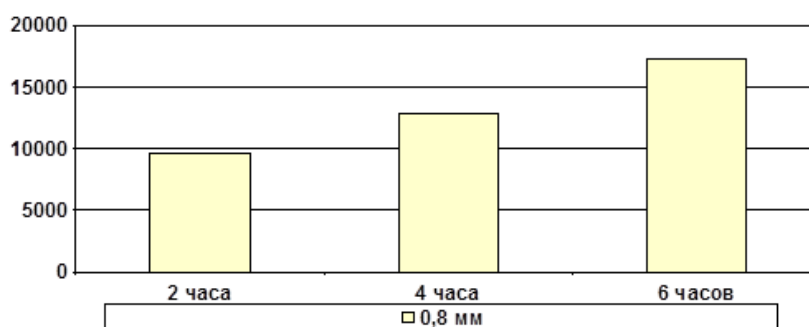


Рисунок 4.20 – Зависимость микротвердости диффузионного слоя на стальной пластине (сталь ХВГ) от температуры и времени диффузионного хромирования

Таким образом, максимальная микротвердость получена на образцах из сталей 65Г, 30ХГСА, ХВГ при температуре 1200°С и продолжительности хромирования 6 ч.

На рисунке 4.21 представлено распределение микротвердости по толщине пластины из стали 45, хромированной при температуре 1200°С и времени выдержки 6 ч.

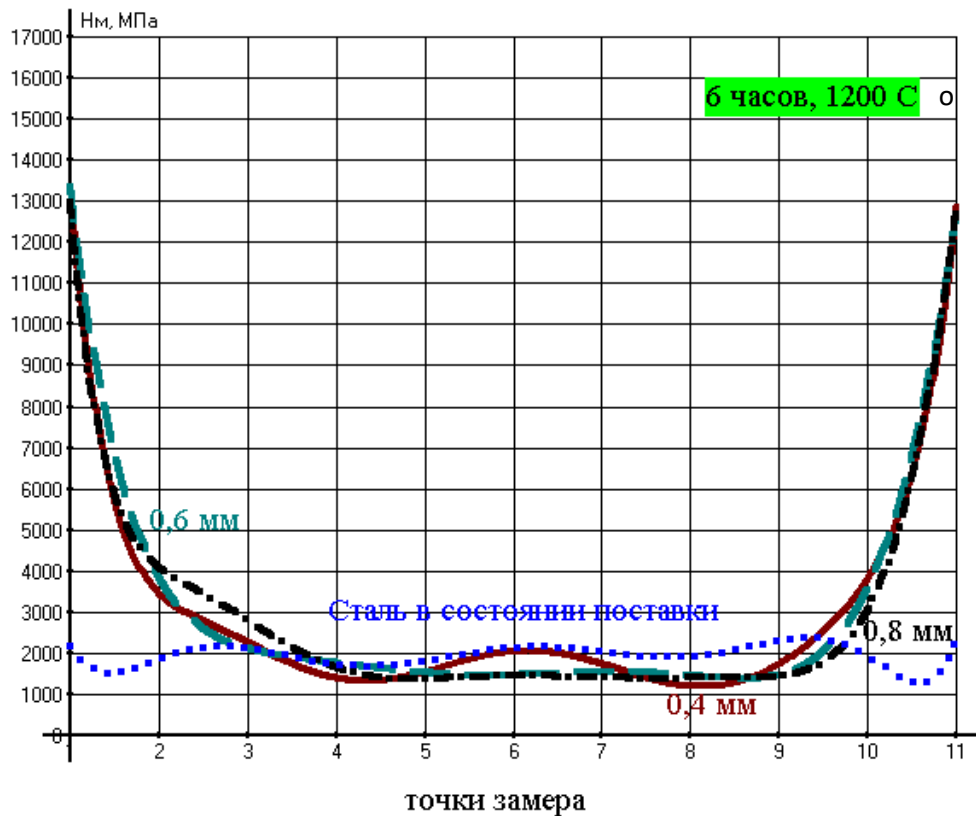


Рисунок 4.21 – Распределение микротвердости стальной пластины из стали 45 (продолжительность диффузионного хромирования 6 ч, температура 1200°С)

Как видно из рисунка 4.22, микротвердость изменяется следующим образом: в первой точке замера она имеет максимальное значение, далее начинает снижаться, проходит зону стабилизации, далее начинает расти. Такое распределение связано со структурными изменениями, происходящими в пластине в результате диффузионной металлизации. Так, в первой точке замера микротвердость максимальна, поскольку именно на поверхности образуется наиболее твердый карбидный слой, далее происходит снижение этого параметра в

связи с тем, что точка замера попадает на зону интерметаллидов, далее следует микротвердость сердцевины. Значение микротвердости сердцевины пластины несколько ниже, чем у пластины, не прошедшей диффузионного хромирования. Это связано с тем, что на поверхности пластины после хромирования образовался карбидный слой и содержание углерода в сердцевине стали несколько снизилось. Таким образом, толщина самой пластины не оказывает существенного влияния на микротвердость покрытия [142].

На рисунке 4.22 представлена микроструктура пластины, изготовленной из стали 45 до диффузионного хромирования (1) и после проведения диффузионной обработки на различных режимах. При этом, как видно из рисунка 4.22, величина зерен сердцевины поверхности до диффузионного хромирования (1) значительно меньше, чем после него (2) и (3). Это связано с негативным влиянием температуры проведения процесса диффузионной металлизации. Однако разница в величине зерна стали при температуре диффузионного хромирования 1200°C и времени выдержки 6 ч (2) и той же температуре процесса, но времени выдержки 2 ч (3) незначительна, но при этом значительно изменяется величина диффузионного слоя, которая больше на образце (2) при 6-часовой выдержке.

Влияние на величину зерна сердцевины стальной пластины оказывает и температура проведения процесса диффузионной металлизации. На рисунке 4.22 представлена микроструктура стальной пластины из стали У8А толщиной 0,6 мм, прошедшая диффузионную металлизацию при времени выдержки 6 ч и температуре проведения процесса диффузионного хромирования 1000°C (1) и 1200°C (2). Как видно из рисунка, величина зерна сильно зависит от температуры проведения процесса диффузионного хромирования [142].

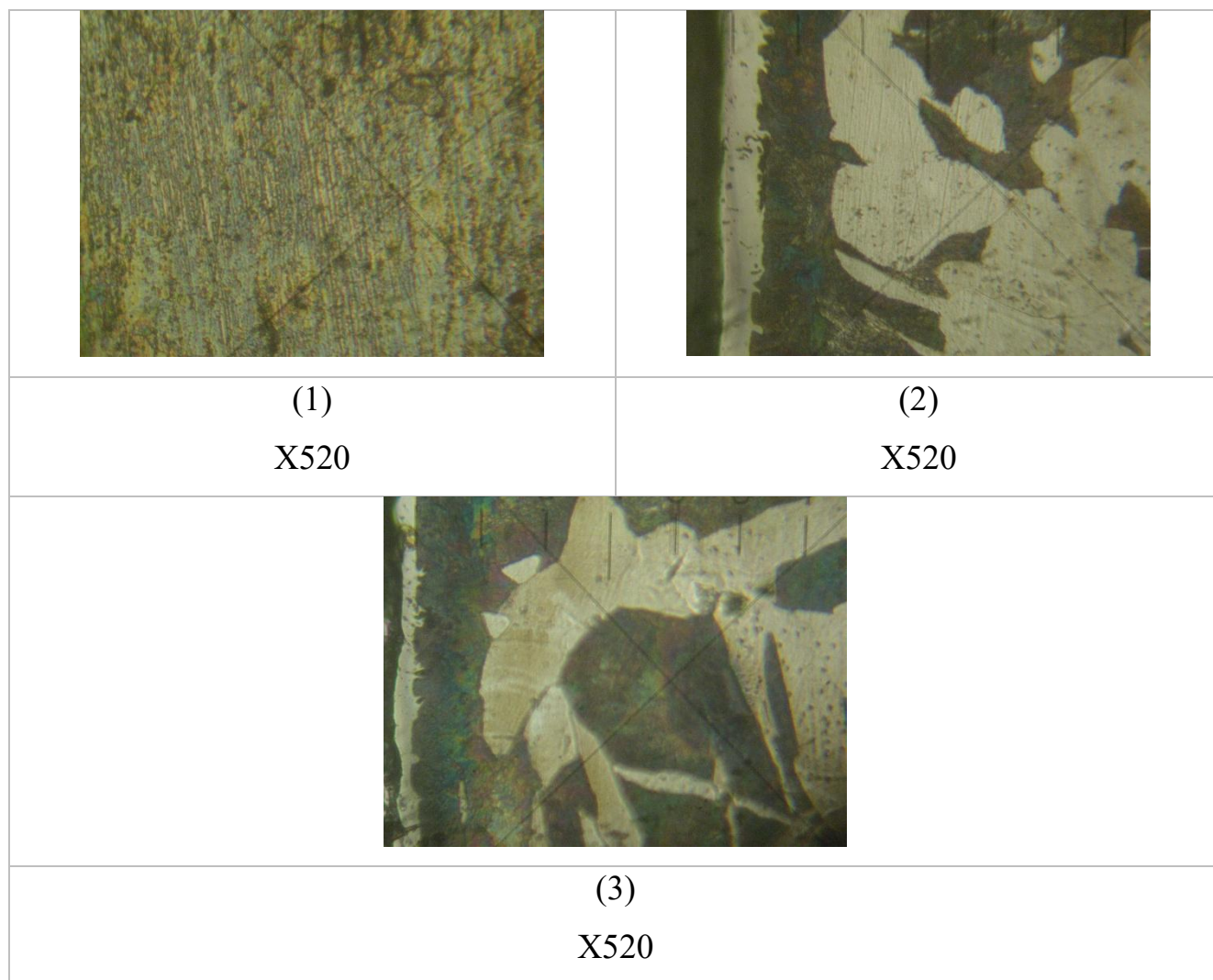


Рисунок 4.22 – Микроструктура стали 45 до и после диффузионного хромирования: (1) – до хромирования; (2) – после хромирования при температуре 1200°С и времени выдержки 6 ч; (3) – после хромирования при температуре 1200°С и времени выдержки 2 ч

Таким образом, режим диффузионного хромирования не оказывает существенного влияния на зернистость сердцевины стальных пластин. Толщина стальной пластины (образца) не оказывает существенного влияния на поверхностную микротвердость.

При диффузионном хромировании твердость стальной пластины несколько снижается, что связано с особенностями ее нагрева и охлаждения. Результаты измерения твердости образцов после диффузионного хромирования показаны в приложении 4.

На рисунках 4.23–4.28 представлены диаграммы зависимости твердости стальных образцов от режимов диффузионного хромирования.

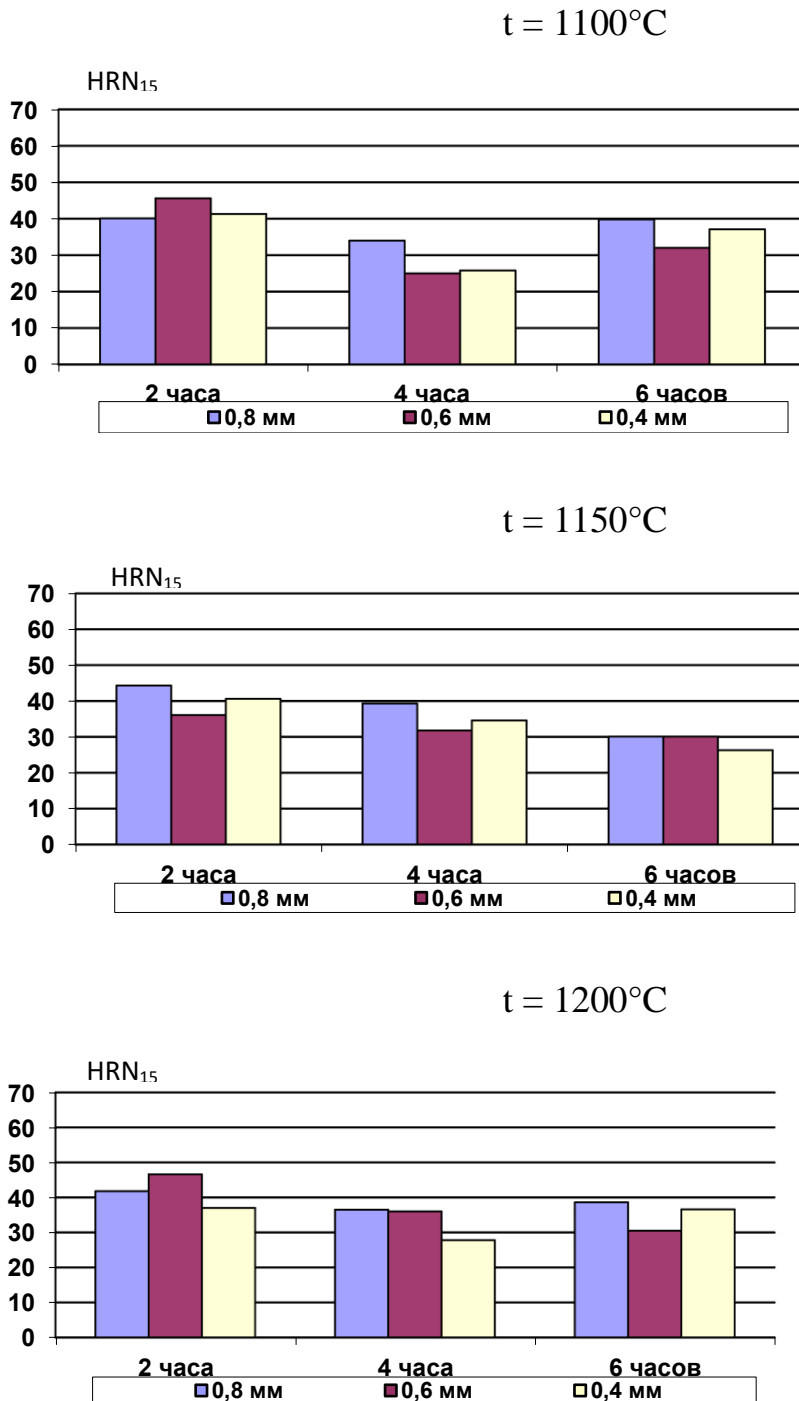


Рисунок 4.23 – Зависимость твердости стальной пластины (сталь 45) от температуры и времени диффузионного хромирования

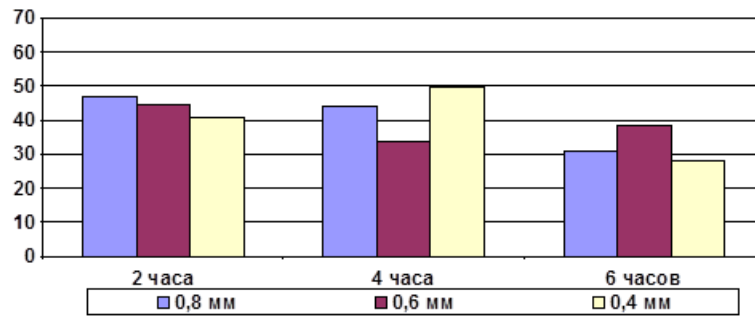
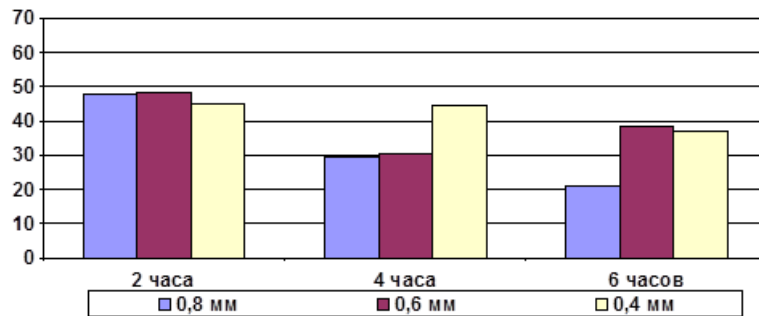
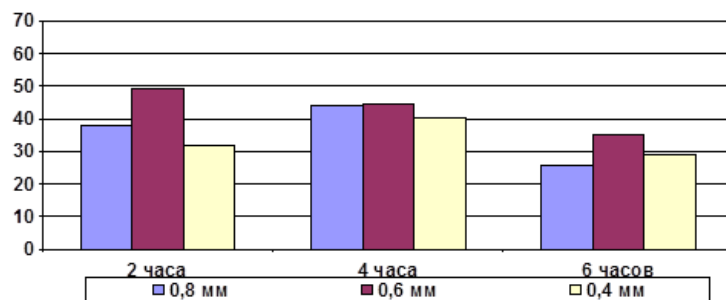
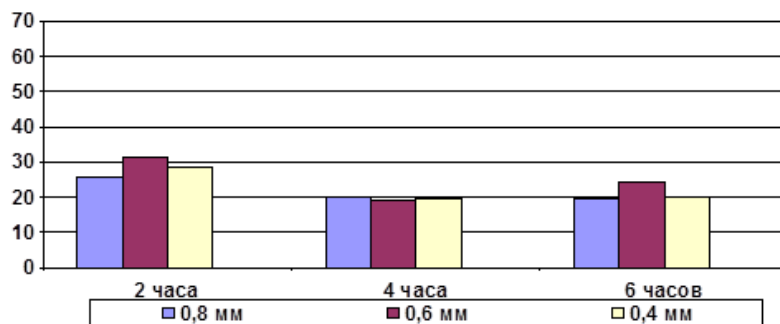
$t = 1100^{\circ}\text{C}$
 HRN_{15}

 $t = 1150^{\circ}\text{C}$
 HRN_{15}

 $t = 1200^{\circ}\text{C}$
 HRN_{15}


Рисунок 4.24 – Зависимость твердости стальной пластины (сталь У8А) от температуры и времени диффузионного хромирования

185

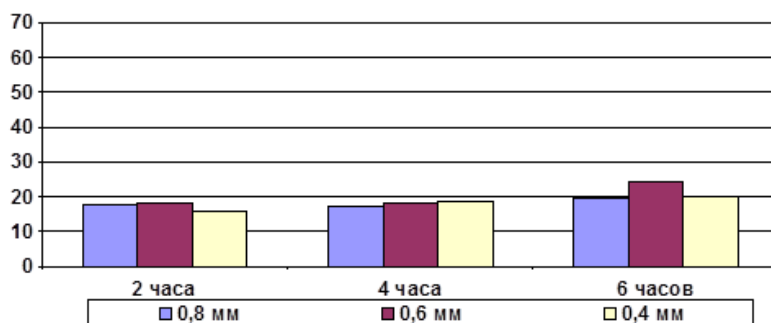
$t = 1100^{\circ}\text{C}$

HRN₁₅



$t = 1150^{\circ}\text{C}$

HRN₁₅



$t = 1200^{\circ}\text{C}$

HRN₁₅

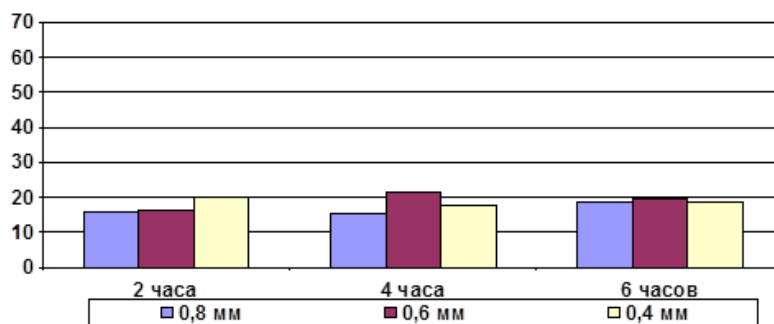


Рисунок 4.25 – Зависимость твердости стальной пластины (сталь 08кп) от температуры и времени диффузионного хромирования

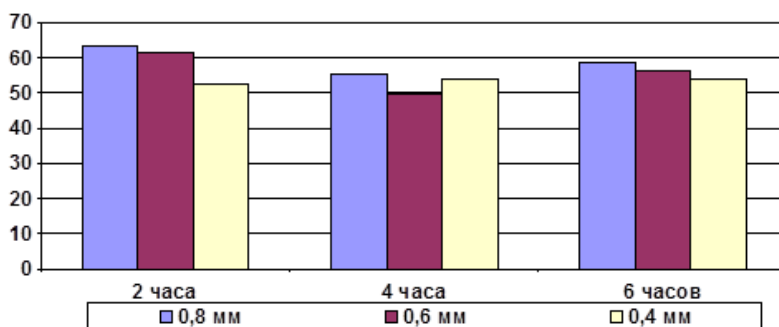
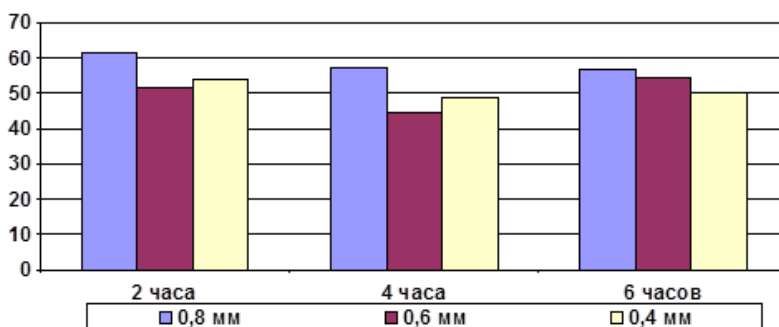
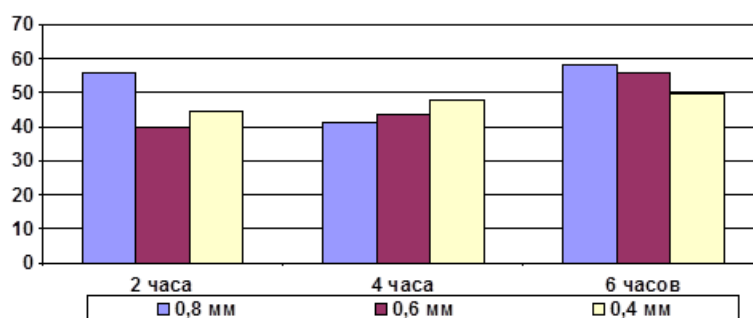
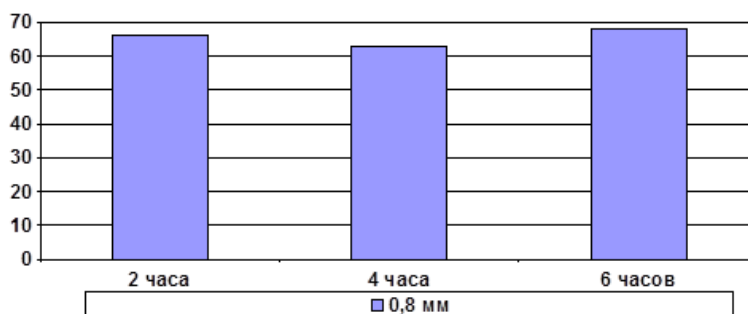
$t = 1100^{\circ}\text{C}$ HRN₁₅ $t = 1150^{\circ}\text{C}$ HRN₁₅ $t = 1200^{\circ}\text{C}$ HRN₁₅

Рисунок 4.26 – Зависимость твердости стальной пластины (сталь 65Г) от температуры и времени диффузионного хромирования

187

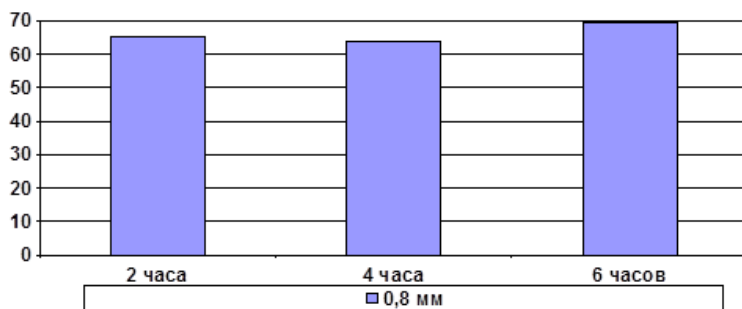
$t = 1100^{\circ}\text{C}$

HRN₁₅



$t = 1150^{\circ}\text{C}$

HRN₁₅



$t = 1200^{\circ}\text{C}$

HRN₁₅

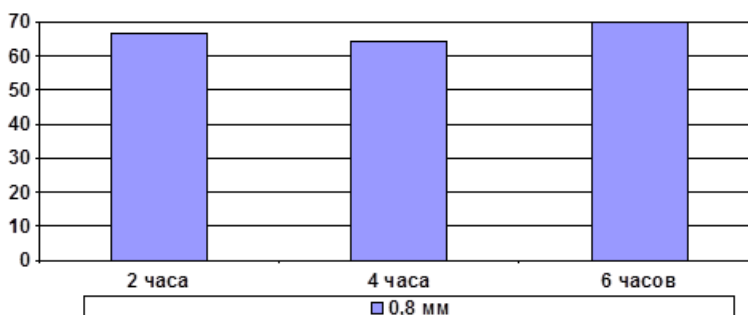
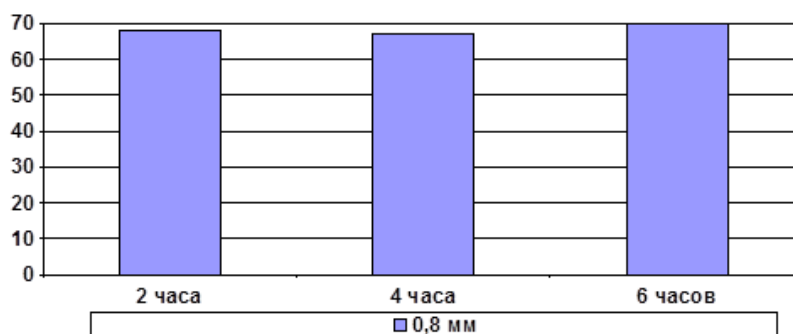


Рисунок 4.27 – Зависимость твердости стальной пластины (сталь 30ХГСА) от температуры и времени диффузионного хромирования

188

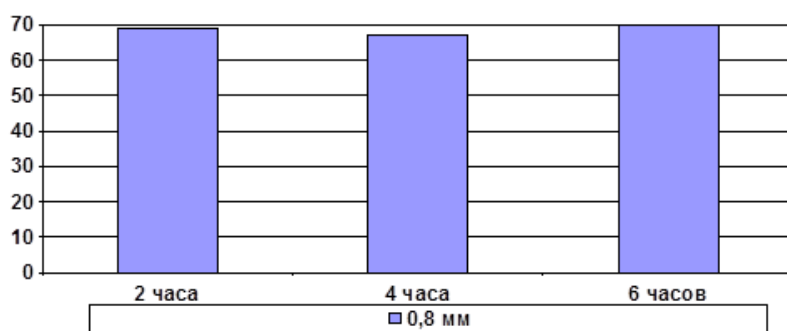
$t = 1100^{\circ}\text{C}$

HRN_{15}



$t = 1150^{\circ}\text{C}$

HRN_{15}



$t = 1200^{\circ}\text{C}$

HRN_{15}

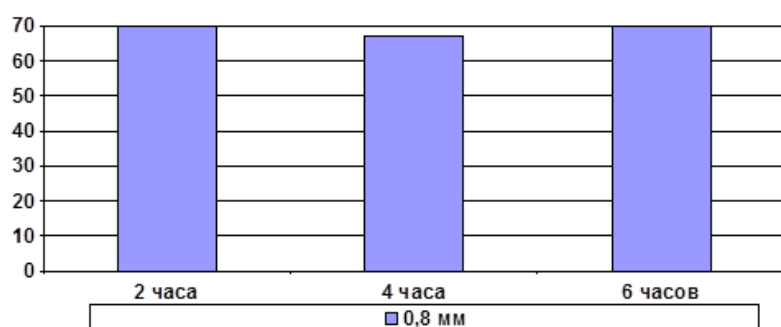


Рисунок 4.28 – Зависимость твердости стальной пластины (сталь ХВГ) от температуры и времени диффузионного хромирования

Анализ результатов измерений показал, что пластины из сталей 45, У8А, 08кп имеют меньшую твердость, чем образцы из сталей 65 Г, 30ХГСА и ХВГ. Максимальное значение показателя твердости поверхности наблюдается на образцах толщиной 0,8 мм при температуре хромирования 1200°С в течение 6 ч.

4.1.3. Выбор оптимального режима диффузионного хромирования компенсирующей пластины

Для получения необходимых физико-механических параметров упрочненной пластины нужно выбрать оптимальный режим диффузионного парофазного хромирования. Исследования по выбору оптимального режима диффузионного парофазного хромирования проведены с использованием методов многофакторного математического планирования экспериментов. Была применена реплика 1/2 – дробности от полного факторного эксперимента 2^3 . Воспользовавшись матрицей планирования многофакторного эксперимента 2^{3-1} , провели 4 опыта.

По предварительным экспериментальным данным, для каждой составляющей режима были найдены: основной уровень, интервал варьирования, верхний и нижний уровни. Для исследований применяли образцы из стали 45. Матрица планирования представлена в таблице 4.3.

Математической моделью является полином первой степени

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (4.1)$$

По результатам экспериментов определены коэффициенты и получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 8653,1 - 846x_1 + 3264,5x_2 + 1971,85x_3. \quad (4.2)$$

По величине и знаку коэффициентов уравнения регрессии можно оценить влияние каждого фактора на параметр оптимизации. В данном случае наибольшее влияние на микротвердость поверхности оказывает время выдержки образца при заданной температуре, в меньшей мере – толщина образца. Коэффициенты при x_2 , x_3 указывают на то, что для увеличения параметра оптимизации необходимо увеличивать время и температуру хромирования. Далее был проведен

математический анализ полученных результатов с использованием методик [142, 171, 173].

Таблица 4.3 – Матрица планирования 2^{3-1} , уровни факторов и интервалы варьирования

	Толщина образца, мм	Время выдержки, ч	Температура хромирования, t° , С	Микротвердость поверхности, H_{μ} , МПа
Основной уровень	0,6	4	1150	
Верхний уровень	0,8	6	1200	
Нижний уровень	0,4	2	1100	
Интервал варьирования	0,2	2	50	
Кодированное значение факторов	x_1	x_2	x_3	y_1
номер опыта:				
1 +	+	+	+	13020,6
2 +	-	-	+	8183,6
3 +	+	-	-	2593,6
4 +	-	+	-	10814,6
$b_0 = 8653,1$	-846	3264,5	1971,85	

Оценка дисперсии производится по формуле

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2, \quad (4.3)$$

где n – число опытов в каждой точке факторного пространства, $n = 5$;

y – результат испытаний в каждом опыте;

\bar{y} – среднее значение опыта.

Среднее квадратическое отклонение определялось по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{n-1}}. \quad (4.4)$$

Расчет дисперсий приведен в таблице.

Проверка однородности дисперсий производилась с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2}, \quad (4.5)$$

где S_{\max}^2 и S_{\min}^2 – соответственно максимальное и минимальное значение дисперсий.

$$F = \frac{727625,8}{23047,3} = 31,57.$$

Если выполняется условие $F < F_T$, то дисперсии считаются однородными. По таблице [171] для значений $f_1 = 2$ и $f_2 = 4$ ($p = 0,975$) критерий Фишера составляет $F_T = 39,25$, что больше расчетного, следовательно, условие однородности выполняется.

Дисперсия эксперимента равна:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}, \quad (4.6)$$

где N – число опытов.

$$S_{(y)}^2 = \frac{1249639,4}{4} = 312409,85.$$

Проверка гипотезы об адекватности модели проводилась также с помощью критерия Фишера (таблица 4.4):

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{(y)}^2}, \quad (4.7)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности.

Таблица 4.4 – Расчет дисперсий

№ опыта	y_i	\bar{y}	Δy	Δy^2	$\sum_{i=1}^n \Delta y^2$	S^2	S
1	2	3	4	5	6	7	8
1	13820	13020,6	799,4	639040,36	2910503,2	727625,8	853
	13120		99,4	9880,36			
	11871		1149,6	1321580,1			
	12472		548,6	300961,96			
	13820		799,4	639040,36			
2	7982	8183,6	201,6	40642,56	366069,2	91517,3	302,5
	8661		477,4	227910,76			
	7982		201,6	40642,56			
	7982		201,6	40642,56			
	8311		127,4	16230,76			
3	2762	2593,6	168,4	28358,56	92189,2	23047,3	151,81
	2409		184,6	34077,16			
	2463		130,6	17056,36			
	2698		104,4	10899,36			
	2636		42,4	1797,76			
4	11871	10814,6	1056,4	1115980,9	1629796	407449	638,31
	10308		506,4	256440,96			
	10793		21,6	466,56			
	10793		21,6	466,56			
	10308		506,4	256440,96			

Дисперсия адекватности определяется по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (4.8)$$

где f – число степеней свободы, равное разности между числом опытов и числом коэффициентов, вычисленных по результатам этих опытов;

\hat{y}_i – расчетная величина параметров оптимизации;

$\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$ – остаточная сумма квадратов.

В таблице 4.5 приведен расчет остаточной суммы квадратов.

Таблица 4.5 – Расчет остаточной суммы квадратов

№ опыта	\bar{y}	\hat{y}_i	$\bar{y}_i - \hat{y}_i$	$(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$
1	13020,6	13043,45	22,85	522,12
2	8183,6	8206,45	22,85	522,12
3	2593,6	2570,75	22,85	522,12
4	10814,6	10791,75	22,85	522,12
				2088,48

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{2088,48}{2} = 1044,24.$$

$$F = \frac{1044,24}{315046,12} = 0,0034.$$

Для $f_1 = 2$ и $f_2 = 4$ ($p = 0,975$) критерий Фишера составляет $F_T = 39,25$. Так как $F < F_T$, то модель адекватна (пригодна).

Значимость коэффициентов регрессии определялась с помощью критерия Стьюдента:

$$t = \frac{|b_i|}{S(b_i)}, \quad (4.9)$$

где b_i – коэффициенты уравнения регрессии;

$S(b_i)$ – квадратическая ошибка коэффициента уравнения регрессии.

Квадратическая ошибка определялась по формуле

$$S(b_i) = \sqrt{\frac{S^2_{(y)}}{N}}; \quad (4.10)$$

$$S(b_i) = \sqrt{\frac{312409,85}{4}} = 279,46$$

При $N = 4$ табличное значение t – критерия Стьюдента равно 2,776.

Коэффициенты незначимы при условии:

$$t = \frac{|b_i|}{S(b_i)} > t_{\text{таб}} \quad (4.11)$$

В полученном уравнении регрессии все коэффициенты значимые, так как минимальная величина t для коэффициента b_i больше значения $t_{\text{таб}}$

$$t = \frac{846}{280,64}.$$

Значимость коэффициентов уравнения указывает на то, что при выбранных интервалах варьирования факторы оказывают влияние на параметр оптимизации. В результате проведенного анализа установлено, что функция симметрична относительно коэффициентов (коэффициенты различаются не существенно), все коэффициенты значимые, модель адекватна. В связи с этим было принято решение продолжать поиск оптимального режима способом крутого восхождения по градиенту. В результате исследований установлено, что толщина образцов оказывает меньшее значение на микротвердость поверхности, чем время выдержки и температура процесса. В связи с этим в дальнейших исследованиях значение первого фактора было принято равным нулю. В таблице 4.6 приведен расчет шагов движения по факторам.

Таблица 4.6 – Определение шагов движения факторов

	x_1	x_2	x_3
$b_i \cdot J$	–	3264,5	1971,85
Шаг при изменении	–	2	50
Округление	–	2	50

Расчет сводится к тому, чтобы выбрать шаг движения по одному из факторов и пропорционально произведениям коэффициентов регрессии на интервалы варьирования рассчитать шаги по другим факторам. Крутое восхождение по градиенту позволило получить оптимальное значение твердости в 9-м опыте. Дальнейшее увеличение продолжительности хромирования и температуры процесса не приводит к увеличению микротвердости поверхности или ведет к ее снижению. Вызвано это тем, что происходит выгорание углерода в образцах.

Таким образом, максимальное значение микротвердости хромированной стальной пластины толщиной 0,6 мм получается при температуре процесса 1200°C и продолжительности хромирования 6 ч. На полученных оптимальных режимах проводили диффузионное хромирование стальных пластин толщиной 4 и 10 мм. Установлено, что с увеличением толщины образца величина диффузионного слоя увеличивается. Изменение величины диффузионного слоя в зависимости от толщины образцов после диффузионного хромирования при температуре 1200°C и времени выдержки 6 ч показано в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Изменение величины диффузионного слоя в зависимости от толщины образцов после диффузионного хромирования при температуре 1200°C и времени выдержки 6 ч

Марка стали	Толщина, мм		Толщина, мм		Толщина, мм	
	образца	диффузионного слоя	образца	диффузионного слоя	образца	диффузионного слоя
45	0,4	0,025	4	0,031	10	0,038
У8А	0,6	0,028	4	0,036	10	0,046
ХВГ	0,8	0,038	4	0,045	10	0,055

Установлено, что с увеличением толщины образца величина диффузионного слоя увеличивается. Для образца из стали ХВГ толщиной 0,8 и 10 мм она составляет соответственно 0,038 и 0,055 мм.

Изменение микротвердости в зависимости от толщины образцов после диффузионного хромирования при температуре 1200°C и времени выдержки 6 ч показано в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Изменение микротвердости в зависимости от толщины образцов после диффузионного хромирования при температуре 1200°C и времени выдержки 6 ч

Марка стали	Толщина образца, мм	Микротвердость, МПа
45	0,6	12100
У8А	0,6	13100
ХВГ	0,6	18000
45	4	12950
У8А	4	14300
ХВГ	4	24000
45	10	13200
У8А	10	18200
ХВГ	10	28000

Установлено, что с увеличением толщины образца с 0,6 мм до 10 мм микротвердость изменяется значительно. На рисунке 4.29 представлена диаграмма распределения микротвердости стальной пластины ХВГ по толщине образца.

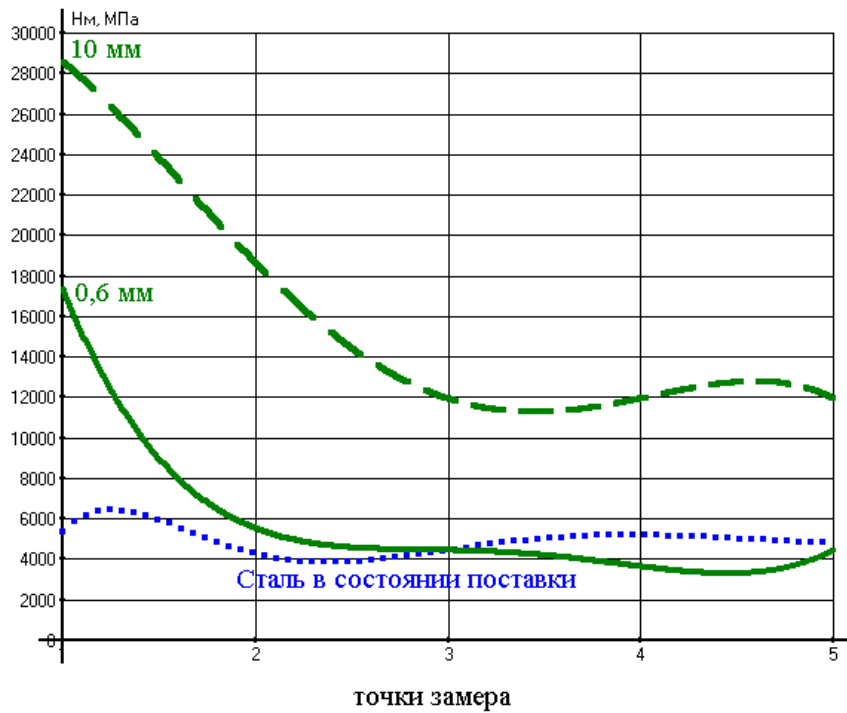


Рисунок 4.29 – Распределение микротвердости на стали ХВГ в зависимости от толщины образца. Режим диффузионного хромирования: температура – 1200°С, время выдержки – 6 ч

Из рисунка 4.29 видно, что при толщине образца 10 мм из стали ХВГ микротвердость его поверхности составила около 28000 МПа, а при толщине 0,6 мм – 18000 МПа.

4.1.4. Результаты ускоренных износных испытаний пластин с хромовыми покрытиями

Испытания стальных пластин на износостойкость проводили на установке абразивного изнашивания с помощью резинового ролика при нагрузке $P_H = 20$ Н и частоте его вращения $n_p = 72$ мин⁻¹. Испытания проводили в течение 30 мин. Испытаниям подвергались образцы из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм после диффузионного хромирования в вакууме при температуре 1200°С и времени выдержки 6 ч. В качестве эталона использовалась сталь 45. В качестве изнашивающей среды во всех случаях использовали электрокорунд белый марки 25А зернистостью 80–100 мкм. Изнашивание образцов определяли по

потере массы за время испытаний. Результаты испытаний образцов толщиной 0,6 мм на износостойкость представлены на рисунке 4.30.

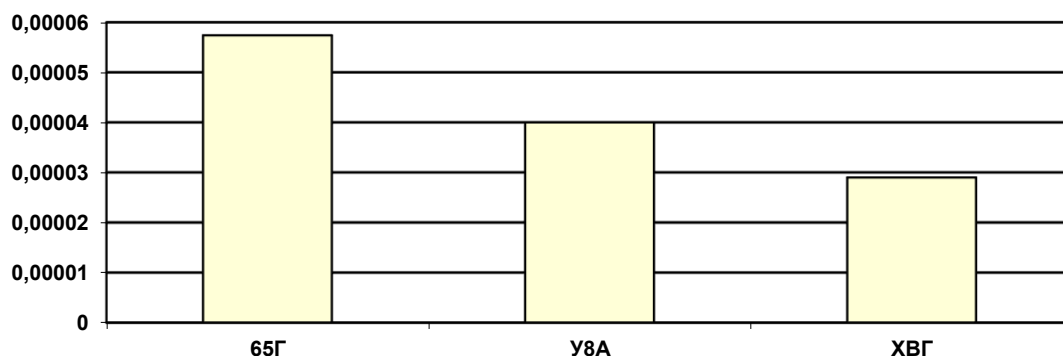


Рисунок 4.30 – Скорость изнашивания стальных пластин толщиной 0,6 мм после диффузионного хромирования, г/мин

Установлено, что износостойкость пластин из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 после диффузионного хромирования в 2–3 раза выше износостойкости образца закаленной стали 45. При этом скорость изнашивания образцов, прошедших диффузионную металлизацию, составила: для стали У8А – $4 \cdot 10^{-5}$ г/мин, для стали 65Г – $5,74 \cdot 10^{-5}$ г/мин, для стали ХВГ – $2,9 \cdot 10^{-5}$ г/мин. Таким образом, наилучшие показатели износостойкости получены при испытаниях образцов, изготовленных из стали ХВГ.

Результаты испытаний образцов толщиной 4 мм на износостойкость представлены на рисунке 4.31.

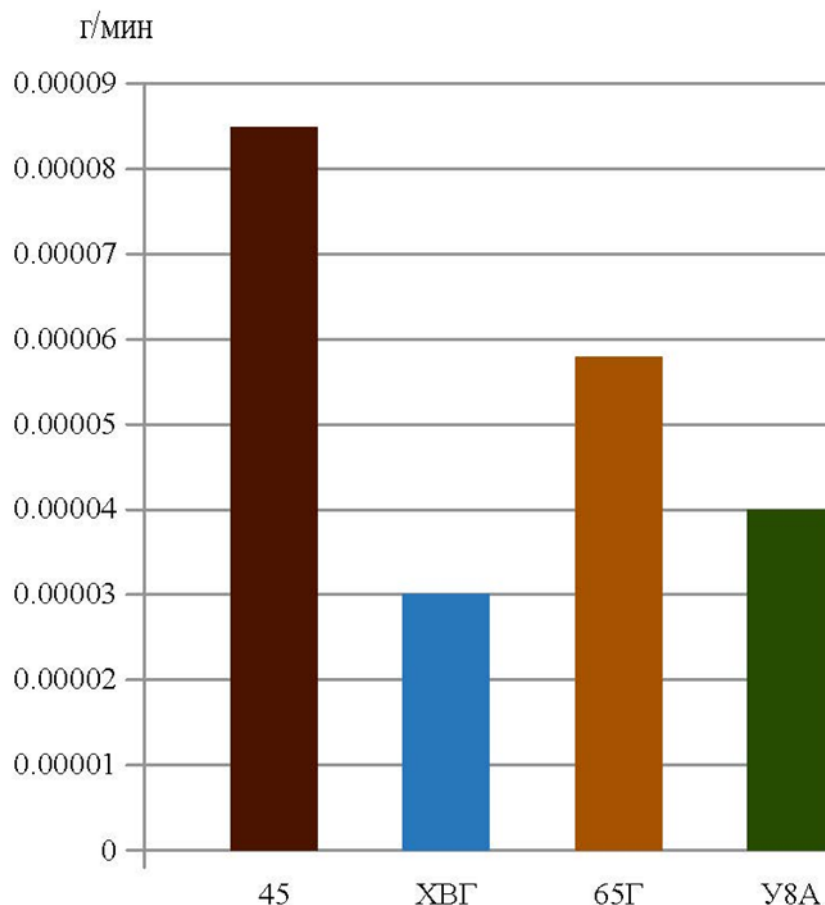


Рисунок 4.31 – Скорость изнашивания стальных пластин толщиной 4 мм после диффузионного хромирования, г/мин

Установлено, что наилучшие показатели износостойкости при испытаниях имеют хромированные образцы толщиной 4 мм из стали ХВГ. Скорость их изнашивания составила $3,0 \cdot 10^{-5}$ г/мин.

На указанной установке проводили также испытания образцов из стали 45 толщиной 10 мм после контактной приварки к ним пластин из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм, после диффузионного хромирования при температуре 1200°C и времени выдержки 6 ч. Пластины приваривалась к образцам подложки при силе сварочного тока 5 кА, длительности импульса 0,4 с, длительности паузы между отдельными импульсами 0,2 с, скорости приварки $v = 1,0$ м/мин.

Установлено, что износостойкость образцов после контактной приварки к ним стальных пластин У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм, прошедших

диффузионное хромирование, в 2–3 раза выше износостойкости образца из закаленной стали 45. При этом наибольшую износостойкость имеют образцы с приваренной хромированной пластиной из стали ХВГ.

4.2. Результаты исследования напряженного состояния конструкции культиватора и прочностного расчета восстановленной лапы

Разработанная в рамках настоящих исследований в системе Inventor Pro конструкция рабочего оборудования лапового культиватора представляет собой агрегат, предназначенный для сплошной обработки почвы в период предпосевной подготовки ее верхнего слоя со срезкой и удалением сорняков (рисунок 4.32).

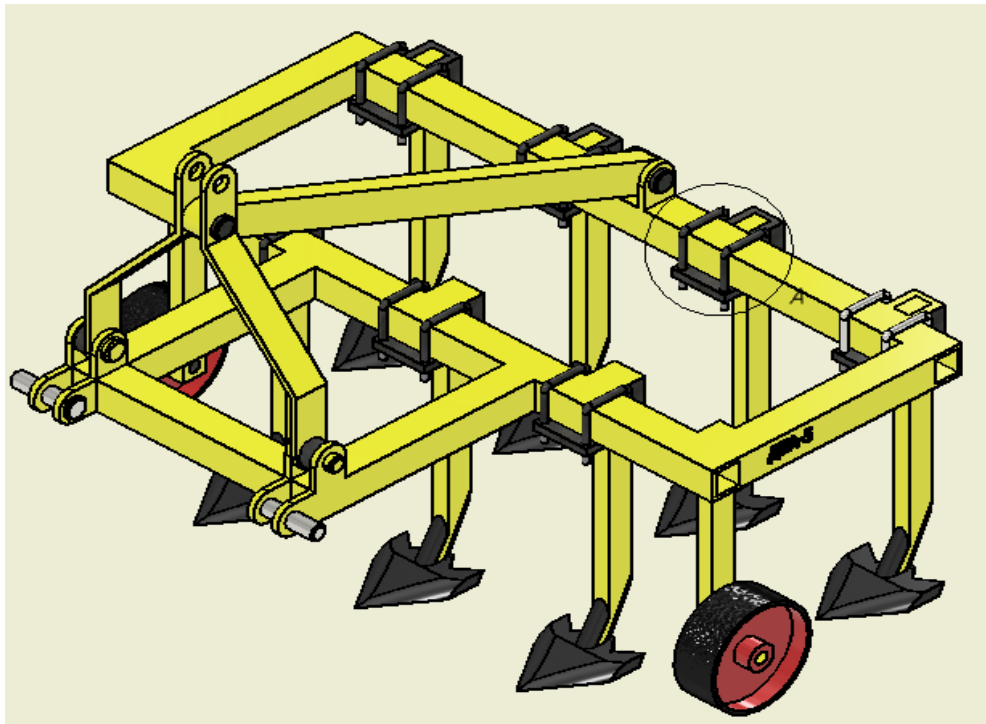


Рисунок 4.32 – Общий вид рабочего оборудования культиватора, разработанного в системе Inventor Pro

На рисунке 4.33 представлен чертеж рабочего оборудования культиватора.

достигать нескольких десятков, можно утверждать о возникновении больших тяговых сопротивлений при их эксплуатации. Соответственно, оптимальная конфигурация каждой конструкции лап позволит обеспечить снижение расхода топлива, уменьшение износа деталей и повышение долговечности. Наиболее частым напряженным состоянием лапы культиватора является изгиб и сжатие. Поэтому задача состоит в обеспечении достаточного запаса прочности по данным видам нагружения. Однако обеспечение достаточного запаса прочности не позволяет полностью исключать такое явление, как износ режущей кромки лапы культиватора. Проведенный нами микрометраж стрелчатых лап культиваторов, используемых на опытных полях РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева и некоторых сельскохозяйственных организациях Московской области, показал, что у лап отдельных культиваторов (КШУ-12Н, КПС-4) при наработке 20 га наблюдалось затупление режущей кромки, а при наработке 35 га средний износ носка лап составлял 0,015 мм, максимальный износ крыльев – 0,01 мм. Отмечено, что наибольшей интенсивностью изнашивания характеризуется именно носок лапы. Динамика износа стрелчатой лапы культиватора показана на рисунке 4.34.

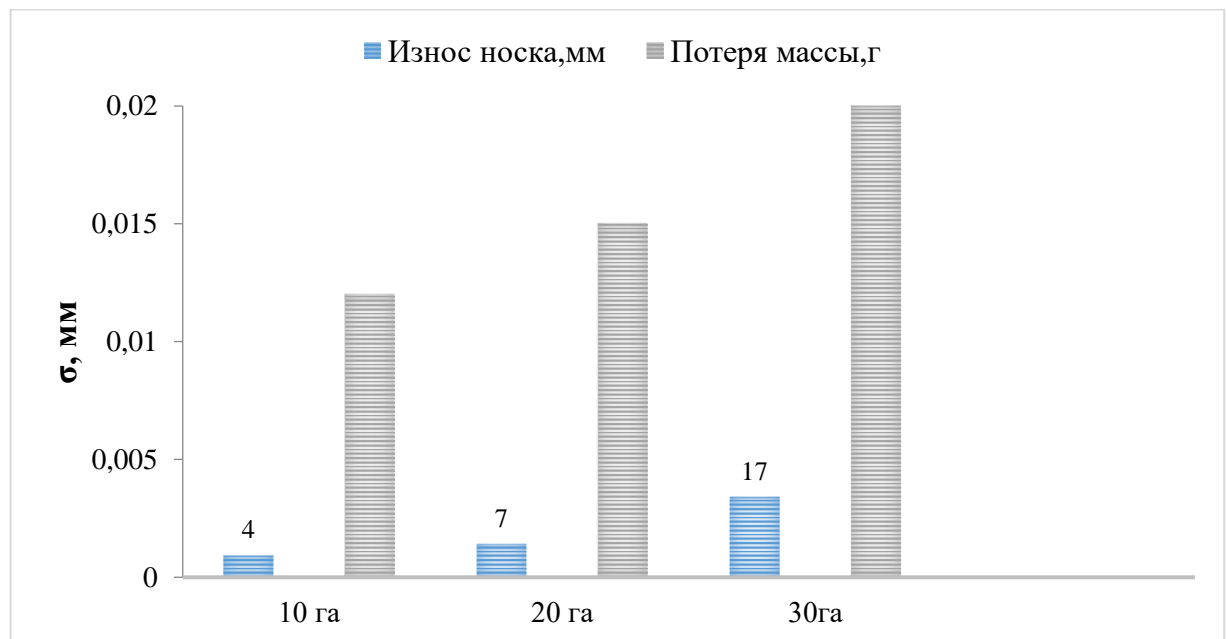


Рисунок 4.34 – Динамика износа стрелчатой лапы культиватора

В случае превышения действующих напряжений допустимого диапазона проводится уточненный прочностной расчет. Он заключается в исследовании с предварительным уменьшением размеров конечных элементов, что позволяет получать более точные результаты по коэффициентам запаса прочности. Прочностной расчет лапы культиватора, выполненный нами методом конечных элементов в системе Inventor Pro, показал, что наибольшие напряжения стрелчатой лапы культиватора под нагрузкой сконцентрированы в местах соединения элемента крепления конструкции с рабочей поверхностью. Установлено, что наиболее напряженным состоянием стрелчатой лапы культиватора являются изгиб и сжатие. Анализ результатов испытаний культиваторов на машиноиспытательных станциях подтвердил достоверность выполненных нами расчетов (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Дефекты стрелчатых лап при испытаниях культиваторов

Марка культиватора	Деталь	Наименование дефекта	Наработка до отказа, ч
КПП-6	Стойка лапы	Излом	86
КСОП-10	Стойка лапы	Излом	133
КСОП-12	Стойка лапы	Излом	123
КПСР-8Г	Стойка лапы	Изгиб	94

Уточненный расчет заключается в дополнительном исследовании конструкции после проведенного по ней прочностного расчета методом конечных элементов (приложение 5). При проведении предварительного расчета максимальные размеры конечных элементов в системе Inventor Pro по умолчанию принимаются равными 0,1 мм. Если коэффициент запаса прочности оказался при этом равным 1,51, то при уточненном прочностном расчете эти размеры уменьшаются, т.е. формируется конечно-элементная сетка с меньшими размерами ячеек, что в итоге дает более точный результат. Более того, можно оценить

изменение коэффициента запаса прочности при уменьшении размеров конечных элементов – тетраэдров в диапазоне от 0,12 до 0,06 с шагом 0,02 единицы. При этом исследование прочности конструкции проводится для пяти возможных случаев с размерами конечных элементов 0,12; 0,10; 0,08 и 0,06 мм. Следует также отметить, что при уточненном расчете не меняются размеры и материал конструкции, точки приложения и величина нагрузок остаются такими же, как и при предварительных расчетах. Изменяются только лишь размеры конечных элементов. На рисунке 4.35 представлены кривые изменения коэффициента запаса прочности в зависимости от размеров конечных элементов.

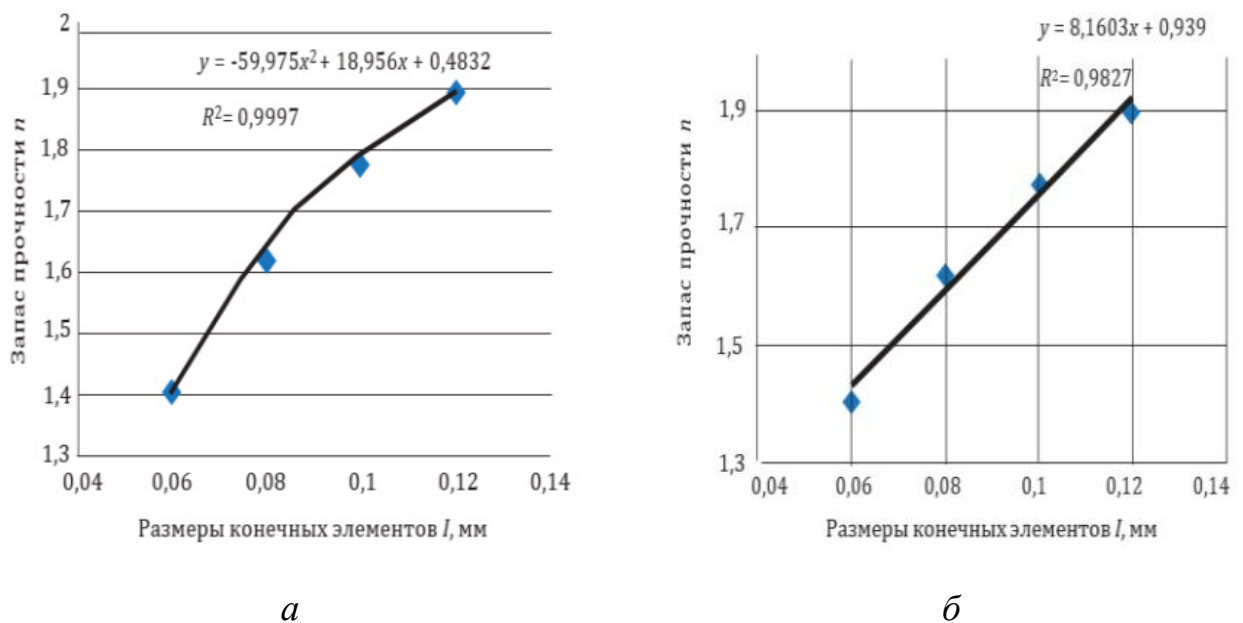


Рисунок 4.35 – Значения коэффициента запаса прочности по результатам расчета в системе Inventor Pro: а – зависимость коэффициента запаса прочности от размеров конечных элементов в полиномиальной аппроксимации; б – зависимость коэффициента запаса прочности от размеров конечных элементов в линейной аппроксимации

Более адекватное описание зависимости коэффициента запаса прочности наблюдается при полиномиальной аппроксимации с коэффициентом детерминации, равным $R^2 = 0,9997$. Исследование подтверждает получение точных результатов по прочности при разбивке конечно-элементной сетки на более мелкие

ячейки. С другой стороны, такое решение требует больших ресурсов вычислительной машины. Впрочем, уточненный расчет можно проводить не только по всей конструкции или детали, но и по наиболее ответственным и нагруженным ее частям. Кроме модуля анализа напряженного состояния графический пакет Inventor Pro содержит генератор форм, позволяющий оптимизировать конструкцию с точки зрения экономии металла. Работа генератора форм аналогична уточненному расчету, но при заданных нагрузках, опорных зависимостях и материале создает конструкцию меньшей металлоемкости, при этом сохраняя те части рабочего органа, которые участвуют в технологическом процессе. На рисунке 4.36 представлен результат оптимизации разработанной конструкции лапы культиватора.

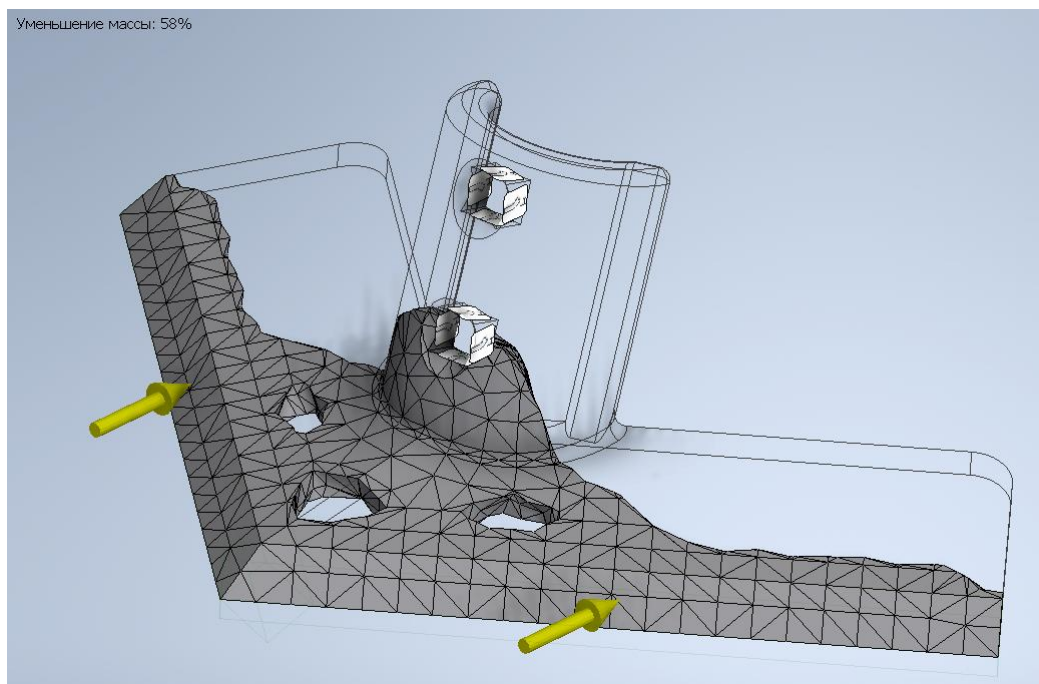


Рисунок 4.36 – Оптимизация конструкции лапы культиватора с помощью модуля генератора форм

Сохранение участков детали, участвующих в технологическом процессе разработки почвы, а также участков соединения рабочего органа с основной рамой достигается исключением данной области из процесса создания формы. Выбор областей на модели, для которых не требуется выполнять процесс создания новой

формы, осуществляется в форме прямоугольника, призмы или цилиндра. При задании генератора форм указывается целевая масса и задается разрешение сети. Задание целевого значения для относительного уменьшения массы исходной детали, а также выбор оптимальной плотности сетки позволяет получить более точный результат. Все это указывает на то, что при более высокой плотности конечных элементов получаемая форма детали будет более точной. Генератор форм для разработки концепций выполнения 3D-элемента на основе заданного сочетания нагрузок, которого можно активировать и использовать в качестве основы при предварительном концептуальном проектировании облегченной детали. Для проверки уровней напряжения в этом случае требуется выполнить отдельный анализ напряженного состояния.

Оптимизационное решение в исследовании лапы культиватора позволило уменьшить массу разработанной конструкции на 58%. Исследовано множество конструкций лап культиватора, которые были в эксплуатации в сельскохозяйственных организациях различных регионов России в течение нескольких сезонов. При подробном рассмотрении моделей лап культиватора с большим сроком эксплуатации наблюдалась повторяющаяся закономерность, заключающаяся в повышенном износе передней режущей кромки. Для абсолютного большинства лап культиватора, использованных в реальных эксплуатационных условиях, характер деформаций и износа был близок к представленному на рисунке образцу рабочего органа, явно прослеживается износ передней режущей кромки, форма которой близка к овальной в отличие от первоначальной формы острой угловатой режущей кромки (рисунок 4.37). Для исследования этого явления была смоделирована схема нагружения моделей лапы культиватора в компьютерных программах Inventor Pro и «Компас» [158, 159, 180, 181].



Рисунок 4.37 – Деформация и износ режущей кромки лапы культиватора в процессе эксплуатации в полевых условиях

Модель лапы культиватора с действующими нагрузками и опорными зависимостями показана на рисунке 4.38.

☐ **Выбранные грани**

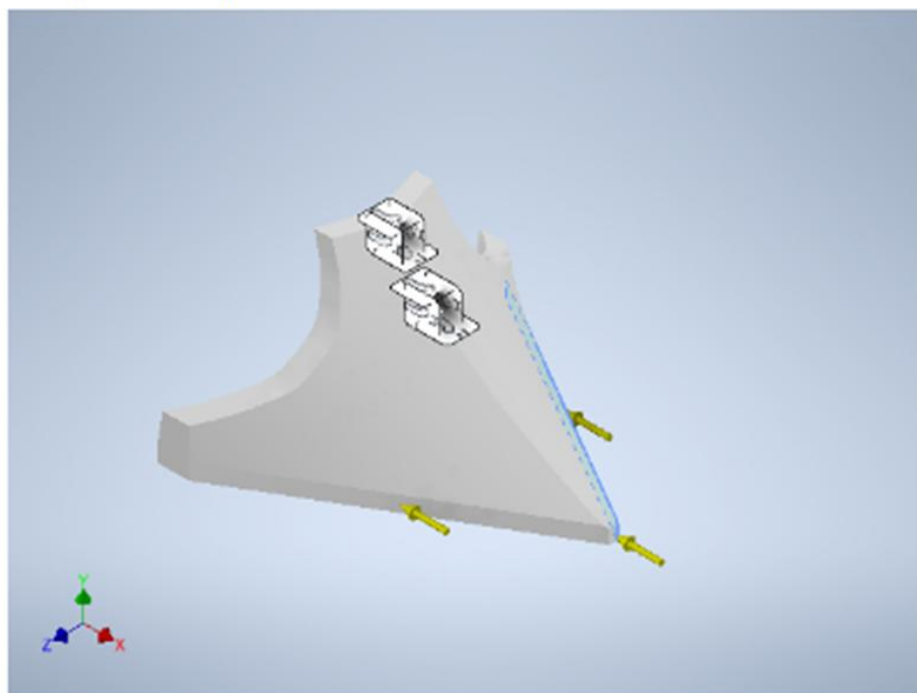


Рисунок 4.38 – Модель лапы культиватора с опорными зависимостями и действующими нагрузками на передней и боковых режущих кромках

При исследовании было получено множество результатов по тем или иным напряжениям с различными эпюрами. Максимально близкий к реальным моделям с износом результат получен при исследовании смещений по оси Y, который можно рассматривать как фактор, связанный с износом (рисунок 4.39).

☐ Смещение по оси Y

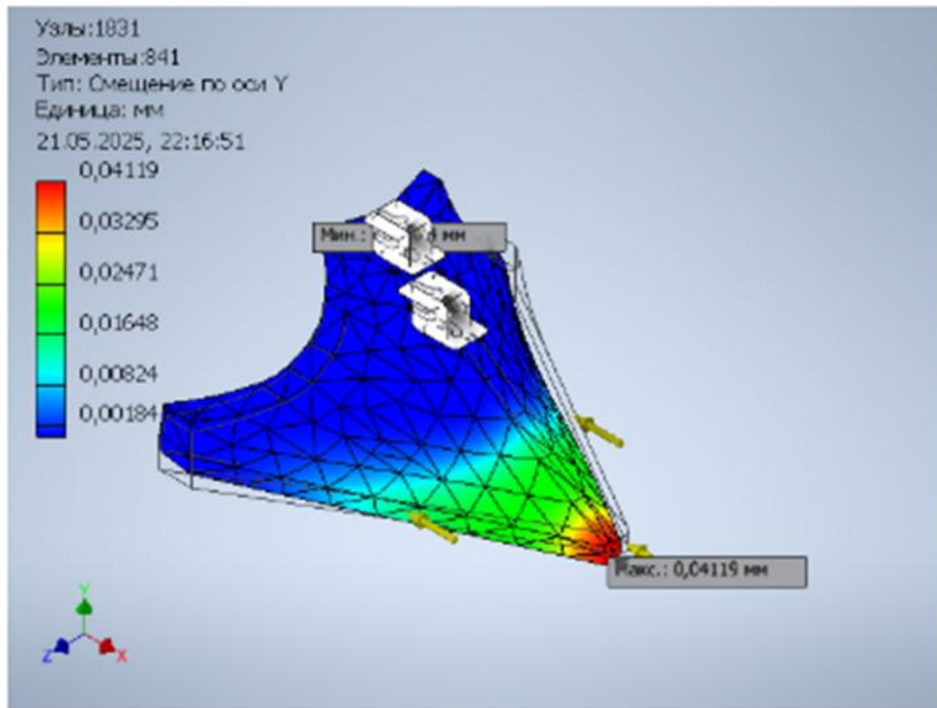


Рисунок 4.39 – Максимальное смещение в конструкции лапы культиватора, связанное с износом, приходится на ее переднюю кромку

Результат расчета показал, что коэффициент запаса прочности для данной модели равен 2,5 единицы. Наибольшие напряжения наблюдаются на режущей кромке модели и в местах ее крепления к раме культиватора. Значения коэффициента запаса прочности для принятой модели лапы культиватора равен 1,99 (приложение 6).

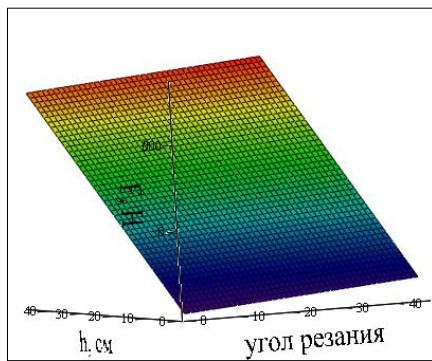
Таким образом, установлено, что наибольшие напряжения при работе культиватора наблюдаются на режущей кромке модели и в местах ее крепления к раме культиватора. Коэффициент запаса прочности для лапы культиватора должен быть не ниже 1,99.

4.3. Влияние параметров восстановленной лапы культиватора на энергетические и технологические показатели процесса рыхления

По результатам экспериментов было получено уравнение регрессии, в котором представлена функциональная зависимость тягового усилия F , угла резания стрелчатой лапы α , углов заострения β и глубины обработки h в натуральном выражении факторов [182]:

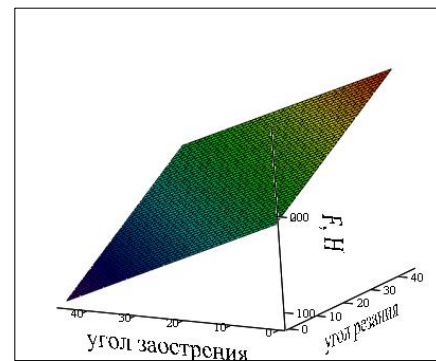
$$F = -189 + 2,33\alpha + 2,27\beta + 27\gamma.$$

Полученное уравнение регрессии позволило построить поверхности отклика, отражающие зависимость тягового сопротивления от влияния динамических факторов (рисунок 4.40).



М

а



М

б

Рисунок 4.40 – Зависимость тягового сопротивления: а – от углов заострения и резания; б – от глубины и угла резания

Анализ уравнения показал, что наибольшее влияние на величину тягового усилия оказывает глубина обработки, равной степени угол резания и заострения рабочего органа культиватора. Пласт, отделяемый лапой, перемещается под силовым воздействием по её наклонным поверхностям, установленным с определённым углом резания, поднимается вверх. В обе стороны от продольной оси лапы при этом происходят подъём и разрушение почвы в зоне действия лапы. Разрушение массива почвы сопровождается появлением на поверхности трещин, подъёмом его в форме фрагмента конуса, что приводит к крошению грунта на агрегаты различного размера. Перед рабочим органом на поверхности образуется

выпуклая вверх раковина, нижняя плоскость которой ограничена кривой, по форме близкой к параболе (рисунок. 4.41). Длина распространения деформации $L_{\text{деф}}$ в виде раковины перед рабочим органом составляла 1,5–2,3 см при глубине рыхления $h = 15$ см, а при $h = 10$ см – 1,8–3,3.

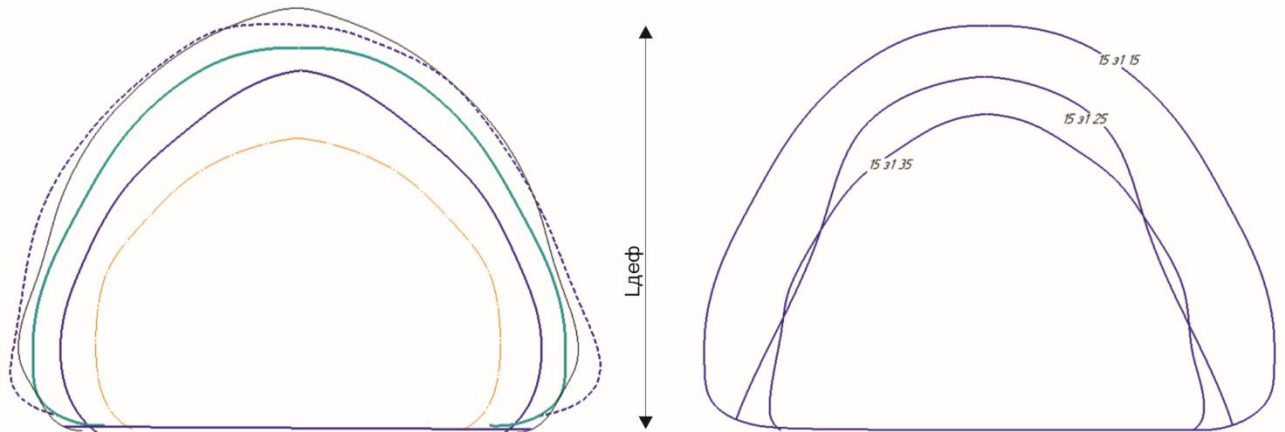


Рисунок 4.41 – Форма деформации грунта перед рабочим органом: а – кривые, ограничивающие зону деформации грунта для лап с разными углами заострения β – от меньшего к большему при угле резания $\alpha = 15^\circ$; б – характер деформации перед лапами с разными углами α при угле $\beta = 14^\circ$

Высота подъёма грунта h_2 составляла $0,75h$, а после прохода рабочего органа почва опускалась на поверхность, образуя полосу разрыхлённого (вспученного) грунта высотой h_1 , составляющую от глубины $0,38h$.

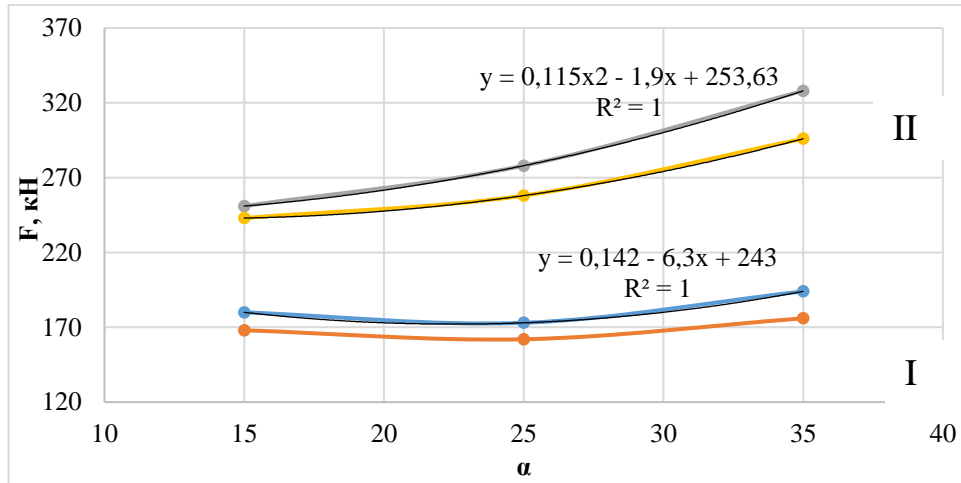
Продольные разрезы зоны рыхления показали, что разрушение массива в процессе деформации возникает от режущей кромки лемеха, затем распространяется вперёд и вверх с более интенсивным подъёмом по криволинейной траектории вверх к поверхности грунта, соединяясь с параболической кривой, ограничивающей сегмент призмы грунта над исходной поверхностью. Средние значения технологических и энергетических показателей приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Технологические и энергетические параметры процесса рыхления, полученные в результате статистической обработки данных

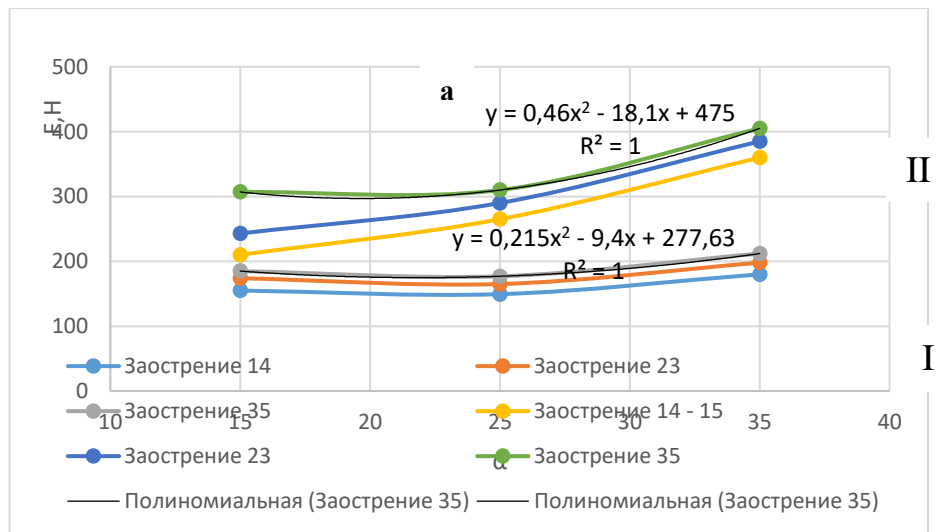
Угловые параметры		Средние значения измеряемых параметров при глубине обработки $h = 10$ и 15 см									
		h_2 , см		$L_{\text{деф}}$, см		h_1 , см		$F_{\text{тяг. усилие}}$, кН		$K_{\text{уд}}$, кН/м ²	
α	β	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
15	Без заострения	7	11	18	22	3,7	4,4	180	251	10,00	9,3
	Заострение	8	10	22	27,5	3,9	5	168	243	9,33	9,0
	14 (пластина 1)	10	13	33	27,5	4	6	168	210	9,33	7,8
	23 (пластина 2)	8	10	22	29	3,5	5,6	174	243	9,67	9,0
	35 (пластина 3)	6,8	12	21	32	3,8	5,8	185	307,2	10,28	11,4
25	Без заострения	8,5	11	26	38	5	5,75	173	278	9,61	10,3
	Заострение	11	9	28,5	27	5,2	4,4	162	258	9,00	9,6
	14 (пластина 1)	9,5	11	26,5	28	4,2	5	162	265	9,00	9,8
	23 (пластина 2)	9	11	26	31	3,2	3,5	165	290	9,17	10,7
	35 (пластина 3)	9,5	11	25	28	3,8	4,4	177	310	9,83	11,5
35	Без заострения	8	12	19	29	3,9	4,3	194	328	10,78	12,1
	Заострение	10	11	28	33,5	4,1	4,6	176	296	9,78	11,0
	14 (пластина 1)	8	11	27	25	2,7	2,65(9)	175	360	9,72	13,3
	23 (пластина 2)	8,5	12	32	29	4	5	198	385	11,00	14,3
	35 (пластина 3)	8	11	33	33	2,2	3,2	212	405	11,78	15,0

Анализ результатов исследований показал, что значения наименьших тяговых усилий 162-258 Н имеет модель лапы с углами $\alpha = 15$ и 25° и $\beta = 14$ и 23° .

Для моделей лап с углом $\beta = 35^\circ$ увеличение тягового усилия составляло 5–15% при изменении угла резания, что связано с более интенсивным подъёмом почвы (рисунок 4.42).



а



б

Рисунок 4.42 – Зависимость тягового сопротивления рыхления лапой культиватора от угла резания: а – без заострения и с заострением; б – при различных углах заострения для глубины обработки 10 см – I, 15 см – II

Из графиков видно, что угол заострения снижает тяговое сопротивление на 5–10%, при уменьшении угла заострения от 35 до 14° тяговое сопротивление уменьшается от 32 до 14% с уменьшением угла резания от 15 до 35°. При этом уменьшение тягового сопротивления с увеличением угла резания от 7 до 14% для

угла заострения 14° и от 12 до 32% для угла заострения 35° . Для лапы с углом $\alpha = 35^\circ$ были получены наибольшие значения тягового усилия от 175 до 405 Н, на глубине 10 и 15 см. Наибольшая высота вспученного грунта h_2 наблюдалась для модели культиватора с углами $\beta = 23^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, при этом распространение деформации перед рабочим органом было меньше, чем для моделей с углами $\alpha = 25^\circ$ и 35° в 1,08–1,2 раза. Высота вспученного грунта для модели рабочего органа с углом $\alpha = 25^\circ$ была меньше в 1,1–1,2 раза, чем для модели с углом $\alpha = 15^\circ$ и в 1,3–1,5 раза для модели с углом $\alpha = 35^\circ$, при этом в середине полосы разрыхлённой почвы образовывалась ложбина (рисунок 4.43).



Рисунок 4.43 – Полоса разрыхленной почвы рабочим органом культиватора с углом резания 35°

С увеличением угла резания ($\alpha = 25$ и 35°) и глубины обработки ложбина углублялась и составила $(0,3–0,5) h_1$. Это можно объяснить тем, что с углублением боковые крылья лапы, расположенные в поперечном сечении под углом 150° , более интенсивно перемещают грунт в стороны в соответствии с геометрией поверхности. На основании данных по значениям тяговых усилий были определены удельные сопротивления рыхлению $K_{уд} = F_T/A$, кН/м^2 , где A – площадь поперечного сечения зоны рыхления. Наименьшее значение $K_{уд} = 7,8–9,0 \text{ Н/м}^2$ получено для лапы с углами $\alpha = 15^\circ$ и $\beta = 14–23^\circ$, с ростом угла резания α до 25° $K_{уд}$ увеличился в 1,18–1,25 раза. С ростом углов резания α и заострения β наблюдалось увеличение удельного сопротивления рыхлению в 1,3–1,45 раза. Удельное

сопротивление рыхлению $K_{уд}$ для моделей с углом $\alpha = 35^\circ$ по средним значениям больше в 1,6 раза, чем для моделей с $\alpha = 15^\circ$, удельная энергоёмкость больше в 1,6–1,7 раза для углов заострения $\beta = 14$ и 23° .

Для моделей рыхлителя с углами $\alpha = 25^\circ$ удельное сопротивление рыхлению при различных углах заострения изменялось от 19,8 до 11,4 кН/м². Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические основы физико-механических процессов рыхления почвы лапой культиватора и позволили принять за основу расчёт усилия сопротивления рыхлению с учётом основных составляющих. Сравнительные исследования моделей с различными параметрами позволили рекомендовать рациональные значения углов резания.

Таким образом:

1. Значения наименьших тяговых усилий 162–258 Н имеет лапа с углами $\alpha = 15$ и 25° и $\beta = 14$ и 23° . Уменьшение угла заострения снижает тяговое сопротивление на 5–10%. Эксперименты со сменными ножами показали, что уменьшение угла заострения β от 35 до 14° одновременно с увеличением угла резания α от 15 до 35° снижает тяговое сопротивление на 5–18%.

2. Наиболее интенсивный процесс разрыхления наблюдался у рабочего органа с углами $\alpha = 15–25^\circ$ и $\beta = 14–23^\circ$. Большие затраты энергии были зафиксированы для культиваторов с углами резания $\alpha = 25–35^\circ$, $\beta = 23–35^\circ$.

3. Полученные значения величины деформации грунта и перемещения его перед рабочим органом могут быть использованы для оценки энергетических затрат при рыхлении, а также для основ расчета тягового усилия, определения составляющих тягового сопротивления перемещению почвы по рабочим поверхностям стрелчатой лапы культиватора.

4.4 Результаты оценки степени разрыхления почвы методом фрактального анализа

Качество рыхления оценивалось методом фрактального анализа. В результате установлено, что наличие в зоне разрыхления мелких агрегатов почвы преобладает при обработке лапой с углами резания $15–25^\circ$ и с заострением $14–23^\circ$,

наличие более крупных агрегатов почвы размером 40–60 мм составляло всего 3–5%. Эти результаты можно считать достаточно приемлемыми по агротехническим требованиям. При более развитой структуре почвы значение фрактальной размерности увеличивается, что говорит о более сильном разрыхлении. На основании такого анализа осуществляется выбор рационального угла резания рабочего органа. Увеличение фрактальной размерности говорит о более развитой структуре, т.е. почва сильнее разрыхлена. Анализ проведенных экспериментов подтвердил результаты ранее выполненных опытов, на основании которых обоснован выбор угла резания лапы культиватора. При увеличении угла резания от 15 до 35° фрактальная размерность возрастает, что соответствует наибольшему разрыхлению почвы. Это означает, что большая площадь состоит из трещин и пустот и разрыхление в центре более интенсивное, чем по краям, а также показывает неоднородность почвы. Увеличение угла резания лапы от 40 до 50° наблюдается уменьшение неоднородности разрыхления почвы. Регрессионное уравнение с ярко выраженным степенным характером показывает зависимость дисперсии фрактальной размерности от угла резания. Рекомендации по выбору рациональных углов резания, предложенных по результатам исследований на грунтовом канале подтверждаются фрактальным анализом. Можно рекомендовать по результатам проверочных исследований с фрактальным анализом углы резания $\alpha = 15\text{--}20^\circ$, а угол заострения режущей кромки лапы $\beta = 14\text{--}23^\circ$, меньшие значения – для более плотных грунтов.

Наибольшие значения параметров, характеризующих процесс разрыхления (h_2 , $L_{\text{деф}}$, h_1), следовательно, были получены для культиваторов с углами резания $\alpha = 15\text{--}25^\circ$ и углами заострения $\beta = 14\text{--}23^\circ$. Большие затраты энергии были зафиксированы для культиваторов с углами резания $\alpha = 25\text{--}55^\circ$, $\beta = 23\text{--}35^\circ$ (рисунок 4.44).

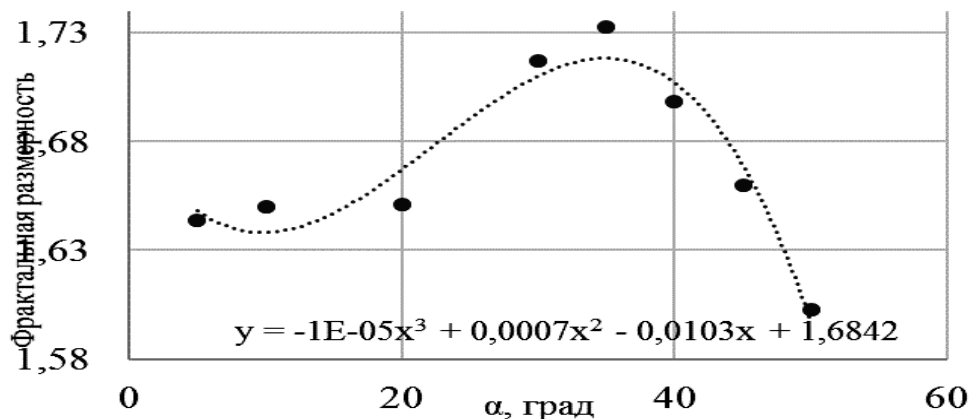
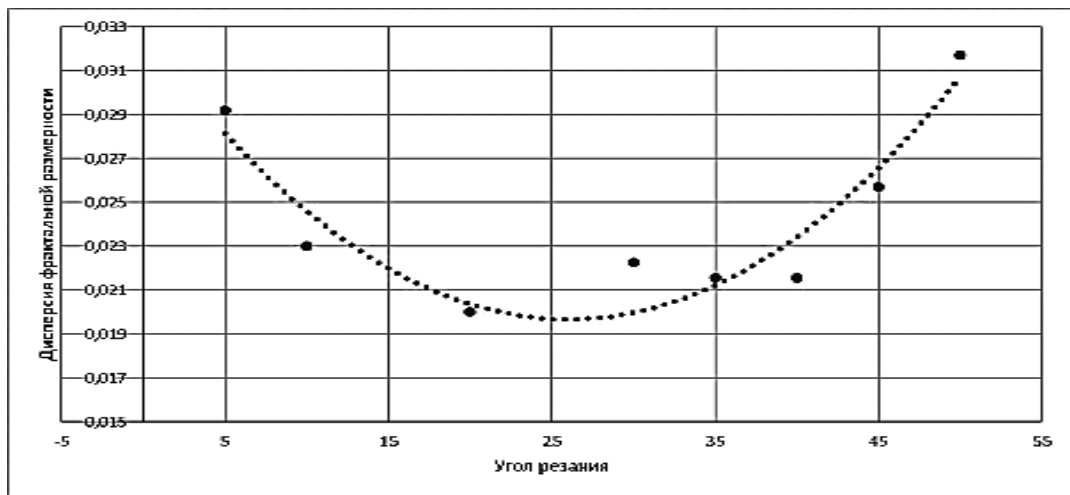


Рисунок 4.44 – Зависимости дисперсии фрактальной размерности (а) и фрактальной размерности (б) от угла резания культиватора

По качеству разрыхления, однородности разрыхлённого грунта, наличию сравнительно мелких фракций в зоне разрыхления наиболее рациональным можно считать рабочий орган с этими углами. Наличие крупных фракций грунта (40–60 мм) составляло всего от 3 до 5%.

Пример фрактальной обработки опыта по результатам рыхления почвы лапой культиватора показан на рисунке 4.45. Зависимость числа элементов, попавших в ячейки сетки, от шага этой сетки в логарифмических координатах имеет линейный характер, что говорит о самоподобном, фрактальном характере элементов среза грунта. Было замечено неравномерное распределение фрактальной размерности по высоте среза грунта, а в верхних слоях в большинстве случаев наблюдалось её незначительное увеличение. Эту особенность можно объяснить большей усадкой нижних слоев под силой тяжести верхних.

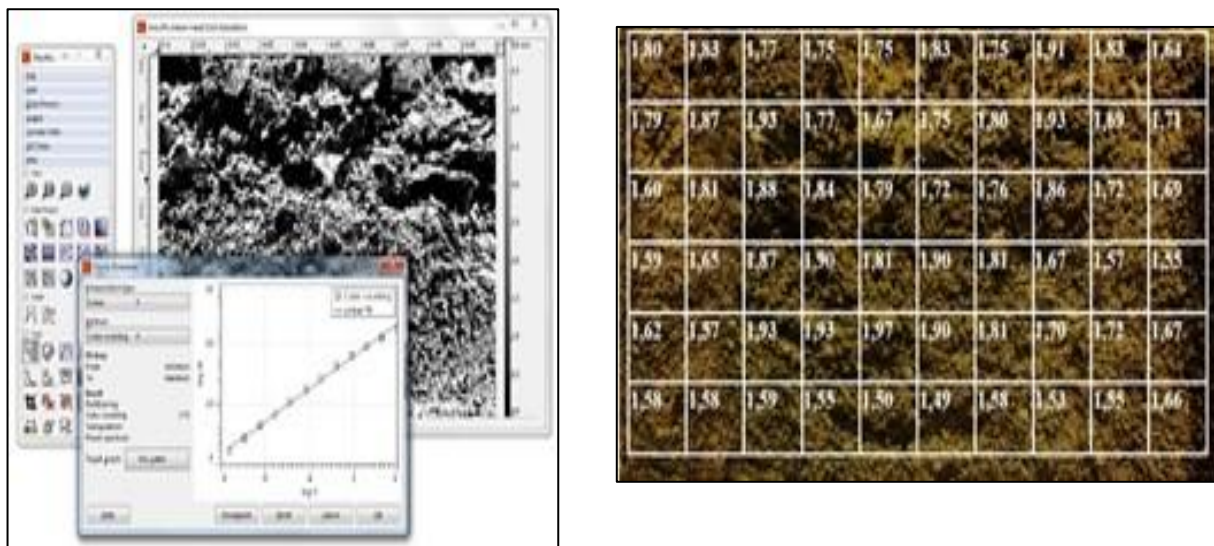


Рисунок 4.45 – Распределение фрактальной размерности среза грунта, обработанного лапой культиватора

Отличие фрактальных значений по срезам необработанной почвы составило порядка 5–7%, а для срезов различных участков фрактальная размерность – в пределах 5–10%. Результаты опытов методом фрактального анализа подтверждают данные инструментальных измерений и дают возможность представить графическую картину результатов рыхления. Установлено, что карта фрактальных размерностей обозначает контуры рабочего органа, позволяет определить зону повышенной фрактальной размерности и оценить степень разрыхления почвы.

Получены результаты исследования влияния скорости перемещения рабочего органа на процесс рыхления методом фрактального анализа. Установлено, что увеличение скорости приводит к изменению фрактальной размерности и усилия сопротивления рыхлению. С возрастанием скорости фрактальная размерность увеличивается. Величина угла резания также влияет на фрактальную размерность, увеличение угла резания приводит к более однородному распределению агрегатов почвы и уменьшению фрактальной размерности, но при этом верхний пласт интенсивно выпирался вверх и разваливался в обе стороны от оси лапы.

Эффективность работы культиваторов зависит от рационально выбранных параметров конструкции рабочих органов и режимов работы агрегатов. Модели

рабочего органа культиватора испытывались при разных скоростях. Диапазон скоростей составил от 0,15 до 0,3 м/с с шагом 0,05 м/с. После каждого опыта проводились срезы разрыхлённого грунта и фотографирование их с последующей обработкой снимков.

На рисунке 4.46 показано распределение фрактальной размерности после обработки грунта лапой с углом резания 25° на скорости 0,2 м/с.

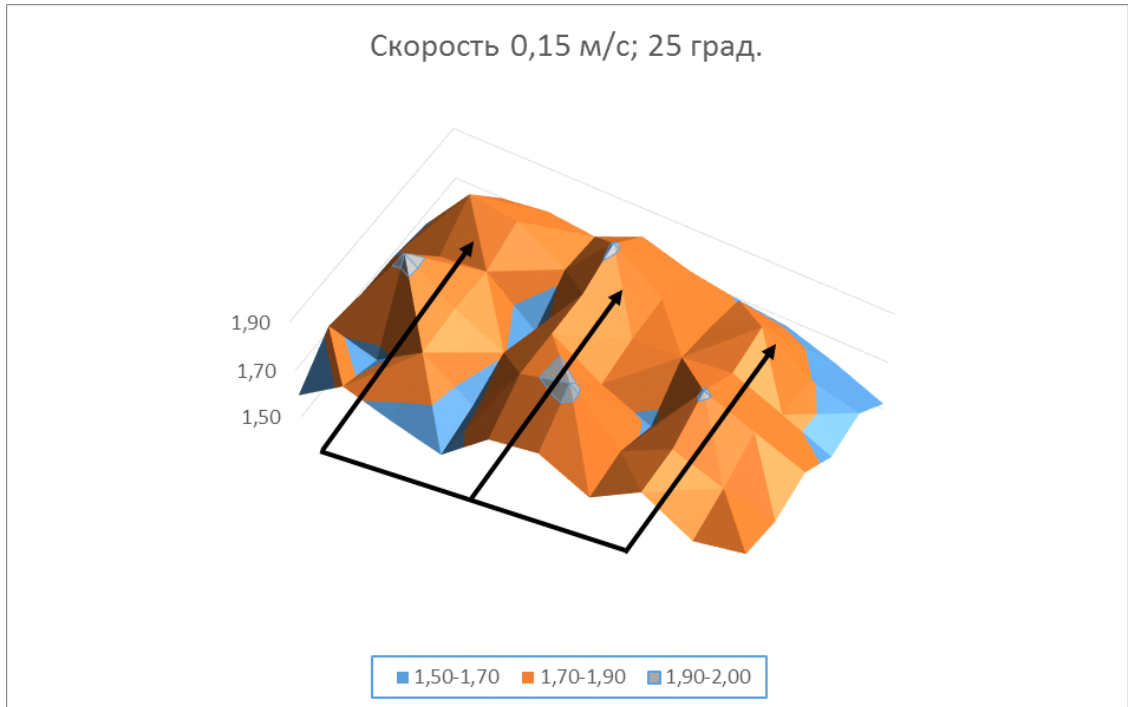
Качество рыхления оценивалось методом фрактального анализа. В результате установлено, что наличие в зоне разрыхления мелких агрегатов почвы преобладает при обработке лапой с углами резания $15\text{--}25^\circ$ и с заострением $14\text{--}23^\circ$, наличие более крупных агрегатов почвы размером 40–60 мм составляло всего 3–5%. Эти результаты можно считать достаточно приемлемыми по агротехническим требованиям. Наибольшие тяговые усилия наблюдались в опытах с лапой с углами заострения $\beta = 23\text{--}35^\circ$ и углами резания $\alpha = 25\text{--}55^\circ$, что говорит о больших затратах энергии на рыхление.

Результаты исследований методом фрактального анализа с достаточной достоверностью подтверждают данные, полученные путём инструментальных измерений.

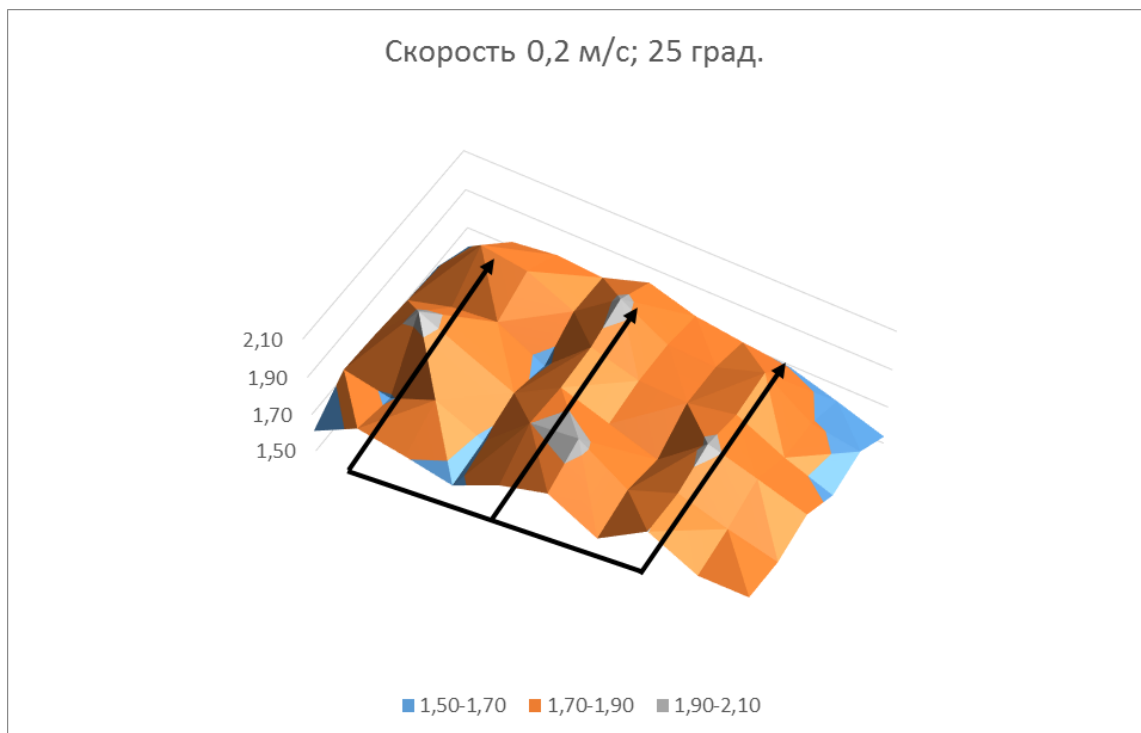
1,61	1,69	1,68	1,65	1,78	1,79	1,81	1,81	1,79	1,73
1,69	1,72	1,64	1,61	1,83	1,85	1,77	1,83	1,77	1,77
1,72	1,69	1,71	1,65	1,82	1,79	1,69	1,88	1,79	1,75
1,68	1,73	1,74	1,63	1,85	1,81	1,75	1,81	1,75	1,68
1,63	1,75	1,81	1,74	1,81	1,82	1,73	1,85	1,71	1,61
1,59	1,71	1,72	1,68	1,75	1,74	1,69	1,72	1,64	1,55

Рисунок 4.46 – Распределение фрактальной размерности среза грунта, обработанного лапой культиватора с углом резания 25° на скорости 0,2 м/с

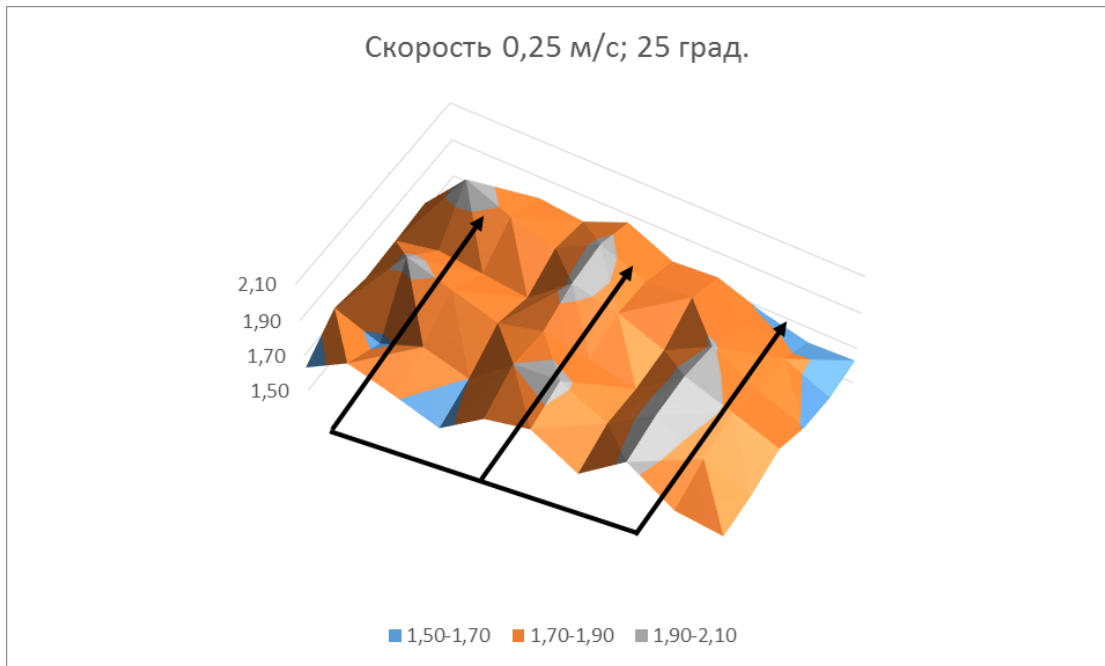
По результатам исследования влияния скорости перемещения лап с углами резания 20, 25 и 30° получены графики распределения фрактальной размерности (рисунок 4.47).



А



Б



В

Рисунок 4.47 – Распределение фрактальной размерности почвы, обработанной с разной скоростью

Средние значения фрактальных размерностей по срезу грунта при различных скоростях и конструкциях рыхлителя представлены на рисунке 4.48.

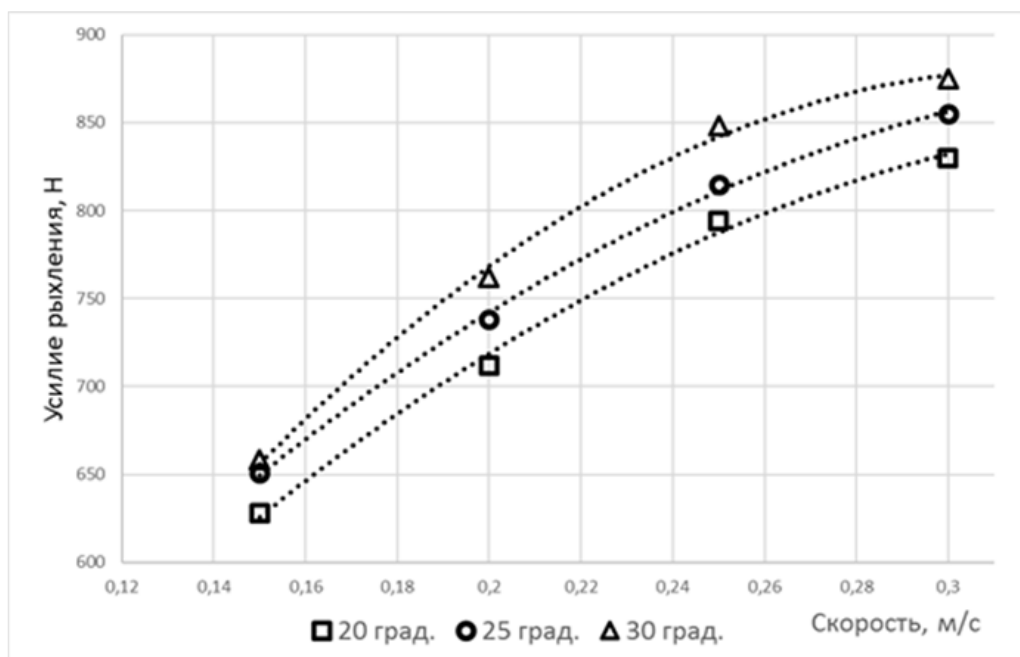


Рисунок 4.48 – Зависимость тягового усилия от поступательной скорости при разных углах резания

На основании изложенного, можно сделать вывод о некоторой пропорциональности роста тяговых усилий при увеличении угла резания и при увеличении скорости рыхления. Зависимость практически линейна на малых скоростях, но с повышением скорости рыхления приобретает слабо степенной характер.

Связь между средними фрактальными размерностями срезов и тяговыми усилиями при рыхлении с разными скоростями показывает коэффициент корреляции (таблица 4.11).

Таблица 4.11 – Коэффициент корреляции фрактальной размерности среза и тяговых усилий

Угол наклона лапы, градусы	25	30	35
Коэффициент корреляции фрактальной размерности среза и тяговых усилий по диапазону скоростей	0,73	0,85	0,68

По величине коэффициента корреляции видно, что наиболее равномерное рыхление массива почвы происходит при угле резания 25–30° и при угле заострения 17°.

4.5 Результаты полевых испытаний восстановленных стрелчатых лап культиваторов

Полевые испытания стали завершающим этапом исследования, по данным которых подводились итоги и делались заключения о целесообразности и эффективности применения рассматриваемой технологии восстановления работоспособности стрелчатых лап культиваторов. Исследовались такие показатели, как износостойкость, тяговое сопротивление расхода топлива машинно-тракторного агрегата на операции культивации. При выполнении исследований по определению тягового сопротивления использовались

стрельчатые лапы, имеющие наименьший коэффициент трения, равный 0,25, полученный при исследовании тягового сопротивления в почвенном канале.

Культиватор совместно с трактором МТЗ-1523 в сцепке с культиватором КСП-4 проводил обработку целинной суглинистой тяжелой почвы на 15 см (рисунок 4.49). Культиватор состоит из рамы, колёс, грядилей и других частей. На каждой из коротких грядилей смонтировано по одной стрельчатой лапе, а на каждой из длинных, при помощи сдвоенных держателей – по две рыхлительные лапы. Стойка лапы присоединена к грядилю болтом, держателем и планкой (рисунок 4.50). Культиватор КПС-4 комплектуется стрельчатыми универсальными лапами, которые закрепляют на грядилях в два ряда.



Рисунок 4.49 – Полевые испытания восстановленных стрельчатых лап культиваторов



Рисунок 4.50 – Стрельчатые универсальные лапы культиватора КПС-4

При проведении полевых испытаний на износостойкость было установлено, что средний ресурс одной серийной стрельчатой лапы до наступления предельного состояния составил 44,0 га, а восстановленная лапа имела ресурс 72,0 га. Таким образом, ресурс восстановленных лап в 1,64 раза больше, чем у серийных. Для сравнения, результаты испытаний, проведенные ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция», показали, что уже при наработке 34,7 га у стрельчатых лап культиватора 2КПС-4 произошло затупление режущей кромки [183]. Динамика износа серийных и восстановленных стрельчатых лап в зависимости от наработки показана на рисунке 4.51.

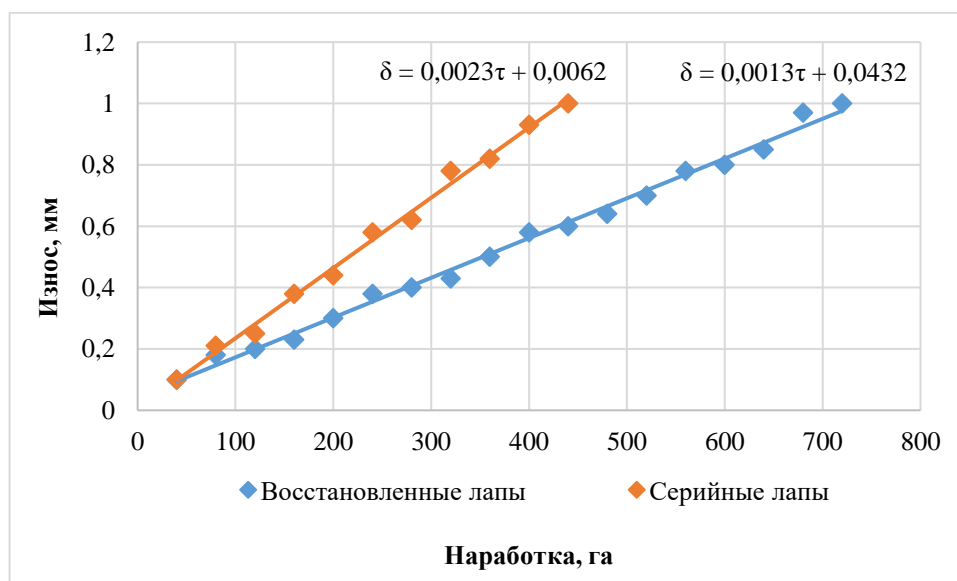


Рисунок 4.51 – Динамика износа серийных и восстановленных стрельчатых лап

Из рисунка 4.51 видно, что износ восстановленной лапы при наработке на одну лапу 34,5 га составил 0,8 мм. Для сравнения, результаты испытаний, проведенные ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция», показали, что при наработке 17,5 га у стрельчатых лап фирмы «Велес» средний износ крыльев лап составил 1,8 мм [183].

В результате исследований установлено, что тяговое сопротивление культиватора при работе с восстановленными лапами ниже, чем с серийными, в среднем в 1,5 раза. При скорости агрегата $V_p = 7$ км/ч и углами резания $\alpha = 25^\circ$, заострения $\beta = 17^\circ$ наблюдается наименьшее значение тягового сопротивления $F_{тяг} = 6,4$ кН у культиватора с восстановленными лапами и $F_{тяг} = 8,2$ кН – с новыми серийными лапами. Зависимость тягового сопротивления от скорости агрегата показана на рисунке 4.52.

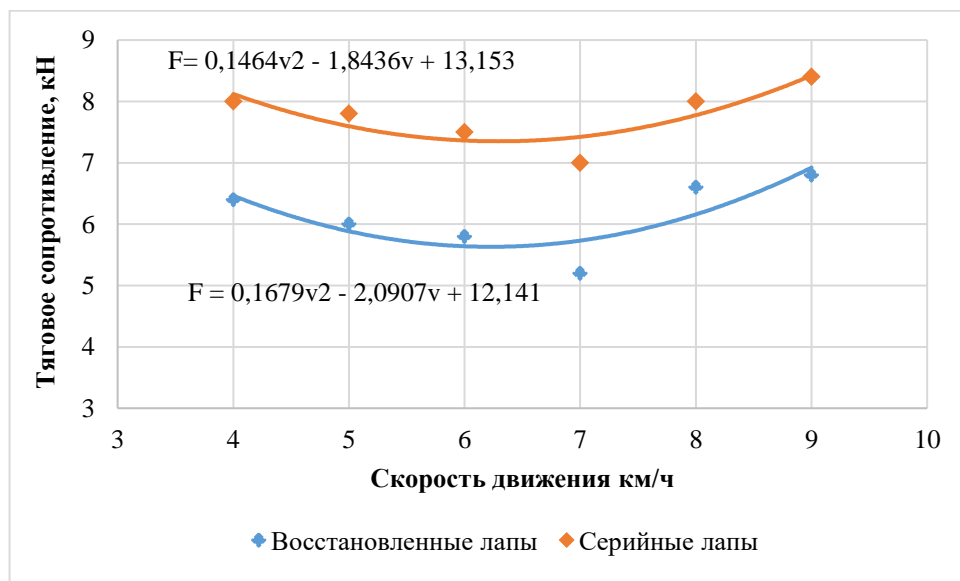


Рисунок 4.52 – Зависимость тягового сопротивления от скорости агрегата

Расход топлива, при работе культиватора с восстановленными лапами ниже, чем с серийными, также в среднем в 1,25 раза. Наблюдается наименьшее значение расхода топлива трактора, равное $G = 14,484$ кг/ч с восстановленными лапами и $G = 22,493$ кг/ч с новыми серийными лапами. Зависимость расхода топлива трактора от скорости движения агрегата показана на рисунке 4.53.

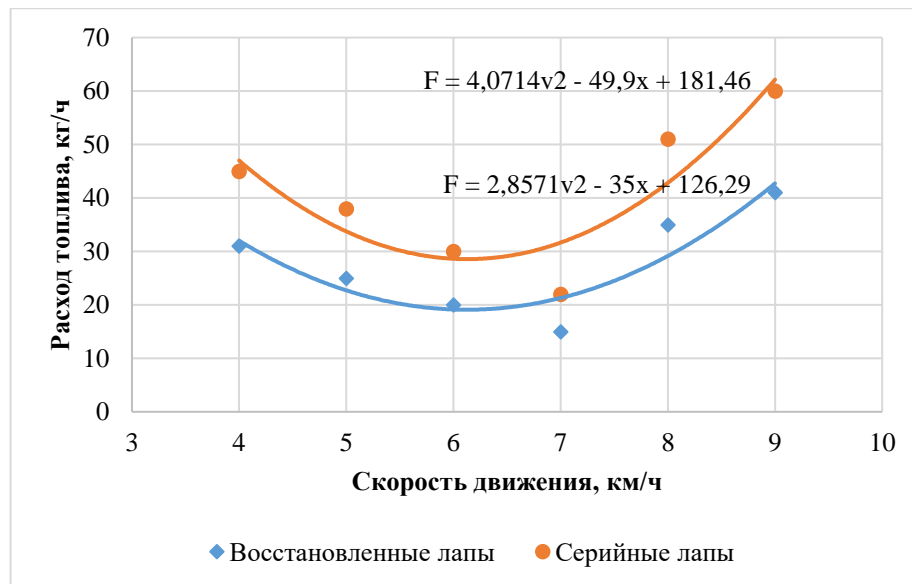


Рисунок 4.53 – Зависимость расхода топлива трактора от скорости движения

Анализ поверхности обработанного участка поля показал, что отклонение глубины соответствовало нормам (не более 1 см), а размеры гребней и глыб не превышали установленных значений: отклонение от заданной глубины обработки должно составлять не более 1 см; обработанная почва должна быть рыхлой, с высотой гребней не более 3–4 см и размером глыб не больше 5 см; должно обеспечиваться полное подрезание сорняковых растений.

Результаты полевых испытаний подтвердились при эксплуатационных испытаниях экспериментальных культиваторов в хозяйствах Московской области.

Таким образом:

1. Результаты полевых испытаний на износостойкость показали, что ресурс восстановленных лап в 1,64 раза больше, чем у серийной стрельчатой лапы. Износ восстановленной лапы при наработке на одну лапу 34,5 га составил 0,8 мм. Нарботка восстановленной лапы до наступления предельного состояния составила 72,0 га.

2. Тяговое сопротивление и расход топлива агрегата культиватора при работе культиватора с восстановленными лапами ниже, чем с серийными, в среднем в 1,25 раза. Наименьшее значение тягового сопротивления получено при скорости агрегата 7 км/ч и углами резания 25° , заострения 17° .

3. Установлено, что при обработке почвы культиватором с восстановленными лапами отклонение глубины соответствовало нормам (не более 1 см), а размеры гребней и глыб не превышали установленных значений.

4.6 Результаты оценки потребительских свойств культиваторов с восстановленными лапами

Основные критерии определения функциональных характеристик (потребительских свойств) культиватора определены постановлением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования» (с изменениями и дополнениями) [184, 185, 186]. Результаты оценки функциональных характеристик (потребительских свойств) культиватора с восстановленными лапами показаны в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты испытания культиватора с восстановленными лапами

Показатели	Значение показателя	
	Норматив	По результатам испытаний
Глубина обработки, см	4-12	4-18
Крошение почвы, комки размером до 25 мм включительно, %, не менее	80	94,1
Крошение почвы, комки размером свыше 100 мм, %, не более	0	0
Подрезание сорняков, %, не менее	100	100
Гребнистость поверхности почвы, см, не более	4,0	1,7
Наработка на отказ единичного изделия, ч, не менее	120	130

Таким образом, функциональные потребительские свойства культиватора с восстановленными лапами соответствуют критериям постановления

Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования».

Выводы

1. Установлено, что при температуре 1100°С для углеродистых сталей 45 и У8А толщина диффузионного слоя составляет 0,015–0,019 мм, а для легированных 65Г, 30ХГСА, ХВГ – 0,025–0,030 мм на сторону. Повышение температуры до 1200°С приводит к росту толщины слоя на углеродистых сталях до 0,025–0,03 мм, для легированных сталей 0,028–0,039 мм на сторону. Для образца из стали ХВГ толщиной 0,8 и 10 мм она составляет соответственно 0,038 и 0,055 мм.

2. Максимальная микротвердость получена на образцах из сталей 65Г, 30ХГСА, ХВГ при температуре 1200°С и продолжительности хромирования 6 ч. При толщине образца 10 мм из стали ХВГ микротвердость его поверхности составила 28000 МПа, а при толщине 0,6 мм только 18000 МПа. Пластины из сталей 45, У8А, 08кп имеют меньшую твердость, чем образцы из сталей 65 Г, 30ХГСА и ХВГ. Максимальное значение показателя твердости поверхности наблюдается на образцах толщиной 0,8 мм при температуре хромирования 1200°С в течение 6 ч.

3. Установлено, что износостойкость пластин из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 и 4 мм после диффузионного хромирования в 2,5–3 раза выше износостойкости образца закаленной стали 45. Наилучшие показатели износостойкости получены при испытаниях хромированных образцов, изготовленных из стали ХГВ. Износостойкость образцов после контактной приварки к ним стальных пластин У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм, прошедших диффузионное хромирование, в 2–3 раза выше износостойкости образца из закаленной стали 45.

4. Наибольшие напряжения при работе культиватора наблюдаются на режущей кромке лапы и в местах ее крепления к раме. Установлено, коэффициент запаса прочности для лапы культиватора должен быть не ниже 1,99.

5. Наименьшие тяговые усилия 162–258 Н имеет лапа культиватора с углами резания 15 и 25° и заострения 14 и 23°. Уменьшение угла заострения снижает тяговое сопротивление на 5–10%. Эксперименты со сменными ножами показали, что уменьшение угла заострения от 35 до 14° одновременно с увеличением угла резания от 15 до 35° снижает тяговое сопротивление на 5–18%.

6. Наиболее интенсивный процесс разрыхления (наибольшие значения параметров, характеризующих процесс разрыхления) наблюдался у рабочего органа с углами резания 15–25° и заострения 14–23°. Большие затраты энергии были зафиксированы для культиваторов с углами резания 25–35°, заострения 23–35°.

7. Наиболее равномерное рыхление массива почвы происходит при угле резания 25–30° и при угле заострения 17°.

8. Результаты полевых испытаний на износостойкость показали, что ресурс восстановленных лап в 1,64 раза больше, чем у серийных стрельчатых лап. Износ восстановленной лапы при наработке на одну лапу 34,5 га составил 0,8 мм. Нарботка восстановленной лапы до наступления предельного состояния составила 72,0 га.

9. Тяговое сопротивление и расход топлива агрегата культиватора при работе культиватора с восстановленными лапами ниже, чем с серийными в среднем в 1,25 раза. Наименьшее значение тягового сопротивления получены при скорости агрегата 7 км/ч и углами резания 25°, заострения 17°.

10. Установлено, что при обработке почвы культиватором с восстановленными лапами отклонение глубины соответствовало нормам (не более 1 см), а размеры гребней и глыб не превышали установленных значений.

11. Функциональные характеристики (потребительские свойства) культиватора с восстановленными лапами соответствуют критериям постановления Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования».

5 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1 Производственные рекомендации по восстановлению работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин

5.1.1 Примерная номенклатура рабочих органов почвообрабатывающих машин для восстановления

Примерная номенклатура рабочих органов почвообрабатывающих машин для восстановления креплением пластин, упрочненных диффузионным хромированием, дана в таблице 5.1. Для этого использовали информационные ресурсы производителей и поставщиков почвообрабатывающей техники [187–190].

Таблица 5.1 – Примерная номенклатура рабочих органов почвообрабатывающих машин для восстановления креплением пластин

Наименование	Применимость
Лапа СЗ 410 мм	Культиваторы КТС-10, КПЭ-3,8
Лапа культиваторная 410 мм	Культиваторы КПЭ-4
Лапа 270 мм (с сормайтом) СЗЗ-ГРАНД	Культиваторы КПС-4
Лапа 330 мм (с сормайтом) СЗЗ-ГРАНД	Культиваторы КПС-4
Лапа культиваторная 410 мм с наплавкой	Культиваторы КПЭ-3,8
Лапа КСП 22.040 480 мм	Культиваторы АПК-7,2, АПП-7,2
Лапа 410 мм	Культиваторы КПЭ-3,8
Лапа стрелчатая 135 мм	Культиваторы КБМ-10,8 РЗЗ
Лапа 410 мм	Культиваторы КТС-10, КПЭ-3

Окончание таблицы 5.1

Наименование	Применимость
Лапы производства ПАО «Грязинский культиваторный завод»	Культиваторы КСУ-6М, КСУ-3,8, КСУ-3, КШУ-18, КШУ-12 Н, КПЭ-3,8 М
Лапы производства ЗАО «Красный Аксай»	Культиваторы КПШ-20
Лапа 410 мм	Посевные комплексы «Обь», «Лидер»
Культиваторные лапы «Гранит»	Посевные комплексы John Deere 1820; John Deere 1830; Nichols Tillage Tools 47UW10B7; культиваторы Sunflower, Salford, Wilrich, John Deere, Landoll
Лапы сеялок и культиваторов производства ООО НПП «Валок»	Почвообрабатывающая техника John Deere, Salford, Case, Wilrich, Great Plains, Hesston; Landoll и др.
Культиваторные лапы компании SKR	Культиваторы Solar Fields, Tillermaster
Культиваторные лапы производства АО «Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»	Культиваторы Solar Fields, Tillermaster
Культиваторные лапы производства ООО «Завод «ВарнаАгроМаш»	Культиваторы Hatzenbichler, Salford, John Deere

5.1.2 Технология изготовления пластин для ремонта стрельчатых лап

Технологический процесс изготовления пластин для ремонта лап культиваторов состоит из последовательных операций: доставка и нарезка полосы, сверление отверстий, заточка лезвия, шлифование плоскости и углов заострения, очистка поверхности, диффузионное хромирование, контроль качества. В качестве материала для изготовления пластин используют полосы, изготовленные из сталей ХГВ. Форма и размеры вновь изготавливаемой режущо-лезвийной части соответствуют величине износа рабочего органа.

Для изготовления пластин целесообразно использовать ручные переносные угловые шлифовальные машины типа МШУ-2-230, УШМ-230-2100 или стационарные машины типа ПО-73260 и отрезные карбидокремниевые круги типа А36SBF ГОСТ 21963 и ГОСТ Р 57978 [18]. При проведении данной технологической операции необходимо осуществлять контроль температуры в зоне резания во избежание нежелательных короблений и деформаций детали, а также нарушения ее исходного структурного состояния.

Для формирования фаски на неизношенной поверхности рабочего органа целесообразно использование шлифовального станка типа ЗК634 и шлифовальных кругов типа ПП 400×40×127 ГОСТ 2424. Фаска должна быть выполнена с двумя симметричными скосами кромок по ГОСТ 5264 [18]. Пластины, прошедшие очистку и обезжиривание, поступают на диффузионное парофазное хромирование. Для этого используют электровакуумную печь модели СНВЭ 1.Э1/16ИЗ. Пластины укладывают в контейнер с засыпкой хромовым порошком марки Х-97 грануляцией 0,4–0,6 мм, контейнер закрывают крышкой и помещают в камеру вакуумной печи. Контейнер изготавливается из стали 30ХГСА с толщиной стенок не менее 2 мм. Пластины укладывают в контейнер горизонтально, слой за слоем, при этом каждый слой пересыпается порошком хрома, расстояние между слоями пластин в контейнере 2–3 мм. Хромирование проводят при температуре 1200°С с выдержкой 6 ч, при этом нагрев осуществляется постепенно, далее следует выдержка на режиме в течение 6 ч, остаточное давление должно быть не выше 1,33–10⁻¹ Па [142]. Диффузионное хромирование с применением порошковой смеси проводят с

применением контейнера с плавким затвором, который обеспечивает герметизацию реакционного пространства и позволяет производить нагрев при хромировании в обычных термических печах. Состав порошков для хромирования приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Составы порошковых смесей для диффузионного хромирования

Номер смеси	Компоненты	Химическое обозначение	Содержание, % (вес)
1	Хром	Cr	50
	Окись алюминия	Al ₂ O ₃	43(45)
	Хлористый аммоний	NH ₄ Cl	7(5)
2	Хром	Cr	50
	Окись алюминия	Al ₂ O ₃	49
	Йодистый аммоний	NH ₄ I	1
3	Феррохром	FeCr	50
	Окись алюминия	Al ₂ O ₃	45(47)
	Хлористый аммоний	NH ₄ Cl	5(3)
4	Феррохром	FeCr	70
	Окись алюминия	Al ₂ O ₃	29
	Йодистый аммоний	NH ₄ I	1

Контейнеры с плавким затвором изготавливают из жаростойких сталей или сплавов. Размеры и форму контейнеров подбирают в соответствии с габаритными размерами и формой изделий, подвергаемых хромированию, и нагревательных

устройств. В контейнер можно помещать изделия из стали разных марок, технологические режимы обработки которых совпадают. Нагревательные печи для диффузионного хромирования должны обеспечивать нагрев изделий в контейнере до 1200°C , иметь равномерное температурное поле в объеме садки ($\pm 5^{\circ}\text{C}$), систему автоматического регулирования для поддержания заданной температуры в период проведения процесса с точностью $\pm 10^{\circ}\text{C}$, а также вытяжную вентиляцию.

После проведения процесса контейнеры охлаждаются вместе с печью до температуры не выше $t = 50^{\circ}\text{C}$, распаковывают и очищают пластины от остатков смеси. Данный технологический процесс позволяет получать износостойкие покрытия на пластинах.

5.1.3 Технологический процесс восстановления работоспособности стрелчатых лап культиваторов

Схема технологического процесса восстановления работоспособности стрелчатых лап культиваторов приведена на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Схема технологического процесса восстановления стрелчатых лап культиваторов

Карта технологического процесса восстановления работоспособности стрелчатой лапы культиватора приведена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Карта технологического процесса восстановления работоспособности стрелчатой лапы культиватора

Содержание операции, режимы, требования	Оборудование	Оснастка
1	2	3
<p>Очистная</p> <p>1. Установить лапу, закрепить.</p> <p>2. Очистить от загрязнений.</p> <p>3. Снять лапу</p>	<p>Верстак ОРГ-1468-01-060А; угловая шлифовальная машина МШУ-1,8-230 или УШМ-П125-1200</p>	<p>Тиски слесарные 1-220; щетка-чашка (125 мм) КЕДР 208050; очки защитные</p>
<p>Дефектовочная</p> <p>1. Установить лапу.</p> <p>2. Дефектовать. Не допускаются износы режущее-лезвийной части по ширине и по толщине более допустимых значений, предусмотренных техническими требованиями к конкретному рабочему органу.</p> <p>3. При наличии трещин, коробления лапу браковать.</p> <p>4. Снять лапу</p>	<p>Стол контролера ОРГ-9810</p>	<p>Штангенциркуль ШЦ-1-150-0,1 (ГОСТ 166-89); металлические измерительные линейки (ГОСТ 427-75)</p>

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3
<p>Слесарная</p> <p>1. Установить лапу, закрепить.</p> <p>2. Разметить и удалить изношенную режущую часть до выведения следов износа.</p> <p>3. Сформировать фаску 4×45° с двух сторон неизношенной части лапы.</p> <p>4. Снять лапу</p>	<p>Верстак ОРГ-1468- 01-060А; угловая шлифовальная машина МШУ-1,8-230 или стационарная отрезная машина ПО-73260; станок точильно-шлифовальный ЗК634</p>	<p>Тиски слесарные 1-220 (ГОСТ 4045-87); штангенциркуль ШЦ-Н-250-0,05 (ГОСТ 166-89); очки защитные; круг отрезной 41150×2×22 14А 80-Н</p>
<p>Заготовительная</p> <p>1. Разметить пластину. Форма и размеры должны соответствовать величине удаленной изношенной части лапы.</p> <p>2. Произвести сверление отверстий и заточку.</p> <p>3. Сформировать фаску 4×45° с двух сторон.</p>	<p>Верстак ОРГ-1468-01-060А; угловая шлифовальная машина МШУ-1,8-230 или стационарная отрезная машина ПО-73260; станок точильно-шлифовальный ЗК634; сверлильный станок</p>	<p>Тиски слесарные 1-220 (ГОСТ 4045-75); штангенциркуль ШЦ-Н-250-0,05 (ГОСТ 166-89); очки защитные</p>
<p>4. Нарезать резьбу под болт М4</p>		
<p>Диффузионное хромирование</p>	<p>Печь мод. СНВЭ 1.Э1/16ИЗ</p>	<p>Контейнер из стали 30ХГСА; порошковые смеси для диффузионного хромирования</p>

Окончание таблицы 5.3

1	2	3
<p>Слесарная</p> <p>1. Установить лапу. 2. Обеспечить крепление стальных съемных пластин к лапе с помощью четырех болтов</p>	<p>Верстак ОРГ-1468-01-060А</p>	<p>Набор инструмента ПИМ-12</p>
<p>Контрольная</p> <p>1. Установить лапу. 2. Проверить качество восстановления и упрочнения согласно техническим требованиям. 3. Снять лапу</p>	<p>Стол контролера ОРГ-9810</p>	<p>Штангенциркуль ШЦ-1-150-0,1 (ГОСТ 166-89); металлические измерительные линейки (ГОСТ 427-75); лупа ЛП-1-10^х (ГОСТ 25706); переносной динамический твердомер ТКМ-359С</p>

Таким образом, предложена примерная номенклатура стрелчатых лап культиваторов для восстановления креплением хромированных пластин. Разработан технологический процесс восстановления работоспособности стрелчатых лап культиваторов, который включает в себя нарезку стальной пластины, сверление отверстий, заточку лезвия, шлифование плоскости и углов заострения, очистку поверхности, диффузионное хромирование, контроль качества.

Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением диффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянксельмаш» (приложение 7). Департамент

растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России считает результаты научных исследований актуальными и рекомендует организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования, а также заводам сельскохозяйственного машиностроения внедрять их для повышения надёжности и ресурса техники, а также снижения себестоимости изготовления и восстановления деталей, что особенно актуально в условиях высокой доли изношенной техники в АПК страны (приложение 8). Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (приложение 9).

5.2 Экономическая эффективность производственных рекомендаций

Расчет экономической эффективности от внедрения технологии упрочнения пластин культиваторов выполнен в соответствии с методиками, рекомендуемыми для определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [191–193]. Результатом оценки издержек является себестоимость одной пластины. Спецификация основных технологических операций приведена в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Спецификация основных технологических операций

Операция	Содержание	Оборудование
Отрезная	Нарезать пластины из полосы	Станок отрезной
Сверлильная	Просверлить отверстия	Станок сверлильный
Шлифовальная	Шлифовать плоскости пластин и режущие кромки	Станок плоскошлифовальный ЗБ722

Окончание таблицы 5.4

Очистная	Очистить и обезжирить пластины	Верстак слесарный ОРГ 1468-01
Диффузионное хромирование	Диффузионная металлизация, ленты	Печь вакуумная СНВЭ 1.Э1/16ИЗ
Очистная	Очистить пластины от хрома	Верстак слесарный ОРГ 1468-01
Контрольная	Контроль качества ХТО	Верстак слесарный ОРГ 1468-01
Контрольная	Проверить параметры пластин	Верстак слесарный ОРГ 1468-01
Консервация	Покрыть обработанные поверхности консервационным маслом	Верстак слесарный ОРГ 1468-01

Расчет тарифной зарплаты производственного персонала

Тарифная ставка первого разряда является основной, она задает уровень ставок для других разрядов и, следовательно, общий уровень заработной платы рабочих, оплачиваемых по данной тарифной сетке.

Для расчета зарплаты рабочего другого разряда необходимо тарифную ставку первого разряда умножить на тарифный коэффициент (К) соответствующего разряда (для третьего разряда $K = 1,23$; четвертого – $K = 1,36$; для пятого – $K = 1,56$) [191].

Тарифная ставка для первого разряда (t) считается по формуле

$$t_i = \frac{M_3}{P_M \cdot 60},$$

где M_3 – месячная зарплата рабочего первого разряда, руб.;

P_M – рабочие часы в месяц;

60 – переводной коэффициент (минуты в часы).

Принимаем месячную зарплату рабочего первого разряда – 70000 руб.
Рабочих часов в месяце – 165 ч.

Получаем:

$$m_i = \frac{70000}{165 \cdot 60} = 7,0 \text{ руб/мин.}$$

Для третьего разряда: $m_3 = m \cdot 1,2 = 8,4 \text{ руб/мин.}$

Для четвертого разряда: $m_4 = m \cdot 1,35 = 9,46 \text{ руб/мин.}$

Для пятого разряда: $m_5 = m \cdot 1,53 = 10,72 \text{ руб/мин.}$

Тарифная заработная плата (T_3) рассчитывается по формуле

$$T_3 = T_{шт} \cdot m_i \cdot K,$$

где $T_{шт}$ – норма времени, задается для каждой операции, мин.

Получаем $T_3 = T_{шт} \cdot 0,35 \times K$.

Расчет затрат на инструмент и сырье

Исходя из цены за единицу наименования и нормы расхода на одну деталь (пластина) считается сумма в рублях на изделие. Результаты расчетов представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Расчет тарифной зарплаты производственного персонала

Наименование технологической операции	Разряд рабочего	Тарифный коэффициент, К	Норма времени, $T_{шт}$, мин	Часовая тарифная ставка, m	Тарифная зарплата, T_3 , руб.
Отрезная	3	1,2	2	8,4	20
Сверлильная	3	1,2	5	8,4	42
Шлифовальная	4	1,35	5	9,46	52
Термическая	5	1,53	5	10,72	52
Очистная	3	1,2	2	8,40	20
Контрольная	4	1,35	1	9,46	10
Контрольная	4	1,35	1	9,46	10
Консервация	3	1,2	1	9,46	10
Итого					216

Расчет затрат на ремонт основного технологического оборудования

В данном случае затраты на капитальный ремонт рассчитываются по формуле

$$C_{pi} = \frac{K_{Oti} \cdot O_i \cdot p}{100 \cdot Q_{ГЗ}},$$

где K_{Oti} – балансовая стоимость единицы оборудования, руб.;

O_i – количество технологического оборудования;

p – годовая норма ремонтных отчислений, %;

$Q_{ГЗ}$ – годовое количество изделий, запускаемых в производство, шт.

Затраты на сырьё и инструменты показаны в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Затраты на сырьё и инструменты

Наименование	Норма расхода на деталь	Цена за единицу, руб.	Сумма на изделие, руб.
Инструмент			
Шлифовальный круг	1/100000 шт.	6000	0,6
Сверло	1/100 шт.	200	2,0
Сырьё			
Моющее средство МС-37	0,08 кг	20,4	1,86
Порошок хрома Х-97	0,05 кг	600	30
Полоса из стали 45	0,200 кг	300	60
Итого			92,6

Калькуляция себестоимости показана в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Калькуляция себестоимости

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Сырье, материалы и инструмент	92,6
Зарплата производственных рабочих	216
Цеховые расходы (120% от 4 + 5)	244
Накладные расходы 200% от заработной платы рабочих	436
Итого	746

Цена новой лапы к культиватору КПС-4 составляет 850 руб., себестоимость восстановленной – 746 руб. Коэффициент увеличения ресурса в 1,64 раза больше, чем у серийной стрелчатой лапы. Экономический эффект на одну лапу с учетом увеличения ресурса составит 165 руб.

По данным автора [18], в среднем в регионах Российской Федерации восстанавливают 3200 стрелчатых лап культиваторов. Таким образом, годовой экономический эффект составит 5,28 млн руб.

Выводы

1. Предложена примерная номенклатура стрелчатых лап культиваторов для восстановления креплением хромированных пластин. Разработан технологический процесс восстановления работоспособности стрелчатых лап культиваторов, который включает в себя в том числе нарезку стальной полосы, сверление отверстий, заточку лезвия, шлифование плоскости и углов заострения, очистку поверхности, диффузионное хромирование, контроль качества.

2. Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением диффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянксельмаш». Департамент растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России считает

результаты научных исследований актуальными и рекомендует организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования, а также заводам сельскохозяйственного машиностроения внедрять их для повышения надёжности и ресурса техники, а также снижения себестоимости изготовления и восстановления деталей, что особенно актуально в условиях высокой доли изношенной техники в АПК страны. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса .

2. Ожидаемый расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 5,28 млн руб. при программе восстановления 3200 стрельчатых лап культиваторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована возможность восстановления работоспособности рабочих органов культиваторов диффузионным хромированием. Описан механизм диффузионных процессов при хромировании. Теоретически обоснованы влияние основных факторов процесса рыхления грунта на тяговое усилие культиватора, а также необходимость оценки напряженного состояния конструкции культиватора.

2. Установлено, что при температуре 1100°C для углеродистых сталей 45 и У8А толщина диффузионного слоя составляет 0,015–0,019 мм, а для легированных 65Г, 30ХГСА, ХВГ – 0,025–0,030 мм на сторону. Повышение температуры до 1200°C приводит к росту толщины слоя на углеродистых сталях до 0,025–0,03 мм, для легированных – до 0,028–0,039 мм на сторону. Для образца из стали ХВГ толщиной 0,8 и 10 мм она составляет соответственно 0,038 и 0,055 мм. Максимальная микротвердость получена на образцах из сталей 65Г, 30ХГСА, ХВГ при температуре 1200°C и продолжительности хромирования 6 ч. При толщине образца из стали ХВГ 10 мм микротвердость его поверхности составила 28000 МПа, а при 0,6 мм – только 18000 МПа. Хромированные пластины из сталей 45, У8А, 08кп имеют меньшую твердость, чем образцы из сталей 65Г, 30ХГСА и ХВГ. Максимальная твердость поверхности наблюдается на образцах толщиной 0,8 мм при температуре хромирования 1200°C и выдержке в течение 6 ч.

3. Установлено, что износостойкость пластин из сталей У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 и 4 мм после диффузионного хромирования в 2,5–3 раза выше износостойкости образца закаленной стали 45. Наилучшие показатели износостойкости получены при испытаниях хромированных пластин из стали ХВГ. Износостойкость образцов после контактной приварки к ним хромированных пластин из стали У8А, 65Г и ХВГ толщиной 0,6 мм в 2–3 раза выше износостойкости образца из закаленной стали 45.

4. Наибольшие напряжения при работе культиватора наблюдаются на режущей кромке лапы и в местах ее крепления к раме. Установлено, что коэффициент запаса прочности для лапы культиватора должен быть не ниже 1,99.

5. Наименьшие тяговые усилия 162–258 Н имеет лапа культиватора с углами резания 15 и 25° и заострения 14 и 23°. Уменьшение угла заострения снижает тяговое сопротивление на 5–10%. Эксперименты со сменными пластинами показали, что уменьшение угла заострения от 35 до 14° одновременно с увеличением угла резания от 15 до 35° снижает тяговое сопротивление на 5–18%.

6. Наиболее интенсивный процесс разрыхления наблюдался у рабочего органа с углами резания 15–25° и заострения 14–23°. Наиболее равномерное рыхление массива почвы происходит при угле резания 25–30° и при угле заострения 17°.

7. Результаты полевых испытаний на износостойкость показали, что ресурс восстановленных стрелчатых лап в 1,64 раза больше, чем у серийных. Износ восстановленной лапы при наработке на одну лапу 34,5 га составил 0,8 мм, наработка восстановленной лапы до наступления предельного состояния – 72,0 га. Получено, что тяговое сопротивление и расход топлива при работе культиватора с восстановленными лапами ниже, чем с серийными в среднем в 1,25 раза. Наименьшее значение тягового сопротивления выявлено при скорости агрегата 7 км/ч, с углами резания 25° и заострения – 17°.

8. Установлено, что при обработке почвы культиватором с восстановленными лапами отклонение глубины соответствовало нормам (не более 1 см), а размеры гребней и глыб не превышали установленных значений. Функциональные потребительские свойства культиватора с восстановленными лапами соответствуют критериям постановления Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования».

9. Предложена примерная номенклатура стрелчатых лап культиваторов для восстановления работоспособности креплением хромированных пластин. Разработан технологический процесс восстановления, который включает в себя в том числе нарезку стальной полосы, сверление отверстий, заточку лезвия, шлифование плоскости и углов заострения, очистку поверхности, диффузионное

хромирование, контроль качества. Разработанная технология восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением диффузионного хромирования внедрена в ОАО «Брянксельмаш». Департамент растениеводства, механизации, химизации и защиты растений Минсельхоза России рекомендует организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования, а также заводам сельскохозяйственного машиностроения внедрять результаты исследования для повышения надёжности и ресурса техники, а также снижения себестоимости изготовления и восстановления деталей. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева.

10. Ожидаемый расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит 5,28 млн руб. при программе восстановления 3200 стрельчатых лап культиваторов.

Рекомендации производству

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуются к использованию на сервисных предприятиях при реализации технологических процессов восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Рекомендовано создавать участки по термодиффузионному хромированию деталей, а также организовать изготовление упрочненных сменных пластин (ремкомплектов) для ремонта почвообрабатывающих машин.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В дальнейшем необходимо расширить номенклатуру восстанавливаемых и упрочняемых рабочих органов почвообрабатывающих машин, в том числе посевных комплексов и сеялок. Следует продолжить исследования направленные на снижение энергоемкости и продолжительности процесса диффузионного хромирования, а также повышение его производительности и безопасности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ФНТП	Федеральной научно-технической программе развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы
АПК	агропромышленный комплекс
Минсельхоз России	Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Минпромторг России	Министерство промышленности и торговли Российской Федерации
Ассоциации «Росспецмаш»	ассоциация, объединяющая компании российского специализированного машиностроения. Объединяет компании-производителей сельскохозяйственной, строительно-дорожной техники, оборудования для пищевой промышленности, а также комплектующих
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева»
МГАУ им. В.П. Горячкина	Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина (ныне Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева»)
МИС	машиноиспытательная станция
Росстат	Федеральная служба государственной статистики

ПАО	публичное акционерное общество
АО	акционерное общество
ЗАО	закрытое акционерное общество
ОАО	открытое акционерное общество
ООО	Общество с ограниченной ответственностью
РТП	ремонтно-технической предприятие
ГИЦ	государственный испытательный центр
ОАО «АНИТИМ»	Открытое акционерное общество «Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»
ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»
ФГУП	Федеральное государственное унитарное предприятие
ФГБОУ ВО «Алтайский ГАУ»	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет»
ИН	индукционная наплавка
ТС	твёрдые сплавы
МТА	машинно-тракторный агрегат
НИАЕ	Национальный институт сельскохозяйственной техники (Великобритания)
ГНЦ	государственный научный центр
ХТО	химико-термическая обработка
ТВЧ	ток высокой частоты
ФГБОУ ВО	Федеральное государственное бюджетное образовательное

«ЮЗГУ»	учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»
ФГБОУ ВО «Брянский ГАУ»	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный аграрный университет»
ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ»	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет»
ФГБОУ ВО «СПбГАУ»	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»
СВС	Само распространяющийся высокий синтез
ИМАШ РАН	институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
«КЗ «Ростсельмаш»	Комбайновый завод «Ростсельмаш»
ЭИН	электроискровая наплавка
КВДУ	карбовибродуговое упрочнение
ЭВМ	электронно-вычислительная машина
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
ОСТ	отраслевой стандарт

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента России 21 января 2020 г. № 20). – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 24 с.
2. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 25.08.2017 № 996, с изменениями на 30 сентября 2023 г.).
3. Национальный доклад «О ходе и результатах реализации в 2024 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия». – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2025. – 104 с.
4. Буйлов, В.Н. Повышение долговечности почвообрабатывающей сельскохозяйственной техники путем восстановления и упрочнения рабочих органов наплавкой и борированием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», 2024. – 48 с.
5. Бурак, П.И., Голубев, И.Г., Мишуров, Н.П., Федоренко, В.Ф., Левшин, А.Г. Анализ функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности испытанной сельскохозяйственной техники и оборудования: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 128 с.
6. Болотина, М.Н., Мишуров, Н.П., Федоренко, В.Ф., Голубев, И.Г., Алдошин, Н.В. Сельскохозяйственная техника. Машины для обработки почвы: каталог. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 208 с.
7. Отчет о научно-исследовательской работе «Сельскохозяйственная техника. Машины для обработки почвы (заключительный). Номер гос. рег. 122110100010-3. Отв. испол. Болотина М.Н. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 245 с.

8. Липин, В.Д. Сельскохозяйственные машины. Плуги для основной обработки почвы: учеб. пособ. – СПб: ООО «Издательство Лань», 2025. – 172 с.

9. Серов, Н.В. Упрочнение плоских рабочих органов сельскохозяйственной техники электроконтактной пайкой металлической ленты: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2017. – 16 с.

10. Состояние и перспективы развития технологий повышения износостойкости и долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин. Отчет о НИР. Номер гос. рег. 122110100038-7. Отв. испол. Голубев И.Г. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 245 с.

11. Соловьев, С.А. и др. Износостойкие композиционные покрытия для рабочих органов сельхозмашин / С.А. Соловьев, В.В. Иванайский, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, В.П. Лялякин, В.Ф. Аулов. – М.: ФГБУН РАН, 2019. – 188 с.

12. Багаутдинова, И.И. Совершенствование технологии восстановления и упрочнения почвообрабатывающих рабочих органов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2023. – 20 с.

13. Фоминский, Л.П. Наплавка рабочих органов сельхозмашин с помощью электронного ускорителя / Л.П. Фоминский, М.В. Левчук, А.Ф. Вайсман [и др.] // Сварочное производство. – М., 1987. – № 1. – С. 4–6.

14. Колмыков, В.А. Восстановление рабочих органов наплавкой порошковыми материалами/ В.А. Колмыков, С.В. Ковалев // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: матер. Междунар. науч. конф. – Белгород, 2023. – С. 290.

15. Аулов, В.Ф. Наплавка токами высокой частоты износостойких покрытий для упрочнения лап культиваторов / В.Ф. Аулов, А.В. Рыбалкин, А.В. Кирейнов // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2014. – С. 166–171.

16. Михальченков, А.М. Характер изменения глубины лучевидного износа при различных вариантах армирования долотообразной области лемехов при

вспашке тяжелых почв / А.М. Михальченков, Н.Ю. Кожухова, А.А. Тюрева, В.А. Лузик // Технический сервис машин. – М., 2020. – № 4 (141). – С. 93–99.

17. Голубев, И.Г., Гольтяпин, В.Я. Повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин при их ремонте // Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации. – Рязань: ФГБОУ ВО Рязанский ГАТУ имени П.А. Костычева, 2021. – С. 166–169.

18. Титов, Н.В. Совершенствование технологии ремонта рабочих органов почвообрабатывающих орудий с применением способа карбовибродугового упрочнения: дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. – Орел, 2025. – 354 с.

19. Шитов, А.Н. Повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением импульсного электроконтактного нагрева (на примере лемеха плуга): дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М., 2005. – 162 с.

20. Бугаев, А.В. Разработка технологии упрочнения режущих рабочих органов промышленных мясорубок. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2005. – 18 с.

21. Наличие техники, энергетических мощностей в сельскохозяйственных организациях Российской Федерации в 2023 году [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Nalich_tehniki_2023.xlsx (дата обращения: 17.10.2025).

22. Ибрагимов, А.Г., Борулько, В.Г., Прохоров, И.П. Обеспеченность сельскохозяйственной техникой сельскохозяйственного производства России // Аграрная наука. – 2022. – № 3. – С. 66–69.

23. Клейменова, Ю.А., Баяндурян, Г.Л. Особенности развития сельскохозяйственного машиностроения в условиях современного санкционного давления // Аграрная наука. – 2024. – № 2. – С. 133–138.

24. Культиватор для междурядной обработки хлопчатника / Н.В. Алдошин, Р.Р. Худайкулиев, Б.Р. Курамбоев [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 8 (302). – С. 8–11.

25. Севостьянов, А.Л. Скоростной культиватор полосовой обработки почвы / А.Л. Севостьянов, В.Г. Максимов, А.А. Ветров // Техника и оборудование для села. – 2024. – № 11 (329). – С. 20–23.

26. Хисамутдинов, А.И. Культиватор с автоматической системой регулирования жесткости s-образных стоек / А.И. Хисамутдинов, И.М. Фархутдинов, В. Х. Имангулов // Российский электронный научный журнал. – 2025. – № 1 (55). – С. 484–492.

27. Севостьянов, А.Л. Культиватор strip-till: варианты, функциональные характеристики и эффективность / А.Л. Севостьянов, В.Г. Максимов, А.А. Ветров // Аграрный научный журнал. – 2025. – № 9. – С. 160–168.

28. Повышение качества поверхностной обработки почвы / С.Е. Федоров, А.А. Жалнин, Н.А. Жалнин, А.А. Полункин // Вестн. Рязанского ГАТУ им. П.А. Костычева. – 2020. – № 4 (48). – С. 121–127.

29. Кокошин, С.Н. Способ стабилизации глубины обработки почвы культиваторами с упругими стойками / С.Н. Кокошин, В.И. Ташланов // Изв. Оренбургского ГАУ. – 2020. – № 6 (86). – С. 120–124.

30. Припоров, Е.В. Сравнительный анализ культиваторов для предпосевной обработки почвы / Е.В. Припоров, И.Е. Припоров, Г.Е. Самурганов // Изв. Оренбургского ГАУ. – 2020. – № 1 (81). – С. 77–81.

31. Кокошин, С.Н. Применение регулятора жесткости в конструкциях культиваторов / С.Н. Кокошин, Д.А. Черенцов, В.И. Ташланов // Вестн. АПК Ставрополя. – 2020. – № 2-3 (38-39). – С. 4–9.

32. Петухов, Д.А. Оценка эффективности широкозахватных культиваторов отечественного производства / Д.А. Петухов, С.А. Свиридова, С.А. Семизоров // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 2 (272). – С. 40–47.

33. Результаты агротехнической и энергетической оценки культиватора для полосовой обработки почвы под технические культуры / С.Г. Мударисов,

Р.И. Аминов, А.М. Мухаметдинов [и др.] // Изв. Оренбургского ГАУ. – 2020. – № 2 (82). – С. 141–144.

34. Сабуркин, Д.А. Повышение лемеха за счет совершенствования его конструкционно-технологических параметров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. – 16 с.

35. Юдников, А.С. Скоростное электродуговое упрочнение боронитролитоированием деталей почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ГОСНИТИ, 2009. – 24 с.

36. Зайцев, С.А. Повышение износостойкости рабочих поверхностей лап культиватора газопламенным напылением с последующим оплавлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ГОСНИТИ, 2013. – 16 с.

37. Петров, М.Ю. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин композиционными материалами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2005. – 20 с.

38. Виноградов, В.В. Повышение износостойкости стрелчатых лап почвообрабатывающих орудий карбовибродуговым упрочнением их режущих поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 19 с.

39. Крупин, А.Е. Повышение износостойкости рабочих органов уборочных сельскохозяйственных машин электролитическим хромированием их поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Саранск: ФГОУ ВПО Мордовский ГУ им. Н.П. Огарева, 2015. – 19 с.

40. Михальченков, А.М., Соловьев, С.А., Новиков, А.А. Об одной причине низкого ресурса рабочих органов отечественных почвообрабатывающих орудий // Тр. ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 117. – С. 127–132.

41. Новиков, А.А. Повышение долговечности плужных лемехов их восстановлением термоупрочненными компенсирующими элементами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2017. – 19 с.

42. Кончин, В. А. Повышение эффективности процесса восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин плазменно-порошковой наплавкой твердосплавных электроэрозионных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. – Курск: ФГБОУ ВО Курский ГАУ, 2024. – 185 с.

43. Повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин [Электронный ресурс]. – URL: <https://yandex.ru/turbo/s/mehanik-ua.ru/sbornik-statej/1379-povyshenie-dolgovechnosti-rabochikh-organov-pochvoobrabatyvayushchikh-mashin.html> (дата обращения: 22.10.2025).

44. Агеева, Е.В. Повышение эффективности процесса восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин плазменно-порошковой наплавкой твердосплавных электроэрозионных материалов / Е.В. Агеева, В.И. Серебровский, Е.В. Агеев [и др.] // Технический сервис машин. – 2023. – Т. 61. – № 2 (151). – С. 84–94.

45. Козырев, В.В. Упрочнение рабочих органов машин, эксплуатируемых в условиях воздействия абразивной среды / В.В. Козырев, М.Ю. Петров // Вестн. Тверского ГТУ: науч. журнал. – Тверь: ФГОУ ВПО ТГТУ, 2004. – Вып. 4. – С. 165–167.

46. Лисунов, Е.А. Исследование износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих орудий / Е.А. Лисунов, А.В. Колпаков // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: матер. II-й

Всерос. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. – Киров: ФГОУ ВПО Вятская ГСХА, 2008. – Вып. 8. – С. 124–127.

47. Лялякин, В.П. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники / В.П. Лялякин, И.Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 4. – С. 41–43.

48. Новиков, В.С. Сравнительные исследования на долговечность серийных и опытных лемехов плуга / В.С. Новиков, Н.А. Поздняков, Д.А. Сабуркин // Междунар. науч. журнал. – 2008. – № 1. – С. 14–18.

49. Орлов, Б.Н. Прогнозирование долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2003. – 200 с.

50. Сидоров, С.А. Критерии целесообразности использования в сельхозмашинах упроченных рабочих органов // Тракторы и с.-х. машины. – 1989. – № 11. – С. 54–56.

51. Сидоров, С.А. Повышение ресурса почворезущих органов наплавочными сплавами / С.А. Сидоров, А.И. Сидоров // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2003. – № 9. – С. 20–22.

52. Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.anitim-oao.ru/> (дата обращения: 22.10.2024).

53. ЗАО «Рубцовский завод запасных частей» [Электронный ресурс]. – URL: <https://almaztd.ru/company/structure/> (дата обращения: 22.10.2025).

54. Константинов, В.М. Обеспечение самозатачивания наплавкой плужных лемехов / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, В.В. Голдыбан // Механизация и электрификация сел. хоз-ва: межведомственный тематический сб. – Минск, 2023. – С. 96–101.

55. «Агроцентр 45. ОАО «Белагромаш-Сервис имени В.М. Рязанова» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.belagromash.ru/predpriyatie.html> (дата обращения: 22.10.2020).

56. Компания «АГРОЦЕНТР» [Электронный ресурс]. – URL: <https://://featagro.ru/> (дата обращения 22.10.2024).

57. Шитов, А.Н. Повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением импульсного электроконтактного нагрева (на примере лемеха плуга): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2005. – 20 с.

58. Анализ конструктивных особенностей плужных лемехов и способы повышения их износостойкости [Электронный ресурс]. – URL: https://studref.com/510268/tehnika/analiz_konstruktivnyh_osobennostey_pluzhnyh_lemehov_sposoby_povysheniya_iznosostoykosti (дата обращения: 22.10.2020).

59. Павлов, А.А. Разработка высокопрочных износостойких и коррозионностойких биметаллических материалов, получаемых с использованием технологии электрошлаковой наплавки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01. – М.: ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», 2018. – 49 с.

60. Новиков, В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. – 38 с.

61. Модифицированные композиционные покрытия систем Fe-Cr-C-W для упрочнения рабочих органов сельхозмашин // Инновационная разработка конкурса «За успешное внедрение инноваций в сельское хозяйство» в рамках выставки «Золотая осень-2020» / ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ. – 2020. – 14 с.

62. Кидалов, Н.А., Гребнев, Ю.В., Жаркова, В.Ф., Илларионова, И.А., Буссов, М.С. Повышение ресурса деталей «лемех плуга» и «лапа культиватора» путем наплавки в литейной форме // Изв. Волгоградского ГТУ. – 2013. – № 15 (118). – С. 138-140.

63. Алтайский научно-исследовательский институт технологии машиностроения // Новые технологии АПК. – 2014. – № 10. – С. 25–26.

64. Бирюков, В.П., Исаков, В.В., Федотов, А.Ю., Баулин, Д. А. Оценка влияния режимов лазерной обработки на параметры зон закалки сталей и их износостойкость // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2020. – С. 28–35.

65. Тюрева, А.А., Феськов, С.А. Восстановление лап культиваторов методом «компенсирующих элементов» с использованием наплавочного армирования // Тр. инженерно-технологического факультета Брянского ГАУ. – 2017. – № 1 (1). – С. 101–119.

66. Юдников, А.С. Скоростное электродуговое упрочнение боронитроалитированием деталей почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ГОСНИТИ, 2009. – 12 с.

67. Чернышев, Ю.В. Разработка твердого сплава и технологии упрочнения плоских режущих органов почвообрабатывающих машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. – Курск, 2002. – 139 с.

68. Лялякин, В.П., Соловьев, С.А., Аулов, В.Ф. Состояние и перспектива упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами // Тр. ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 96–104.

69 Давлатмуродов, А.Д. Разработка метода контроля качества упрочнения деталей сельскохозяйственных машин // E-SCIО. – 2019. – № 11 (38). – С. 687–696.

70. Ситников, А.А., Яковлев, В.И., Сейдуров, М.Н., Татаркин, М.Е., Собачкин, А.В., Степанова, Н.В., Резанов, И.Ю. Структура и свойства наплавленных электродуговых покрытий из порошков механоактивированных СВС-комполитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3 (52). – С. 51–54.

71. Шовкопляс, А.В., Данилин, А.И. Упрочнение режущих поверхностей дисковых и стрелчатых рабочих органов почвообрабатывающих машин с целью уменьшения их износа и измерения его величины и характера // Вестн. Луганского национального аграрного университета. – 2019. – № 6-1. – С. 197–203.

72. Зайцев, С.А., Багринцев, О.О., Харин, М.В., Мурлыкин, Р.Ю. Разработка технологического процесса упрочнения лап культиватора газопламенным напылением с оплавлением покрытия // Сетевой научный журнал ОрелГАУ. – 2016. – № 1 (6). – С. 135–138.

73. Соловьев, С.А., Лялякин, В.П., Аулов, В.Ф., Ишков, А.В., Ивановский, В.В., Кривочуров, Н.Т., Соколов, А.В. Комбинированные упрочняющие покрытия для долот анкерных сошников сеялки Primera DMC-9000 // Тр. ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 117. – С. 159–167.

74. Технологии и оборудование ГОСНИТИ: сб. инновационной продукции. – М.: ФГБНУ ГОСНИТИ, 2015. – 84 с.

75. Черноиванов, В.И., Лялякин, В.П., Голубев, И.Г. Инновационные проекты и разработки в области технического сервиса. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 96 с.

76. Черноиванов, В.И., Лялякин, В.П., Голубев, И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 586 с.

77. Михальченков, А.М., Соловьев, Р.Ю., Бирюлина, Я.Ю. Восстановление отвалов абразивостойким дисперсионно-упрочненным композитом на основе эпоксидной смолы // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 3. – С. 49–51.

78. Филин, Ю.И. Повышение ресурса лемехов применением покрытий из абразивостойкого эпоксидно-песчаного композита: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Брянск, 2019. – 21 с.

79. Михальченков, А.М. Практическое применение эпоксидно-песчаных композитов для повышения ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию восстановленных штамповарных лемехов / А.М. Михальченков, А.И. Купреенко, Ю.И. Филин // Клеи. Герметики. Технологии. – 2018. – № 5. – С. 36–41.

80. Филин, Ю.И. Эпоксидный композит для повышения ресурса термоупрочненных лемехов // Сельский механизатор. – 2017. – № 5. – С. 36–37.

81. Михальченков, А.М. Статистический анализ износов дисков дисковых орудий / А.М. Михальченков, А.А. Тюрева, Ю.И. Филин, Н.В. Синяя // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 7. – С. 42–45.

82. Соловьев, С.А., Шахов, В.А., Аристанов, М.Г. Технология восстановления лемеха плуга фирмы LEMKEN // Тр. ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 245–248.

83. Получение износостойких электроискровых покрытий с нанокристаллической и аморфной структурой // Нанотехнологические разработки аграрных вузов. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. – С. 57–61.

84. Титов, Н.В., Коломейченко, А.В., Логачев, В.Н., Булавинцев, Р.А., Пупавцев, И.Е., Чернышов, Н.С. Исследование технического состояния стрельчатых лап посевного комплекса John Deere, упрочненных карбовибродуговым методом // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 5. – С. 30–32.

85. Зайцев, С.А., Багринцев, О.О., Харин, М.В., Мурлыкин, Р.Ю. Разработка технологического процесса упрочнения лап культиватора газопламенным напылением с оплавлением покрытия // Сетевой научный журнал ОрелГАУ. – 2016. – № 1 (6). – С. 135–138.

86. Егоров, А.А., Ружьев, В.А., Ожегов, Н.М. Разработка конструкции установки для плазменного напыления покрытий, повышающих долговечность рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов // Вестн. студенческого научного общества. – 2017. – Т. 8. – № 2. – С. 19–21.

87. Бондарева Г.И., Кузнецов Ю.А., Виноградов В.В., Волкова И.Л., Павленко Т.Г., Горбатенко А.И. Упрочнение рамной конструкции машин и орудий для освоения бросовых сельскохозяйственных земель // Сельский механизатор. – 2022. – № 8. – С. 26–29.

88. Кашфуллин, А.М. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин путем нанесения износостойких покрытий дуговой металлизацией: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Пермь, 2017. – 131 с.

89. АО «НИТИ имени П.И. Снегирёва» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.aoniti.r/> (дата обращения: 02.11.2024).

90. Петров, М.Ю. Разработка наплавочного материала для восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин // Достижение устойчивого развития сельскохозяйственного производства Верхневолжья в XXI веке: матер. XXIII науч.-практ. конф. – Тверь: ТГСХА, 2000. – С. 132–134.

91. Виноградов, В.В. Анализ перспективных способов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин / Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.В. Виноградов // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 10. – С. 33–36.

92. Михальченков, А.М. Влияние твердости термоупрочненной стали 65Г на износостойкость и ресурс плужных лемехов / А.М. Михальченков, А.А. Новиков // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 8. – С. 45–48.

93. Шарифуллин, С.Н. Наноструктурирование износостойких покрытий рабочих органов сельскохозяйственных машин методом виброплазменной обработки // Технический сервис машин. – М., 2022. – № 2 (147). – С. 104–112.

94. Ткачев, В.Н. Повышение долговечности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин / В.Н. Ткачев, И.Л. Коган // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – М., 1969. – № 8. – С. 32–33.

95. Загоруйко, А.Ф. Исследование износа рабочих органов дисковых лущильников и разработка мероприятий по повышению их износостойкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – зерноград, 1973. – 210 с.

96. Агеев, Е.В. Повышение эффективности процесса восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин плазменно-порошковой наплавкой твердосплавных электроэрозионных материалов / Е.В. Агеева, В.И. Серебровский, Е.В. Агеев, В.А. Кончин // Технический сервис машин. – М., 2023. – № 2 (151). – С. 84–94.

97. Агеева, Е.В. Оценка износостойкости плазменных покрытий лап культиваторов / Е.В. Агеева, В.В. Серебровский, В.А. Семькин, В.А. Кончин // Технический сервис машин. – М., 2023. – Т. 61. – № 4 (153). – С. 83–89.

98. Агеев, Е.В. Технология восстановления и упрочнения лемехов плугов электродуговой наплавкой с использованием твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов // Тр. ГОСНИТИ. – М., 2013. – Т. 111. – № 2. – С. 176–178.

99. Крюковская, Н.С. Сравнительный анализ методов упрочнения стрельчатых лап культиваторов // Технический сервис машин. – 2020. – Т. 58. – №3 (140). – С. 68–78.

100. Дудников, А.А., Беловод, А.И., Пасюта, А.Г., Келемеш, А.А., Горбенко, А.В. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 5. – № 1 (25). – С. 4–7.

101. Лапы культиваторные. Завод ООО «Гранит Агро» [Электронный ресурс]. – URL: <https://granit-agro.ru/about.html> (дата обращения: 19.04.2024).

102. Запчасти для сельхозтехники. ООО НПП «ВАЛОК» [Электронный ресурс]. – URL: <https://xn--80adzdp.xn--p1ai/7-zapchasti-dlya-selkhoz-tekhniki> (дата обращения: 19.04.2024).

103. Российский производитель почвообрабатывающей сельскохозяйственной техники и запасных частей под торговым брендом (маркой) «SKR» [Электронный ресурс]. – URL: <https://skr-grup.ru/company/> (дата обращения: 19.04.2025).

104. Алтайские машиностроительные заводы. «Алмаз». Почвообрабатывающая техника от производителя. Запасные части [Электронный ресурс]. – URL: <https://almaztd.ru/> (дата обращения: 19.04.2025).

105. Багринцев, О.О. Технология упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин металлокерамическими покрытиями, содержащими карбид вольфрама: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М., 2022. – 146 с.

106. Байниязова, А.Т. Виброплазменное упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин / А.Т. Байниязова, М.М. Абжаев, Е.Ю. Кудряшова [и др.] // Технический сервис машин. – 2020. – № 1 (138). – С. 132-142.

107. Беликов, И.А. Повышение долговечности рабочих органов плуга керамическими материалами: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М., 2002. – 176 с.

108. Константинов, В.М. Обеспечение самозатачивания наплавкой плужных лемехов / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, В.В. Голдыбан // Механизация и электрификация сел. хоз-ва: межведомственный тематический сб. – Минск, 2023. – С. 96–101.

109. Ожегов, Н.М. Методы устойчивого самозатачивания почворезущих поверхностей деталей / Н.М. Ожегов, В.А. Ружьев, Д.А. Капошко // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сб. науч. тр. – СПб, 2018. – С. 371-377.

110. Антонов, А.А. Повышение износостойкости и долговечности рабочих органов плугов // Направления развития технического сервиса: матер. Всерос. студенческой науч.-практ. конф. – 2021. – С. 4–7.

111. Шемякин, А.В., Стекольников, Ю.А., Успенский, И.А., Юхин, И.А., Фомин, С.Д., Пухов, Е.В., Кутыраев, А.А. Гальванические покрытия FE-Ni-P для восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники и технологического оборудования // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 3 (75). – С. 302–309.

112. Петров, М.Ю. Разработка наплавочного материала для восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин // Достижение устойчивого развития сельскохозяйственного производства Верхневолжья в XXI веке: матер. XXIII науч.-практ. конф. – Тверь: ТГСХА, 2000. – С. 132–134.

113. Козырев, В.В., Петров, М.Ю., Петров, А.Ю. Свойства металлизированных порошков технической керамики для восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин // Проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса Тверского региона: сб. науч. тр. – Тверь: ТГСХА.

114. Петров, М.Ю. Повышение ресурса почворезущих деталей сельскохозяйственных машин // Кадровые ресурсы и сберегающие технологии в

агропромышленном комплексе: матер, науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Тверь: ФГОУ «Тверской ИПК АПК», 2002. – С. 244-246.

115. Медовник, А.Н. Экспериментальные и теоретические исследования работы рабочих органов универсального безотвального плуга / А.Н. Медовник, Б.Ф. Тарасенко, С.А. Горовой // Политематический сетевой электронный науч. журнал КубГАУ. – Краснодар, 2010. – № 61. – С. 100-107.

116. Волков, А.А. Повышение износостойкости рабочих органов сельскохозяйственной техники методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – 20 с.

117. Бирюков, В.П. Повышение износостойкости при лазерной обработке почвообрабатывающих орудий // Тр. ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107. – Ч. 2. – С. 105–106.

118. Буйлов, В.Н. Ремонт рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов: монография / В.Н. Буйлов, И.В. Люляков. – Саратов, 2007. – 134 с.

119. Голубев, И.Г. Восстановление рабочих органов сельскохозяйственных машин // Техника и оборудование для села. – 1998. – № 3. – С. 39-42.

120. Голубев, И.Г. Опыт и экономическая эффективность изготовления запасных частей к зарубежной сельскохозяйственной технике на российских предприятиях / И.Г. Голубев, М.В. Дулясова, В.В. Быков [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2024. – № 9 (327). – С. 46–48.

121. Голубина, С.А. Повышение износостойкости отвалов плугов полуавтоматической вибродуговой наплавкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Калуга, 2016. – 138 с.

122. Гончаренко, В.В. Технология восстановления и упрочнения лемехов плугов металлокерамическими пластинами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М., 2007. – 159 с.

123. Грядунов, С.С. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон / С.С. Грядунов, В.В. Сиваков // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31. – № 4. – С. 544–558.

124. Задорожний, Р.Н. Повышение износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин вторичными твердосплавными материалами / Р.Н. Задорожний, И.В. Романов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – Т. 18. – № 1 (205). – С. 24-27.

125. Иванайский, В.В. Новая технология индукционно-дуговой наплавки для упрочнения носка стрельчатой лапы сеялки СЗС-2,1 / В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, А.В. Ишков [и др.] // Вестн. Алтайского ГАУ. – 2021. – № 1 (195). – С. 106–114.

126. Бугаев, В.Н. Восстановление деталей и повышение ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей диффузионной металлизацией: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03. Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1987. – 350 с.

127. Ерохин, М.Н., Казанцев, С.П. Диффузионные покрытия в ремонтном производстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2006. – 124 с.

128. Ерохин, М.Н., Казанцев, С.П., Пастухов, А.Г., Скороходов, Д.М., Логачев, К.М. Деформация прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей при восстановлении методом диффузионной металлизации // С.-х. машины и технологии. – 2022. – Т. 16. – № 3. – С. 4–11.

129. Казанцев, С.П., Логачёв, К.М. Технология восстановления и упрочнения распылителей форсунок автотракторных дизелей химической парофазной металлизацией // Междунар. науч. конф. молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: сб. матер. – М., 2023. – С. 472–478.

130. Дубинин, Г.Н. Насыщение поверхности сплавов металлами и возникающие при этом свойства. Повышение долговечности машин. – М.: Машгиз, 1956. – 230 с.

131. Дубинин, Г.Н. Диффузионное хромирование металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1964. – 452 с.

132. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1965. – 492 с.

133. Taub, A.P., Aladog, E., Cakmak, L., Timucin, M. Kinetic analysis's of the mechanism of chromising process instee // Appl Mater Ris. – 1968. – № 5. – Pp. 138–142, 188, 189–190.

134. Кочетов, Э.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники диффузионным хромированием с применением термоциклической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1992. – 208 с.

135. Богачев, Б.А. Восстановление распределительных форсунок автотракторных дизелей диффузионным контактными хромированием в вакууме: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1988. – 299 с.

136. Мазаев, Ю.В. Исследование работоспособности и надежности распылителей форсунок энергооснащенных тракторов, восстановленных диффузионным титанированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1982. – 154 с.

137. Давиденко, Е.А. Повышение надежности топливного насоса типа НД восстановлением деталей регулятора скорости титанированием в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1984. – 102 с.

138. Сергеев, В.З. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионным хромированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1985. – 220 с.

139. Гусейнов, А.Г. Восстановление плунжерных пар топливного насоса УТН-5 парофазным диффузионным хромированием в вакууме с последующей механической обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1987. – 260 с.

140. Казанцев, С.П. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионными хромонитридными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: МИИСП, 1988. – 216 с.

141. Ильин, В.К. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники методами термодиффузионного насыщения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2004. – 24 с.

142. Бугаев, А.В. Разработка технологии упрочнения режущих рабочих органов промышленных мясорубок: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2005. – 173 с.

143. Патент на изобретение RU 2282677 C1, МПК C23C 10/12 (2006.01). Способ упрочнения деталей: № 2005102999/02: заявл. 08.02.2005: опубл. 27.08.2006 / Богачев Б.А., Бугаев А.В.

144. Герцрикен, С.Д., Дехтяр, И.Я. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе. – М.: Физмат, 1960. – 564 с.

145. Зайт, В. Диффузия в металлах. – М.: Иностранная литература, 1958. – 500 с.

146. Дидманидзе, О.Н., Бугаев, А.В., Макаров, А.А. Физические основы рыхления почвы лапой культиватора // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 12. – С. 39–42.

147. Синеоков, Г.Н., Панов, И.В. Теория и расчёт почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.

148. Макаров, А.А., Леонтьев, Ю.П. Особенности деформации грунта при объемном рыхлении // Доклады ТСХА: сб. вып. 293. – Ч. I. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2021. – С. 224–227.

149. Современная агроинженерия // В.И. Трухачев, О.Н. Дидманидзе, М.Н. Ерохин [и др.]. – М.: ООО «Мегаполис», 2022. – 416 с.

150. Зеленин, А.Н., Баловнев, В.И., Керов, И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.

151. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971. – 360 с.

152. Дидманидзе, О.Н., Бугаев, А.В., Макаров А.А. Анализ факторов, влияющих на износ лапы культиватора // Российская с.-х. наука. – 2025. – № 6. – С. 60–65.

153. Научные основы обеспечения эффективности технической эксплуатации перспективных транспортно-технологических машин / О.Н. Дидманидзе, А.М. Карев, Н.Н. Пуляев, Д.Г. Асадов. – М.: ООО «УМЦ Триада», 2008. – 116 с.

154. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, С.В. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

155. РТМ 23.2.11-70. Расчет изнашивающихся деталей сельскохозяйственных машин. – М.: ВИСХОМ, 1971. – 88 с.

156. Севернев, М.М. Износ деталей сельскохозяйственных машин [текст]. – Л.: Колос, 1972. – 288 с.

157. Сидоров, С.А. Методика расчета на износостойкость моно- и биметаллических почворезущих рабочих органов [текст] // Тракторы и с.-х. машины. – 2003. – № 12. – С. 35–39.

158. Бугаев, А.В., Дидманидзе, О.Н., Абдулмажидов, Х.А., Парлюк, Е.П., Бышов, Д.Н. Разработка конструкции культиватора и анализ его напряженного состояния в системе Inventor Pro // Изв. НВ АУК. – 2026. – № 1 (85). – С. 55–49.

159. Дидманидзе, О.Н., Абдулмажидов, Х.А., Бугаев, А.В. Разработка конструкции, прочностные расчеты и оптимизация формы лапы культиватора в системе inventor pro // Вестн. Рязанского ГАТУ имени П.А. Костычева. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 117–124.

160. Дидманидзе О.Н., Бугаев А.В., Абдулмажидов Х.А. Исследования износа лапы культиватора при взаимодействии с почвогрунтовой средой в системе INVENTOR PRO // Международный технический журнал. – 2025. – № 5 (99). – С. 58–65.

161. Лопарев, Д.В. и др. Результаты испытаний распределительных устройств лапового сошника стерневой сеялки // Вестн. Курганской ГСХА. –2021. – № 4 (40). – С. 67-72.

162. Дидманидзе, О.Н., Пляка, В.И. Лабораторно-полевые испытания экспериментальной сеялки для сплошного посева газонных трав: определение показателей качества // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26. – № 6. – С. 44–48.

163. Дидманидзе, О.Н., Бугаев, А.В., Абдулмажидов, Х.А. Применение метода конечных элементов при исследовании прочности лапы культиватора // Междунар. техн. журнал. – 2025. – № 1 (95). – С. 37–47.

164. Драгуленко, В.В. и др. Построение развёртки Г-образного ножа ротационного культиватора // Изв. Оренбургского ГАУ. – 2022. – № 2 (94). – С. 79–82.

165. Васильев, А.А. и др. Совершенствование рабочих органов культиватора для локального внесения минеральных удобрений // Вестн. Омского ГАУ. – 2022. – № 1 (45). – С. 20–29.

166. Бибутов, Н.С. и др. Обоснование конструктивно-технологических параметров стойки рабочего органа глубокорыхлителя почвообрабатывающих машин // Вестн. машиностроения. – 2024. – Т. 103. – № 9. – С. 718–726.

167. Кудрявцев, А.В., Блинов, Ф.Л., Фирсов, А.С., Голубев, В.В. Результаты исследования взаимодействия инновационного рабочего органа с почвой залежных земель при возделывании лубяных сельскохозяйственных культур // АгроЭкоИнженерия. – 2025. – № 2 (123). – С. 83–99.

168. Шмыков, С.Н., Ипатов, А.Г., Новикова, Л.Я. Эффективность различных способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин на примере стрельчатой лапы культиватора // Вестн. Ижевской ГСХА. – 2022. – № 1 (69). – С. 64–71.

169. Техническая инструкция по эксплуатации вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 ИЗ. – М.: МЗЭТО, 1986. – 20 с.

170. Техническое описание и инструкция по эксплуатации микротвердомера ПМТ-3. – Л.: ЛОМО, 1985. – 30 с.

171. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: программирование, введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 282 с.

172. Алдошин, Н.В. Исследования прочностных характеристик почвы / Н.В. Алдошин, А.С. Васильев, В.В. Голубев // Вестн. Рязанского ГАТУ имени П.А. Костычева. – 2020. – № 3 (47). – С. 68–73.

173. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

174. Федоренко, В.Ф. Технологии, техника и оборудование для координатного (точного) земледелия / В.Ф. Федоренко, В.И. Балабанов и др.: учеб. для вузов. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 240 с.

175. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В.Ф. Бабков, В.М. Безрук. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

176. Бондарев, А.Г. Переуплотнение пахотных почв / А.Г. Бондарев, В.А. Русанов, В.В. Медведев // Науч. совет по пробл. почвоведения и мелиорации Ин-та почвоведения и фотосинтеза. – М.: Наука, 1987. – С. 205–209.

177. Алпатьев, А.М. Влагооборот культурных растений. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 132 с.

178. Цветков, И.В. Исследование фрактальных характеристик обработанного грунта / И.В. Цветков и др. // Логистика, транспорт, экология – 2017: матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Ереван, 2017. – С. 106–115.

179. Цветков, И.В. Оценка эффективности рыхления грунта методом фрактального анализа / И.В. Цветков, А.Н. Насонов, А.А. Макаров, И.М. Жогин, Х.А. Абдужаббаров, М.М. Камалов, Ю.П. Леонтьев // Экологические аспекты мелиорации, гидротехники и водного хозяйства АПК: матер. Междунар. науч. конф. – М.: ВНИИА, 2017. – С. 379–384.

180. Дидманидзе, О.Н. Применение метода конечных элементов при исследовании прочности лапы культиватора / О.Н. Дидманидзе, А.В. Бугаев, Х.А. Абдулмажидов // Междунар. техн. журнал. – 2025. – № 1 (95). – С. 37–47.

181. Дидманидзе, О.Н. Исследования износа лапы культиватора при взаимодействии с почвогрунтовой средой в системе Inventor Pro / О.Н. Дидманидзе, А.В. Бугаев, Х.А. Абдулмажидов // Междунар. техн. журнал. – 2025. – № 5 (99). – С. 58–65.

182. Бугаев, А.В., Балабанов, В.В., Макаров, А.А. Влияние параметров универсальной стрельчатой лапы культиватора на рабочий процесс // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 1. – С. 15–19.

183. Протокол № 14–71–2013 (9140036) от 10 апреля 2014 г. сравнительных испытаний стрельчатых лап // ФГБУ «Центрально-Черноземная государственная зональная машиноиспытательная станция». Курск, 2014. – 26 с.

184. Положение об организации работ по определению функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740 «Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования»).

185. Определение функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования [Электронный ресурс]. – URL: <https://mcx.gov.ru/ministry/departments/department-rasteniievodstva-mekhanizatsii-khimizatsii-i-zashchity-rasteniy/> industry-information/info-opredelenie-funktsionalnykh-kharakteristik-potrebitelskikh-svoystv-i-effektivnosti-selskokhozyay (дата обращения: 12.02.2025).

186. Приказ Минсельхоза России от 18 декабря 2018 г. №573 «Способы проведения испытаний для определения функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования федеральными государственными бюджетными учреждениями, осуществляющими проведение испытаний машин и оборудования агропромышленного комплекса, находящимися в ведении Министерства сельского хозяйства Российской Федерации».

187. Производители сельхозтехники [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosspetsmash.ru/proizvoditeli-selkhoztekhniki> (дата обращения: 01.11.2025).

188. Справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства. – Ч. I. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. – 372 с.

189. Культиваторы серии КСПО Light [Электронный ресурс]. – URL: <https://featagro.ru/catalog/kultivatoryi/kultivatoryi-FeatAgro-LIGHT-serii-kspo?ysclid=lbah6qwf5w595257768> (дата обращения: 10.11.2025).

190. Культиватор предпосевной стерневой КПС-6 [Электронный ресурс]. – URL: <https://belagromash.ru/catalog/кпс6/> (дата обращения: 10.11.2025).

191. Коломейченко, А.В. Повышение ресурса стрелчатых лап почвообрабатывающих орудий металлокерамическими покрытиями: моногр. / А.В. Коломейченко, Н.В. Титов, В.В. Виноградов. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – 172 с.

192. Титов, Н.В. Технология карбовибродугового упрочнения и целесообразность её использования в агропромышленном комплексе // Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев [и др.] // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 1 (33). – С. 117–124.

193. Шпилько, А.В. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / Под ред. А.В. Шпилько. – М.: Прогресс – Академия, 1998. – 220 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ДУБЛИКАТ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2282677

СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Патентообладатель(ли): *Богачев Борис Александрович (RU),
Бугаев Александр Вячеславович (RU)*

Автор(ы): *Богачев Борис Александрович (RU), Бугаев
Александр Вячеславович (RU)*

Заявка № 2005102999

Приоритет изобретения 08 февраля 2005 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 27 августа 2006 г.

Срок действия патента истекает 08 февраля 2025 г.

Дубликат выдан Федеральной службой по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам 20.02.2007

Руководитель

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 236692

Лапа культиватора

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Тойгамбаев Серик Кокибаевич (RU), Дидманидзе Отари Назирович (RU), Бугаев Александр Вячеславович (RU), Парлюк Екатерина Петровна (RU)*

Заявка № 2025113828

Приоритет полезной модели 23 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 18 августа 2025 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 23 мая 2035 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Ссылка на документ: 00426700630066104161030002026
Инициалы: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен до: 03.10.2025

Ю.С. Зубов



3.1 Результаты измерения микротвердости образцов стальной пластины в зависимости от режимов диффузионного хромирования (продолжительность 2 ч)

Марка стали	Толщина	Режим диффузионного хромирования	Микротвердость, МПа
1	2	3	4
Ст. 45	0,8	Исходное состояние	1881–2258
		1100°С	1995–2762
		1150°С	4723–6142
		1200°С	7672–9431
Ст. 45	0,6	Исходное состояние	1810–2307
		1100°С	2258–3041
		1150°С	4723–6597
		1200°С	8311–9431
Ст. 45	0,4	Исходное состояние	1845–2211
		1100°С	2463–2896
		1150°С	4581–5732
		1200°С	7672–8661
У8А	0,8	Исходное состояние	1340–2120
		1100°С	2577–3118
		1150°С	5191–6597
		1200°С	8311–9431

Продолжение приложения 3.1

1	2	3	4
У8А	0,6	Исходное состояние	1995–2165
		1100°С	2828–3118
		1150°С	5363–7982
		1200°С	8311–9431
У8А	0,4	Исходное состояние	2161–2211
		1100°С	1995–4072
		1150°С	4445–6597
		1200°С	7672–9034
08КП	0,8	Исходное состояние	1340–1385
		1100°С	1508–2762
		1150°С	3280–3744
		1200°С	4732–6142
08КП	0,6	Исходное состояние	1190–1363
		1100°С	1535–2357
		1150°С	2967–4445
		1200°С	4191–5732
08КП	0,4	Исходное состояние	1190–1508
		1100°С	1776–3118
		1150°С	1881–3744
		1200°С	4072–5363

Окончание приложения 3.1

1	2	3	4
65Г	0,8	Исходное состояние	2577–2829
		1100°С	3541–4872
		1150°С	6142–7982
		1200°С	11871–13120
65Г	0,6	Исходное состояние	2698–2967
		1100°С	4072–4191
		1150°С	6142–7672
		1200°С	10793–13120
65Г	0,4	Исходное состояние	2698–2762
		1100°С	3118–3849
		1150°С	5543–7672
		1200°С	8311–11313
ХВГ	0,8	Исходное состояние	3644–7982
		1100°С	5363–8661
		1150°С	7672–9034
		1200°С	8661–10793

3.2 Результаты измерения микротвердости стальной пластины ленты в зависимости от режимов диффузионного хромирования (продолжительность 4 ч)

Марка стали	Толщина	Режим диффузионного хромирования	Микротвердость, МПа
1	2	3	4
Ст. 45	0,8	Исходное состояние	1881–2258
		1100°С	9034–10308
		1150°С	9854–10793
		1200°С	9431–10793
Ст. 45	0,6	Исходное состояние	1810–2307
		1100°С	9034–9854
		1150°С	9431–10308
		1200°С	9854–10793
Ст. 45	0,4	Исходное состояние	1845–2211
		1100°С	7982–9854
		1150°С	9034–9854
		1200°С	9431–10308
У8А	0,8	Исходное состояние	1340–2120
		1100°С	8661–9854
		1150°С	9431–10308
		1200°С	9431–10308

Продолжение приложения 3.2

1	2	3	4
У8А	0,6	Исходное состояние	1995–2165
		1100°С	8661–9431
		1150°С	8661–9854
		1200°С	9854–10308
У8А	0,4	Исходное состояние	2161–2211
		1100°С	8661–9854
		1150°С	9854–10308
		1200°С	9431–10308
08КП	0,8	Исходное состояние	1340–1385
		1100°С	7672–8661
		1150°С	8661–9431
		1200°С	8661–10308
08КП	0,6	Исходное состояние	1190–1363
		1100°С	7380–8311
		1150°С	8661–9431
		1200°С	8311–9854
08КП	0,4	Исходное состояние	1190–1508
		1100°С	6597–7982
		1150°С	8311–9304
		1200°С	7982–9854

Окончание приложения 3.2

1	2	3	4
65Г	0,8	Исходное состояние	2577–2829
		1100°С	10793–11871
		1150°С	11313–12472
		1200°С	11313–13120
65Г	0,6	Исходное состояние	2698–2967
		1100°С	9854–11871
		1150°С	11313–12472
		1200°С	11313–12472
65Г	0,4	Исходное состояние	2698–2762
		1100°С	9854–11871
		1150°С	11313–12472
		1200°С	11313–12472
ХВГ	0,8	Исходное состояние	3644–7982
		1100°С	11313–12472
		1150°С	11871–13120
		1200°С	12472–13820

3.3 Результаты измерения микротвердости стальной пластины в зависимости от режимов диффузионного хромирования (продолжительность 6 ч)

Марка стали	Толщина	Режим диффузионного хромирования	Микротвердость, МПа
1	2	3	4
Ст. 45	0,8	Исходное состояние	1881–2258
		1100°С	10308–11313
		1150°С	12472–13820
		1200°С	11871–13820
Ст. 45	0,6	Исходное состояние	1810–2307
		1100°С	10793–11871
		1150°С	12472–13120
		1200°С	11871–16290
Ст. 45	0,4	Исходное состояние	1845–2211
		1100°С	10308–10793
		1150°С	12472–13120
		1200°С	11871–16290
У8А	0,8	Исходное состояние	1340–2120
		1100°С	10308–11313
		1150°С	11871–13120
		1200°С	11871–13120

Продолжение приложения 3.3

1	2	3	4
У8А	0,6	Исходное состояние	1995–2165
		1100°С	9854–11313
		1150°С	12472–13120
		1200°С	11871–13120
У8А	0,4	Исходное состояние	2161–2211
		1100°С	10308–10793
		1150°С	11871–13120
		1200°С	11871–13820
08КП	0,8	Исходное состояние	1340–1385
		1100°С	7672–7982
		1150°С	8661–10308
		1200°С	9431–10308
08КП	0,6	Исходное состояние	1190–1363
		1100°С	7672–8311
		1150°С	8311–10308
		1200°С	9431–10308
08КП	0,4	Исходное состояние	1190–1508
		1100°С	7982–8661
		1150°С	8661–9854
		1200°С	9431–9854

Окончание приложения 3.3

1	2	3	4
65Г	0,8	Исходное состояние	2577–2829
		1100°С	13120–15398
		1150°С	13820–15398
		1200°С	14577–17263
65Г	0,6	Исходное состояние	2698–2967
		1100°С	12472–14577
		1150°С	13120–15398
		1200°С	13120–18325
65Г	0,4	Исходное состояние	2698–2762
		1100°С	12472–14577
		1150°С	13120–15398
		1200°С	14572–17236
ХВГ	0,8	Исходное состояние	3644–7982
		1100°С	13120–16290
		1150°С	13820–17236
		1200°С	15398–19488

4.1 Результаты измерения твердости стальной пластины в зависимости от режимов диффузионного хромирования (продолжительность 2 ч)

Марка стали	Толщина	Режим диффузионного хромирования	Твердость, HRN ₁₅
1	2	3	4
Ст. 45	0,8	Исходное состояние	32–51
		1100°C	30–41
		1150°C	26–29,5
		1200°C	34–37
Ст. 45	0,6	Исходное состояние	43,5–53
		1100°C	35–45
		1150°C	26,5–48
		1200°C	15–21,5
Ст. 45	0,4	Исходное состояние	31–45
		1100°C	30–42,5
		1150°C	29,5–42,5
		1200°C	10,5–21,5
У8А	0,8	Исходное состояние	36–55,5
		1100°C	32,5–51
		1150°C	36–50
		1200°C	21–41

Продолжение приложения 4.1

1	2	3	4
У8А	0,6	Исходное состояние	53–56
		1100°С	41,5–47
		1150°С	44–51
		1200°С	37–53
У8А	0,4	Исходное состояние	53–55
		1100°С	39,5–43,5
		1150°С	42–50,5
		1200°С	37–53
08КП	0,8	Исходное состояние	34–45
		1100°С	21,5–30
		1150°С	14,5–19
		1200°С	21–43
08КП	0,6	Исходное состояние	35–42
		1100°С	20–28
		1150°С	10,5–21,5
		1200°С	13,5–18,5
08КП	0,4	Исходное состояние	30–40
		1100°С	20–28
		1150°С	8,5–20,5
		1200°С	15,5–28

Окончание приложения 4.1

1	2	3	4
65Г	0,8	Исходное состояние	61–69
		1100°С	50–60,5
		1150°С	58–64
		1200°С	51–59
65Г	0,6	Исходное состояние	64–69
		1100°С	55–58
		1150°С	42–58
		1200°С	37–44
65Г	0,4	Исходное состояние	65–69
		1100°С	50–55,5
		1150°С	50–57
		1200°С	38–48
ХВГ	0,8	Исходное состояние	75–88
		1100°С	69–81
		1150°С	63–81
		1200°С	78–80

4.2 Результаты измерения твердости стальной пластины в зависимости от режимов диффузионного хромирования (продолжительность 4 ч)

Марка стали	Толщина	Режим диффузионного хромирования	Твердость, HRN ₁₅
1	2	3	4
Ст. 45	0,8	Исходное состояние	32–51
		1100°С	20–45
		1150°С	35–43
		1200°С	30–45
Ст. 45	0,6	Исходное состояние	43,5–53
		1100°С	16–31
		1150°С	25–30
		1200°С	22–41
Ст. 45	0,4	Исходное состояние	31–45
		1100°С	20–32,5
		1150°С	30–31
		1200°С	20–42
У8А	0,8	Исходное состояние	36–55,5
		1100°С	21–52
		1150°С	19–38
		1200°С	40–50
У8А	0,6	Исходное состояние	53–56
		1100°С	22–42
		1150°С	20–32
		1200°С	24–39,5

Продолжение приложения 4.2

1	2	3	4
У8А	0,4	Исходное состояние	53–55
		1100°С	47–50
		1150°С	22–50
		1200°С	24–39,5
08КП	0,8	Исходное состояние	34–45
		1100°С	16–27
		1150°С	15–21
		1200°С	10–21
08КП	0,6	Исходное состояние	35–42
		1100°С	15–26
		1150°С	17–21
		1200°С	19–22
08КП	0,4	Исходное состояние	30–40
		1100°С	15–29
		1150°С	15–31
		1200°С	15,5–19
65Г	0,8	Исходное состояние	61–69
		1100°С	59–65
		1150°С	48–61
		1200°С	29–50
65Г	0,6	Исходное состояние	64–69
		1100°С	41–50
		1150°С	34–58
		1200°С	39–42

Окончание приложения 4.2

1	2	3	4
65Г	0,4	Исходное состояние	65–69
		1100°С	48–53
		1150°С	43–56
		1200°С	44–51
ХВГ	0,8	Исходное состояние	75–88
		1100°С	79–81
		1150°С	79–81,5
		1200°С	77–81

4.3 Результаты измерения твердости стальной пластины в зависимости от режимов диффузионного хромирования (продолжительность 6 ч)

Марка стали	Толщина	Режим диффузионного хромирования	Твердость, HRN ₁₅
1	2	3	4
Ст. 45	0,8	Исходное состояние	32–51
		1100°C	30–51
		1150°C	20–40
		1200°C	36–42
Ст. 45	0,6	Исходное состояние	43,5–53
		1100°C	27–39
		1150°C	25–42
		1200°C	10–35
Ст. 45	0,4	Исходное состояние	31–45
		1100°C	28–42
		1150°C	20–30
		1200°C	31–38
У8А	0,8	Исходное состояние	36–55,5
		1100°C	20–43
		1150°C	17–26,5
		1200°C	19–30

Продолжение приложения 4.3

1	2	3	4
У8А	0,6	Исходное состояние	53–56
		1100°С	21–38,5
		1150°С	37–40
		1200°С	32–39
У8А	0,4	Исходное состояние	53–55
		1100°С	21,5–30
		1150°С	32–41
		1200°С	30–35
08КП	0,8	Исходное состояние	34–45
		1100°С	18–22
		1150°С	11–21
		1200°С	10–26
08КП	0,6	Исходное состояние	35–42
		1100°С	16–25
		1150°С	12–18
		1200°С	11–26
08КП	0,4	Исходное состояние	30–40
		1100°С	19–22
		1150°С	15–25
		1200°С	11–24

Окончание приложения 4.3

1	2	3	4
65Г	0,8	Исходное состояние	61–69
		1100°С	42–61
		1150°С	42–61
		1200°С	53–64
65Г	0,6	Исходное состояние	64–69
		1100°С	40–60
		1150°С	44–68
		1200°С	53–61
65Г	0,4	Исходное состояние	65–69
		1100°С	42,5–62
		1150°С	40–62
		1200°С	40–60
ХВГ	0,8	Исходное состояние	75–88
		1100°С	78–81
		1150°С	78–81
		1200°С	78–82

Результаты исследования напряженного состояния
лапы культиватора в системе Inventor Pro

Настройки сети:

Средний размер элемента (дробное значение от диаметра модели)	0,1
Минимальный размер элемента (дробное значение от среднего размера)	0,2
Коэффициент разнородности	1,5
Максимальный угол поворота	60°
Создать изогнутые элементы сетки	Да

Материал(-ы):

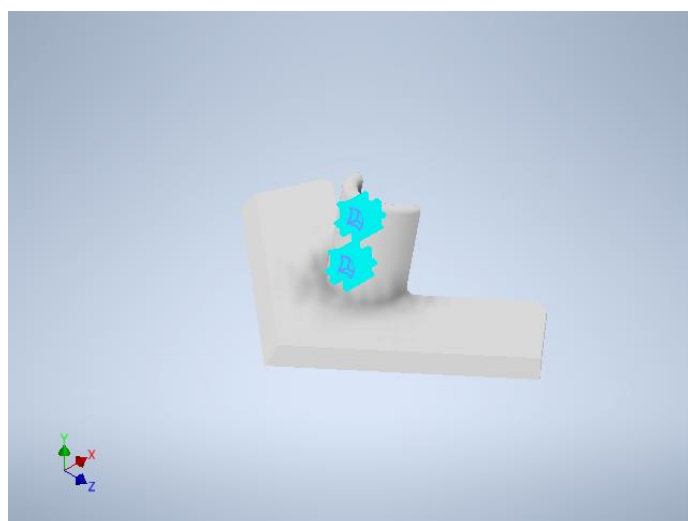
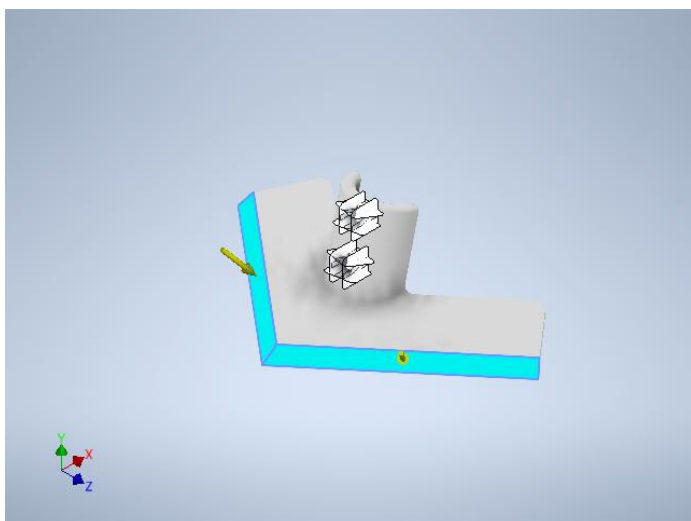
Имя	Сталь	
Общие	Массовая плотность	7,85 г/см ³
	Предел текучести	207 МПа
	Окончательный предел прочности растяжения	345 МПа
Напряжение	Модуль Юнга	210 ГПа
	Коэффициент Пуассона	0,3 бр
	Модуль упругости при сдвиге	80,7692 ГПа
Наименование деталей	Лапка культиватора.ipt	

Рабочие условия

Сила: 1

Тип нагрузки	Сила, Н
Величина	1500,000
Вектор X	812,513
Вектор Y	-1060,660
Вектор Z	681,779

Выбранные грани



Результаты прочностного расчета лапы культиваторов системе Inventor Pro

Сила и момент реакции в зависимостях

Имя зависимости	Сила реакции		Реактивный момент	
	Величина	Компонент (X, Y, Z)	Величина	Компонент (X, Y, Z)
Зависимость фиксации: 1	1336,11 Н	-812,513 Н	64,7166 Н м	0 Н м
		1060,66 Н		0 Н м
		0 Н		-64,7166 Н м

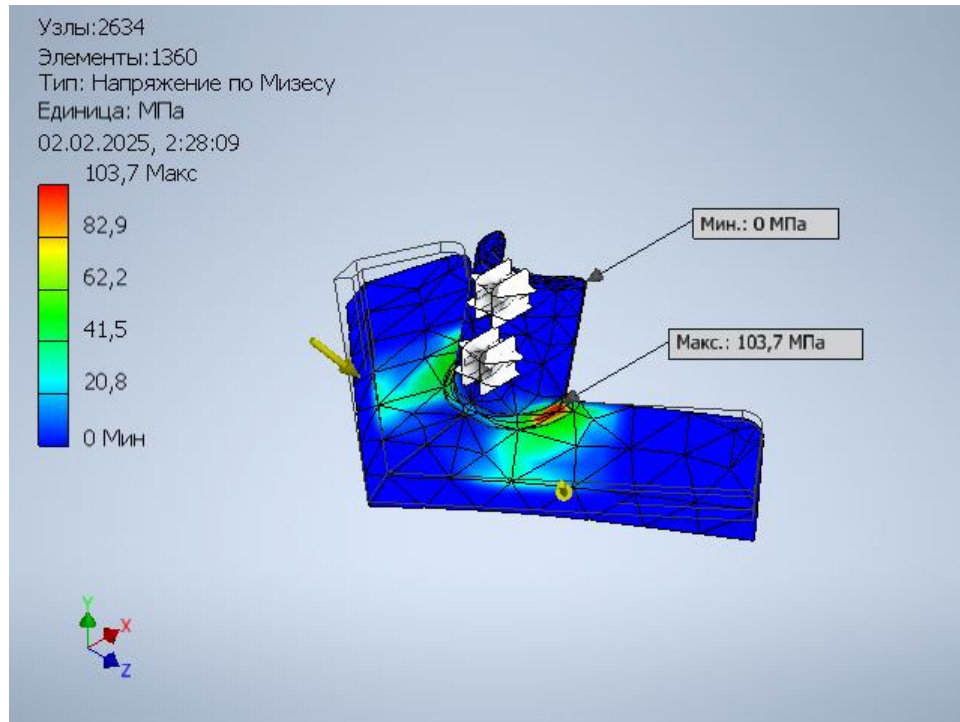
Результат

Имя	Минимальная	Максимальная
Объем	163684 мм ³	
Масса	1,28492 кг	
Напряжение по Мизесу	0,0406251 МПа	103,655 МПа
1-е основное напряжение	-18,482 МПа	111,079 МПа
3-е основное напряжение	-86,9229 МПа	15,9934 МПа
Смещение	0 мм	0,394373 мм
Коэффициент запаса прочности	1,99702 бр	15 бр
Напряжение XX	-43,5323 МПа	36,2767 МПа
Напряжение XY	-17,4918 МПа	33,5004 МПа
Напряжение XZ	-26,9388 МПа	28,9527 МПа
Напряжение YY	-53,9569 МПа	75,567 МПа
Напряжение YZ	-52,7515 МПа	46,7067 МПа

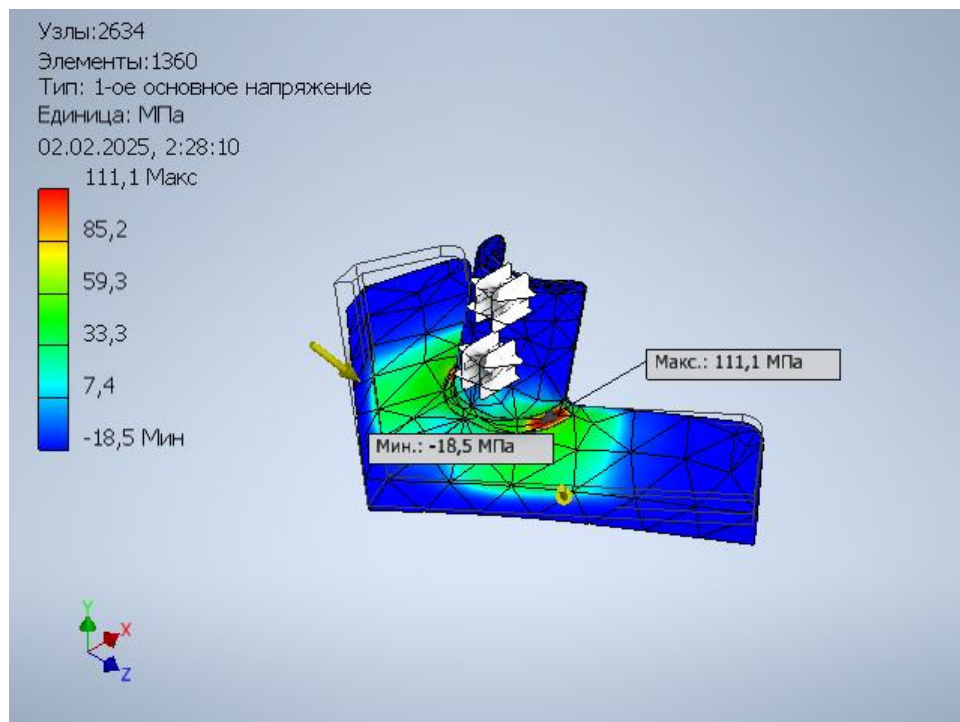
Окончание таблицы

Имя	Минимальная	Максимальная
Напряжение ZZ	-77,8727 МПа	73,447 МПа
Смещение по оси X	-0,00135403 мм	0,108317 мм
Смещение по оси Y	-0,36957 мм	0,00363021 мм
Смещение по оси Z	-0,0906974 мм	0,0912405 мм
Эквивалентная деформация	0,000000171832 бр	0,000438619 бр
1-ая основная деформация	0,0000000767054 бр	0,0004908 бр
3-я основная деформация	-0,000393094 бр	-0,00000010134 бр
Деформация XX	-0,000163375 бр	0,000114816 бр
Деформация XY	-0,000108282 бр	0,000207384 бр
Деформация XZ	-0,000166764 бр	0,000179231 бр
Деформация YU	-0,000216778 бр	0,000267553 бр
Деформация YZ	-0,000326557 бр	0,000289137 бр
Деформация ZZ	-0,000317049 бр	0,000291027 бр

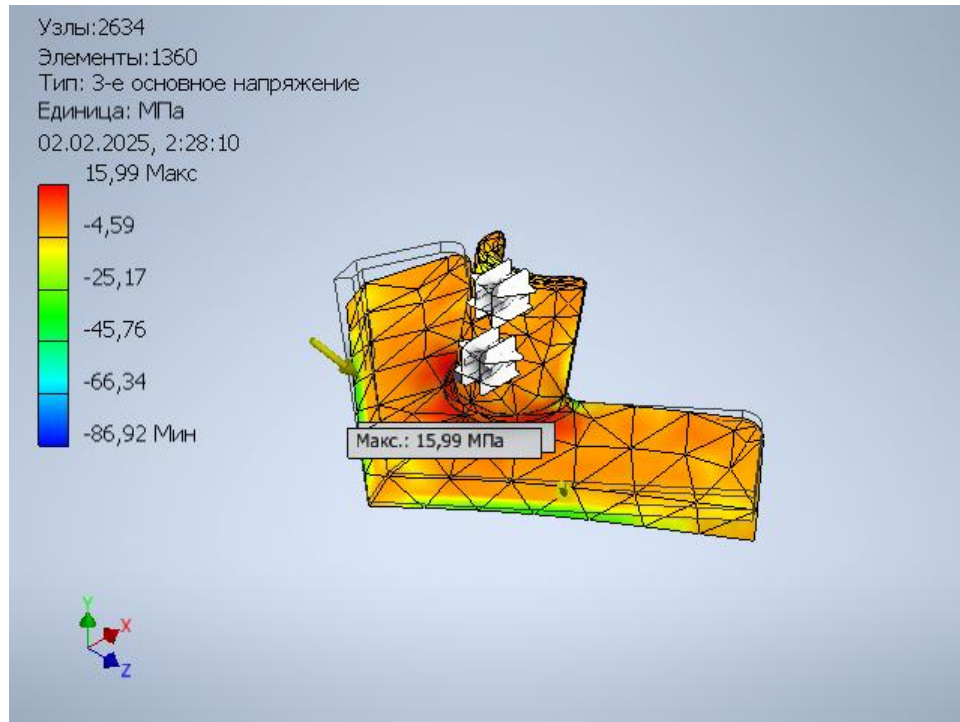
Напряжение по Мизесу



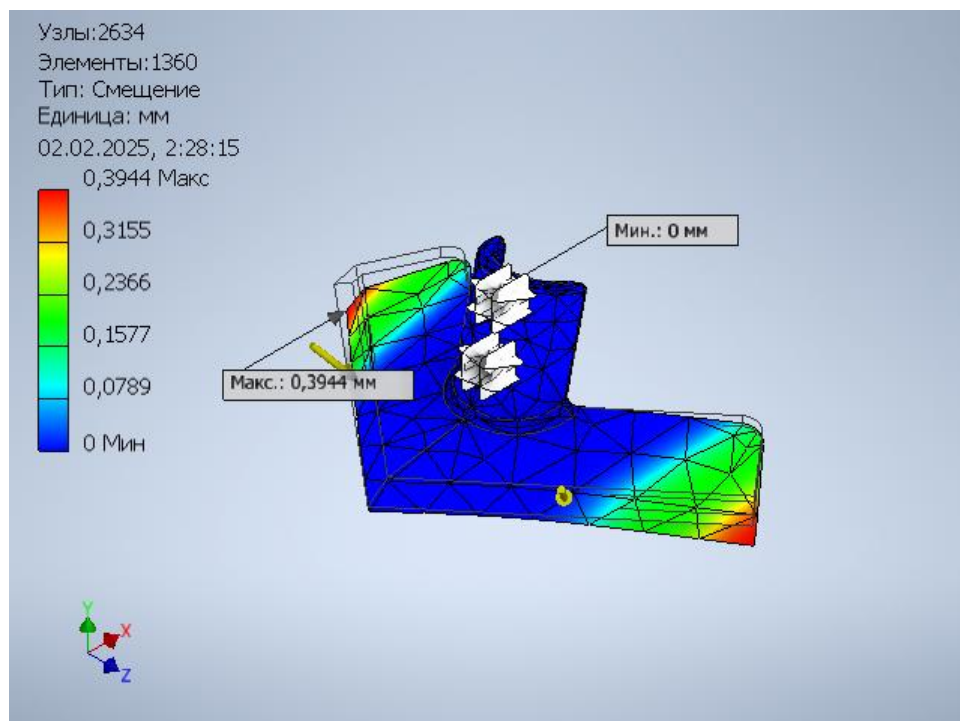
1-е основное напряжение



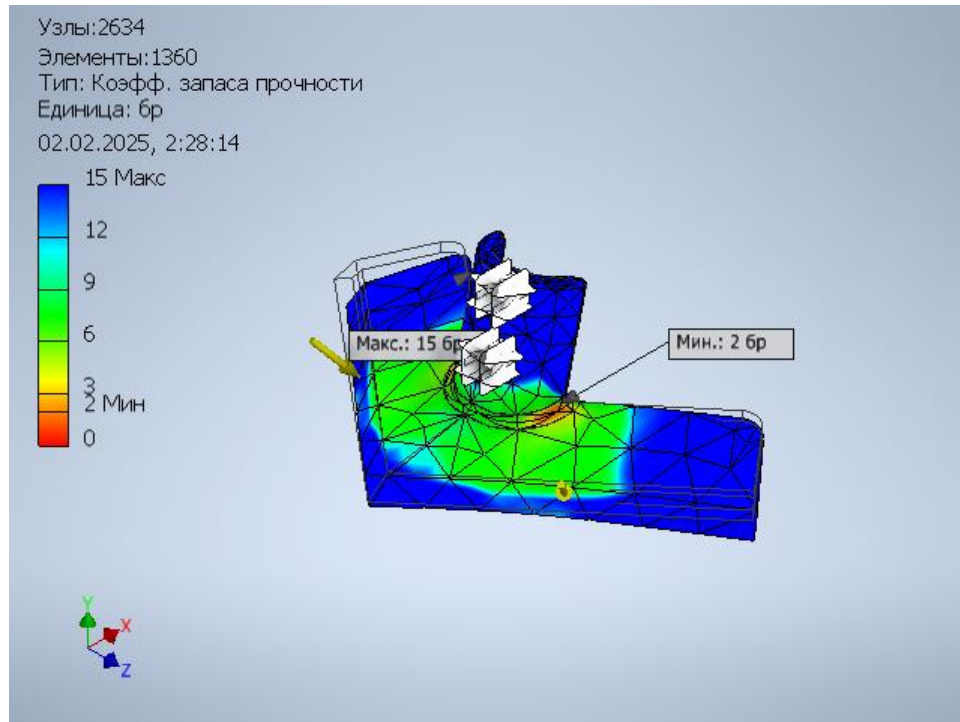
3-е основное напряжение



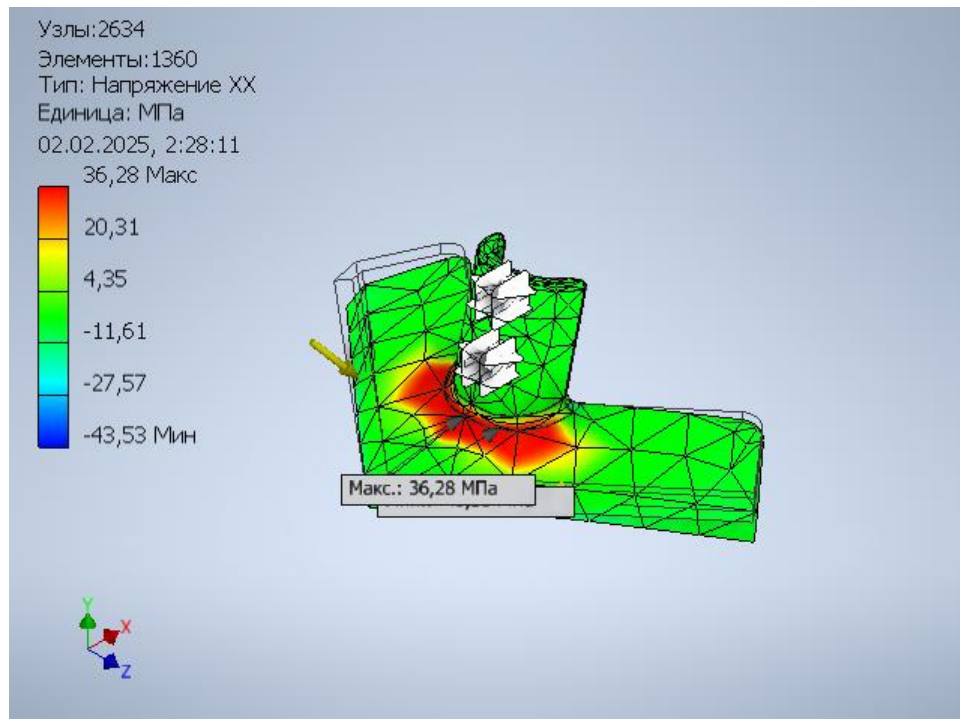
Смещение



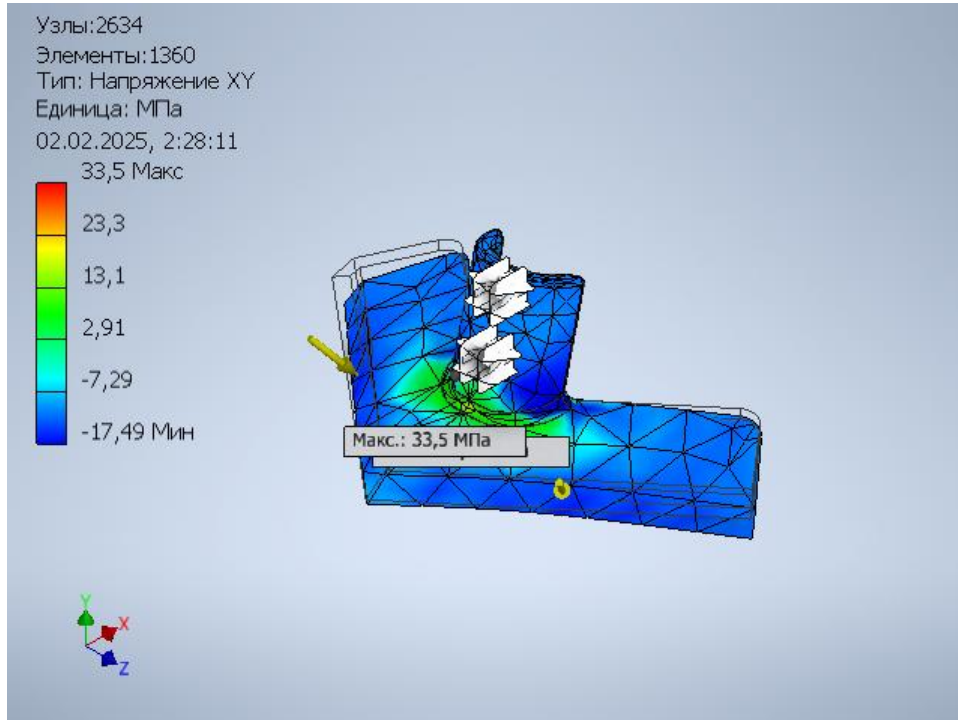
Коэффициент запаса прочности



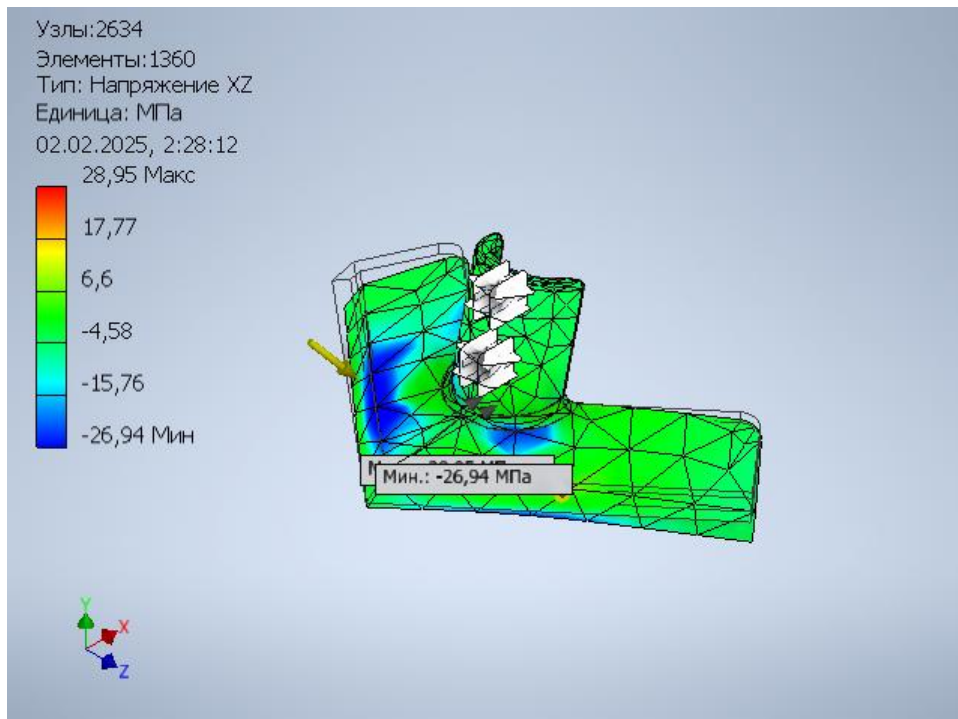
Напряжение XX



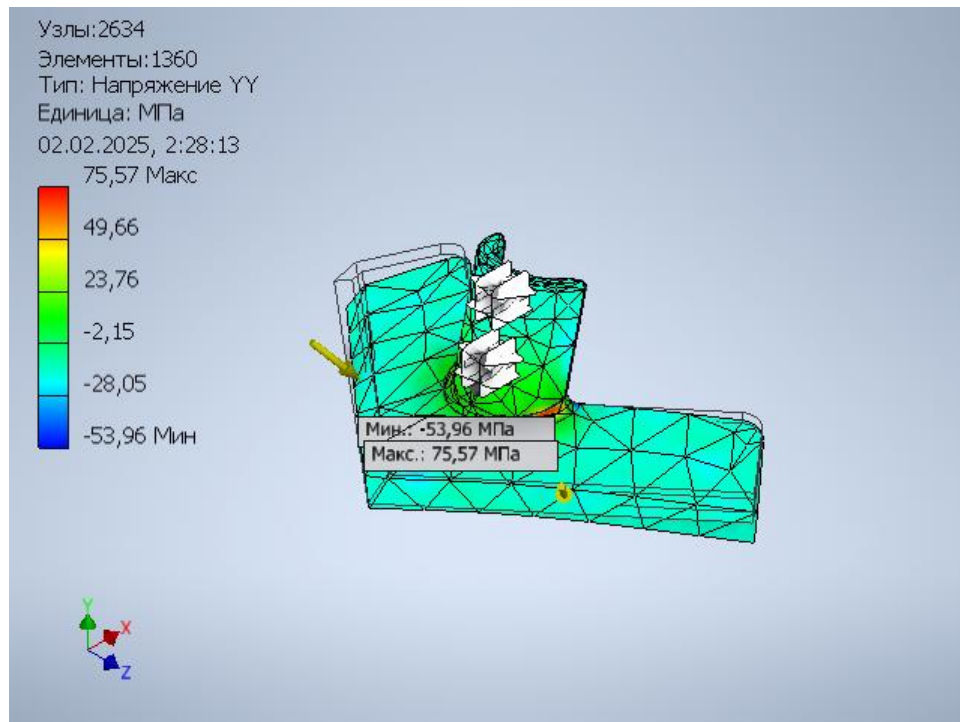
Напряжение XY



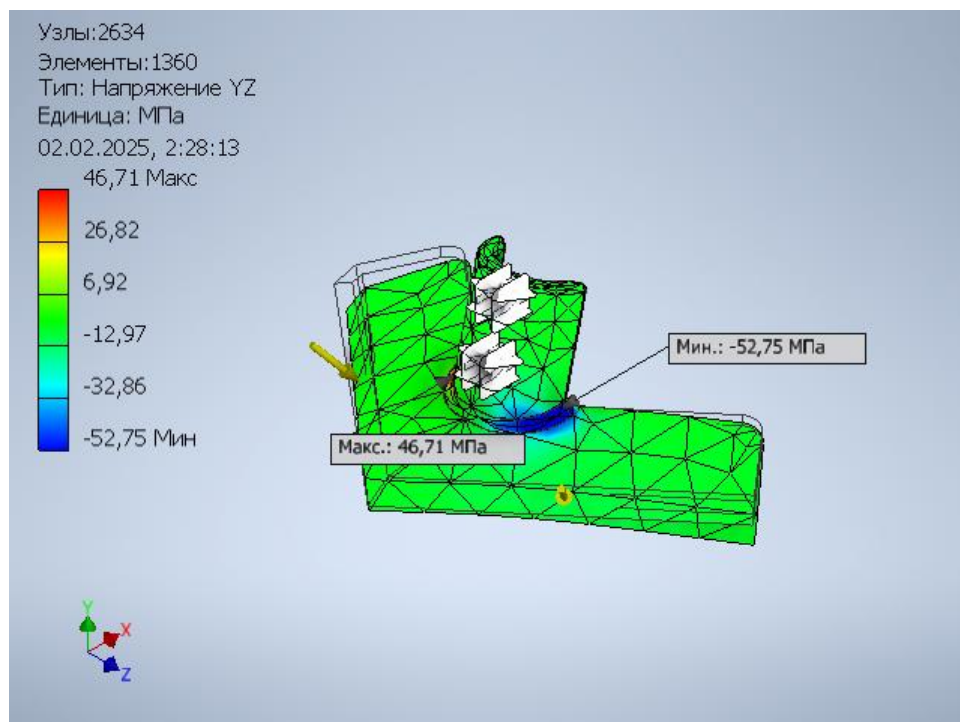
Напряжение XZ



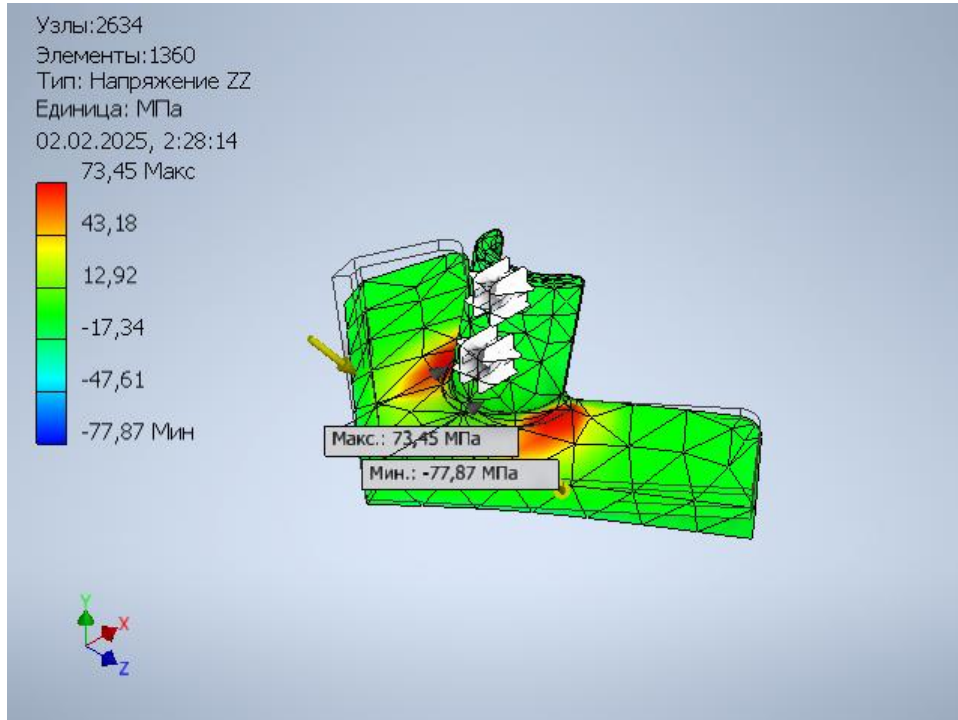
Напряжение $Y\bar{Y}$



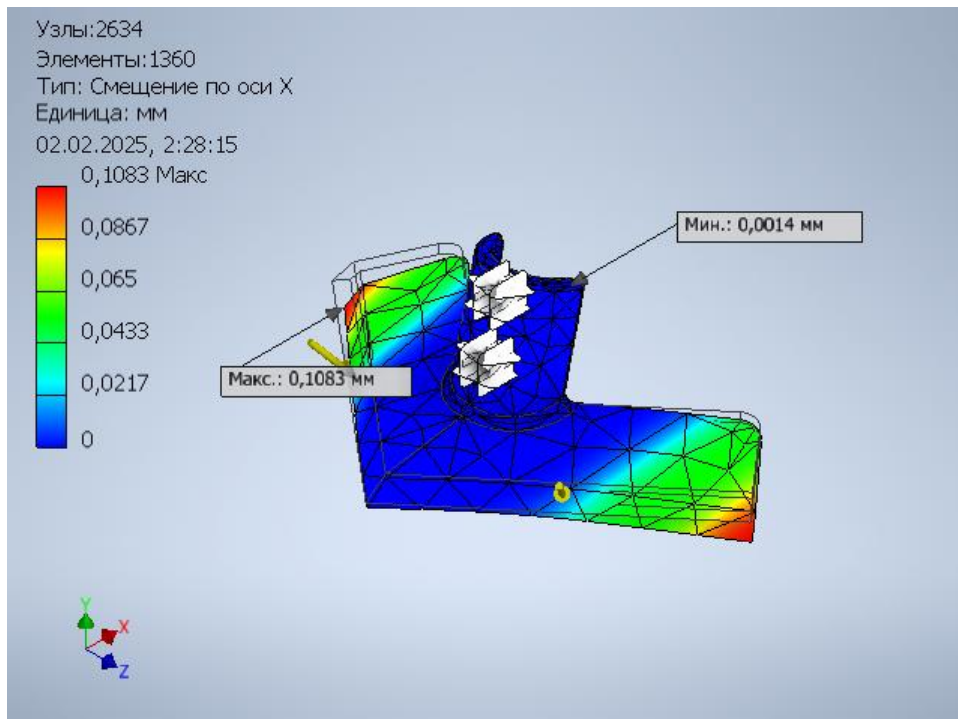
Напряжение $Y\bar{Z}$



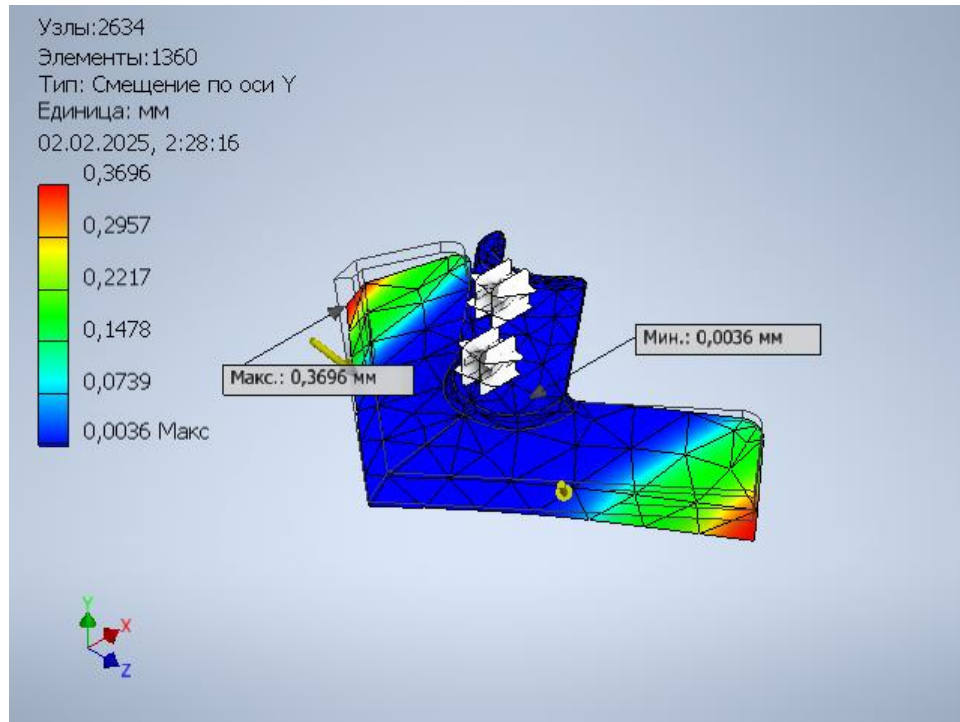
Напряжение ZZ



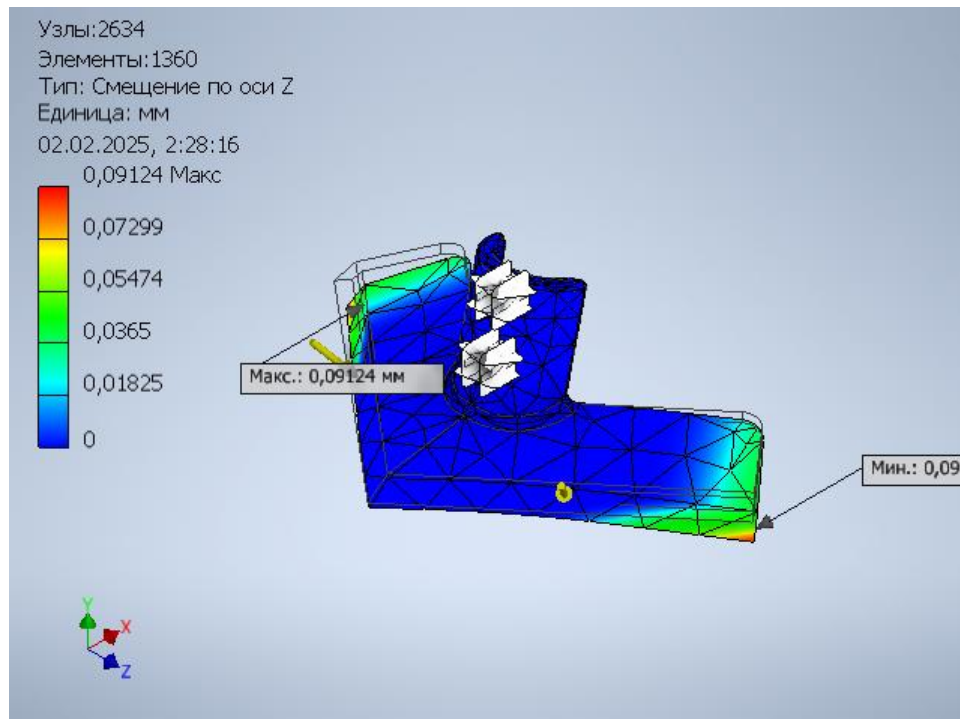
Смещение по оси X



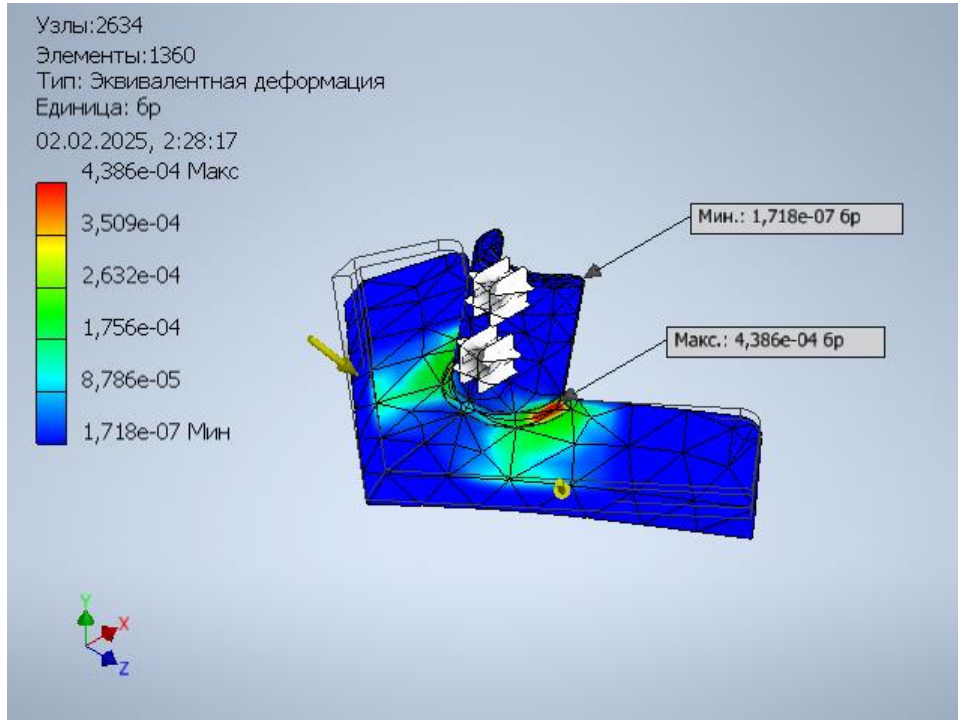
Смещение по оси Y



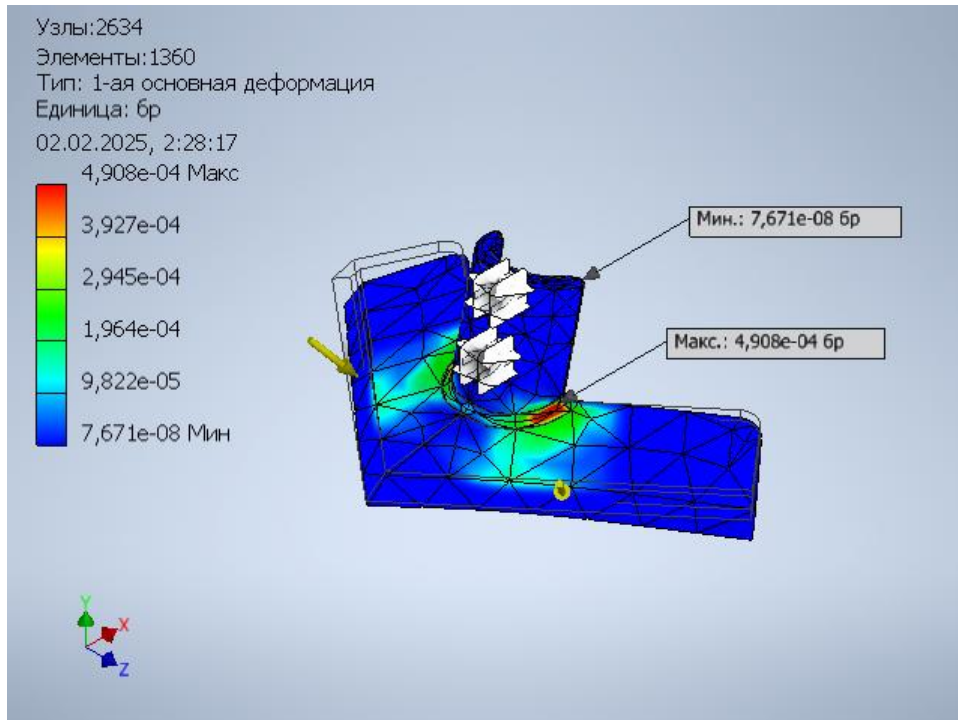
Смещение по оси Z



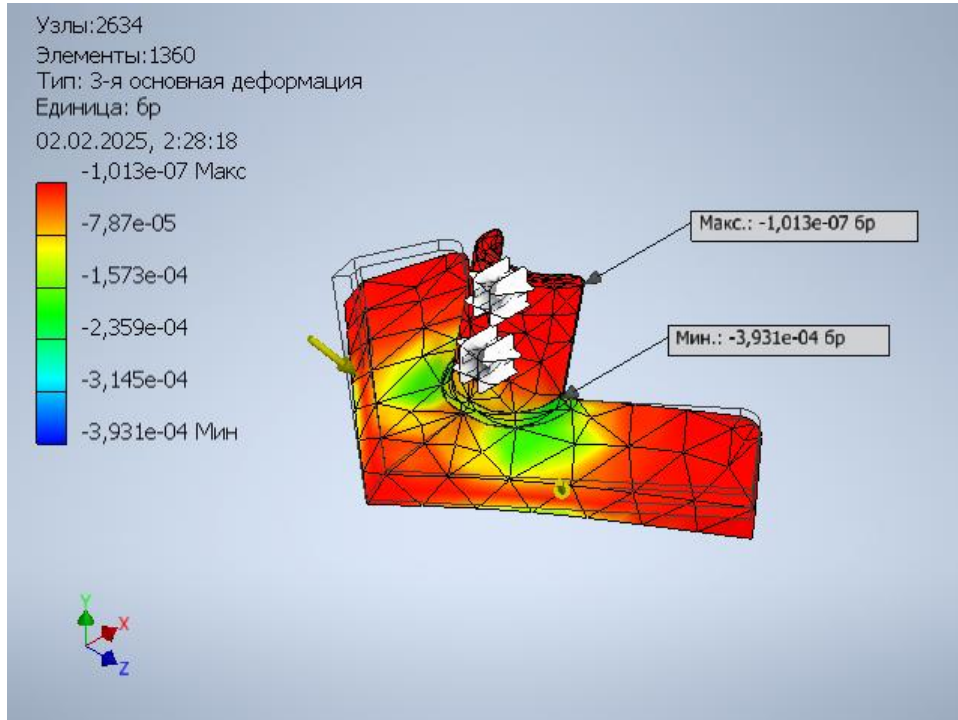
Эквивалентная деформация



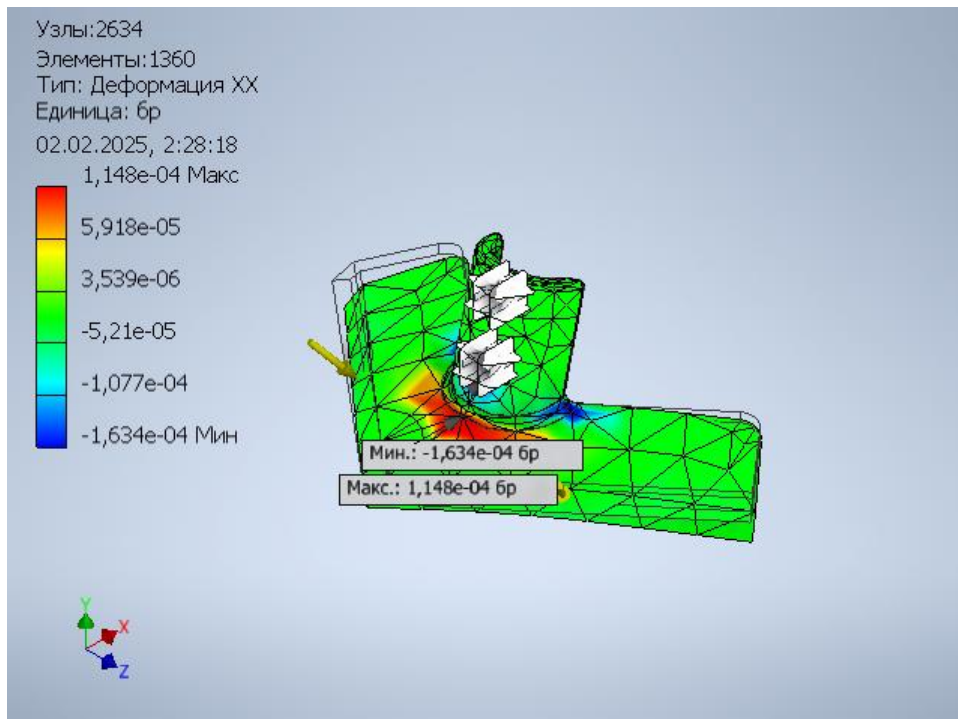
1-я основная деформация



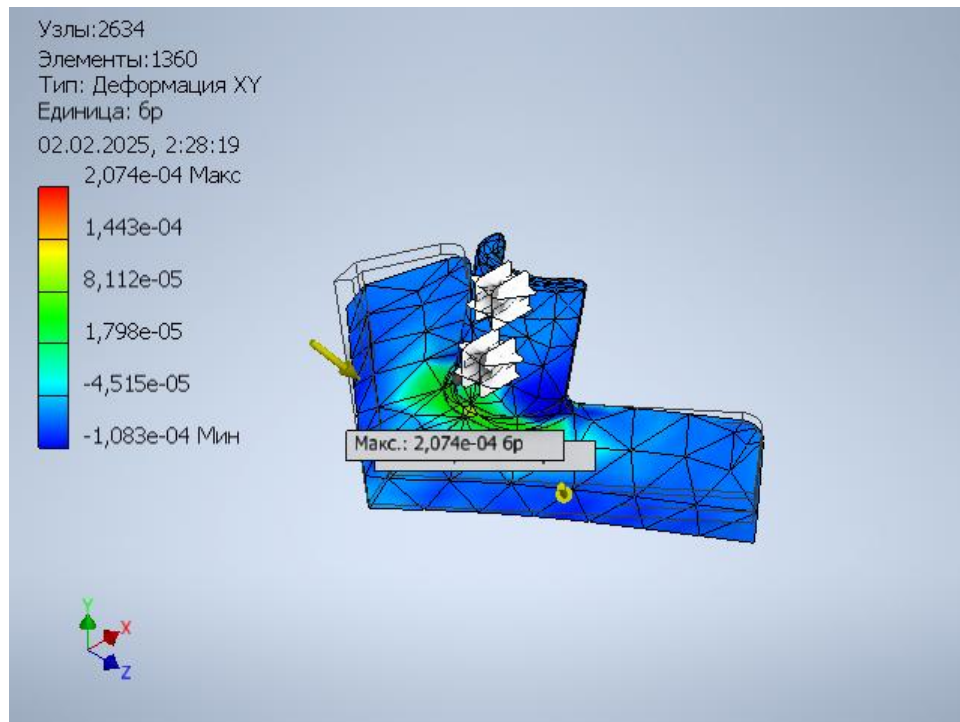
3-я основная деформация



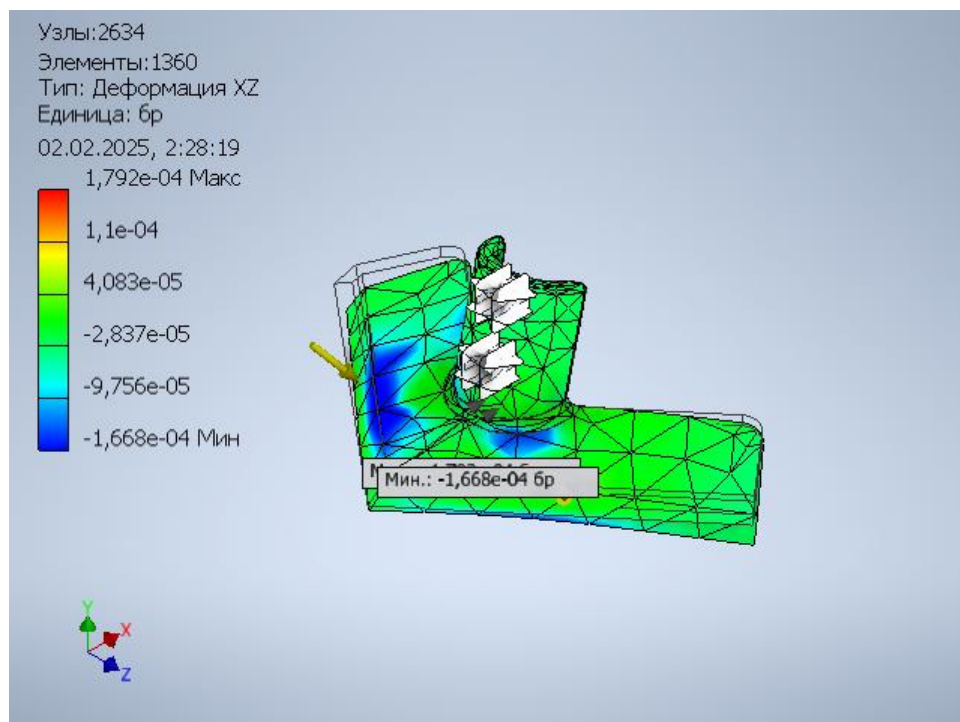
Деформация XX



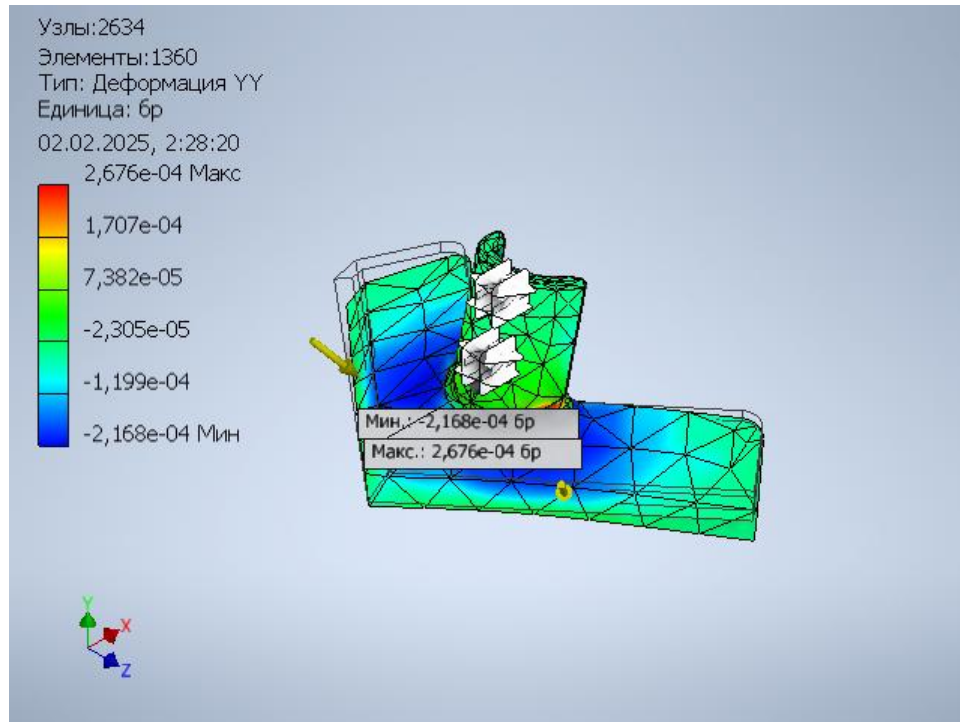
Деформация XY



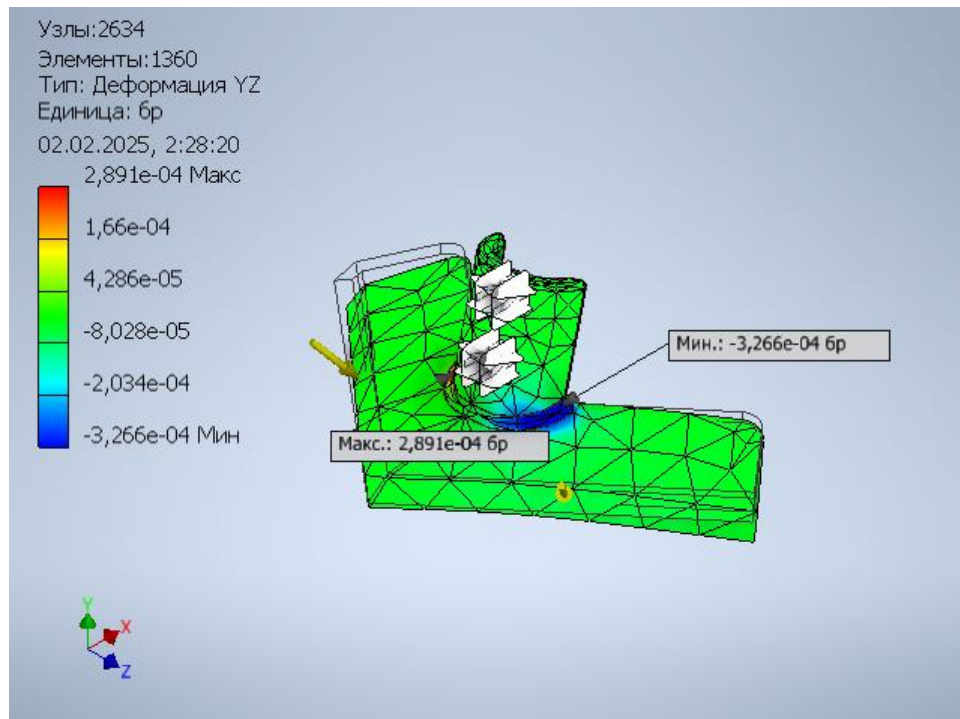
Деформация XZ

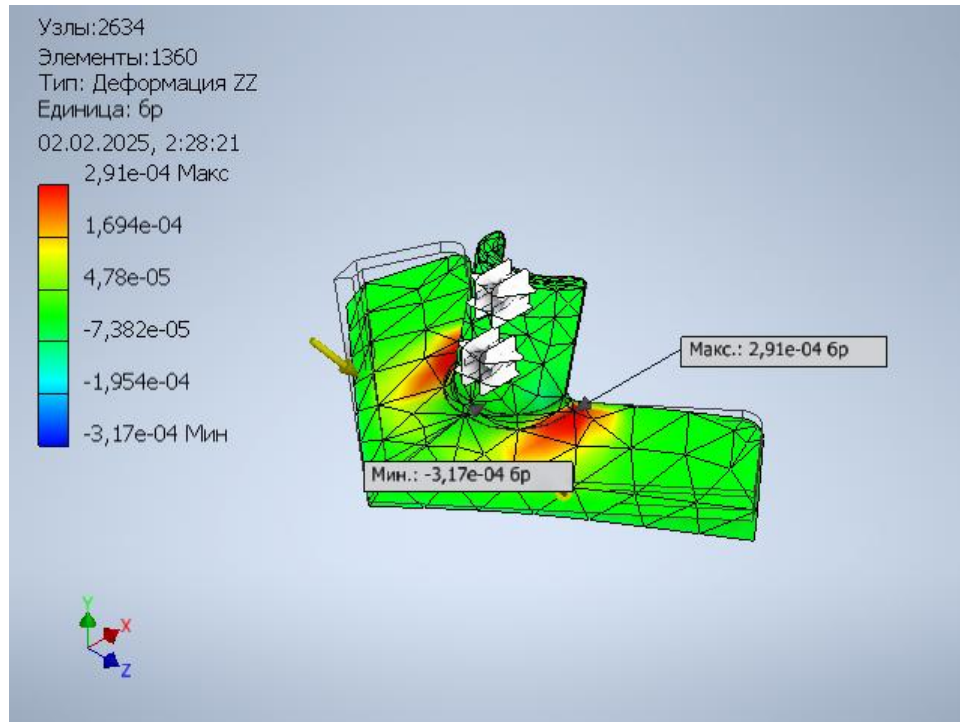


Деформация УУ



Деформация УZ



Деформация ZZ



**МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(Минсельхоз России)**

**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**

**Департамент растениеводства,
механизации, химизации
и защиты растений
(Депрастениеводство)**

Орликов пер., 1/11, Москва, 107996
Для телеграмм: Москва 84 Минроссельхоз
тел: (495) 607-85-75; факс: (495) 608-72-57,
E-mail: pr.deprasten@mcsx.gov.ru
<http://www.mcsx.gov.ru>

13.03.2026 19/957

В соответствии с письмом от 02.03.2026 года № 135-11 ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в адрес Депрастениеводство о рассмотрении результатов исследований, приведённых в диссертации Бугаева А.В. «Восстановление работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин термодиффузионным хромированием» (далее – письмо) сообщаем.

По информации органов управления АПК регионов на 1 января 2026 года доля техники, с года выпуска которой прошло более 10 лет, по тракторам составила 55,03%, по зерноуборочным комбайнам - 44,72% и по кормоуборочным комбайнам - до 42,18% соответственно.

Учитывая изложенное Депрастениеводство считает актуальным проведение исследований и разработку новых технологических методов повышения надёжности сельскохозяйственной техники и оборудования (далее – техника), а также новых материалов для снижающих себестоимости изготавливаемых деталей для техники.

По оценке Депрастениеводства результаты исследований, представленные в письме, могут рекомендоваться организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования, а так же заводам сельскохозяйственного машиностроения.

Заместитель директора
Депрастениеводства

Г.А. Гоголев
8 495 607 87 80 (39 95)



П.И. Бурак

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ В СИСТЕМЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПО УКРУПНЕННОЙ ГРУППЕ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ И
НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ 35.00.00 СЕЛЬСКОЕ, ЛЕСНОЕ И РЫБНОЕ
ХОЗЯЙСТВО**

(Федеральное УМО по сельскому, лесному и рыбному хозяйству)
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»**
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Тимирязевская ул., 58, г. Москва, 127434

Тел.: (499) 976-12-69, (499) 976-43-36

E-mail: umoagro@rgau-msha.ru; v.berdishev@rgau-msha.ru

№ 5 от 11.03.2026.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

На основании материалов научно-исследовательской работы Бугаева Александра Вячеславовича на тему «Восстановление работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин термодиффузионным хромированием», выполненной на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, разработана методика восстановления и упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин с использованием технологии термодиффузионного хромирования.

Данная методика используется в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», а также для научных исследований аспирантов по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Председатель Федерального УМО



В.Е. Бердышев



РГАУ-МСХА

имени К.А. Тимирязева



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина
Кафедра тракторов и автомобилей

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА



Ежегодного семинара
«Чтения академика В. Н. Болтинского»,
посвященного 300-летию Российской академии наук
17-18 января 2024 года

Настоящий сертификат свидетельствует о том, что

Бугаев Александр Вячеславович

Участвовал (а) в семинаре

Ректор, Академик РАН,
д.с.-х.н., д.э.н., профессор

Руководитель семинара
Академик РАН, д.т.н., профессор



В.И. Трухачев
В.И. Трухачев
О.Н. Дидманидзе
О.Н. Дидманидзе

Москва 2024

**РГАУ-МСХА**

имени К.А. Тимирязева

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина
Кафедра тракторов и автомобилей

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА



Международного постоянно действующего
научно-практического семинара
"Чтения академика В.Н. Болтинского"

Настоящий сертификат свидетельствует о том, что

Бугаев Александр Вячеславович

Участвовал (а) в семинаре 22,23 января 2025 г.

Руководитель семинара
Академик РАН
д.т.н., профессор

О.Н. Дидманидзе

Москва 2025



РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**
«Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина
Кафедра тракторов и автомобилей

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА



**Международного постоянно действующего
научно-практического семинара
"Чтения академика В.Н. Болтинского"**

Настоящий сертификат свидетельствует о том, что

Бугаев Александр Вячеславович

Участвовал (а) в семинаре с докладом и публикацией материалов
в сборнике трудов:

**Результаты полевых испытаний рабочих органов культиваторов,
восстановленных методом термодиффузионного хромирования**

Руководитель семинара
Академик РАН
д.т.н., профессор

 **О.Н. Дидманидзе**

Москва, 2026 г.



**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ-
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА**

**XXVII РОССИЙСКАЯ АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА
«ЗОЛОТАЯ ОСЕНЬ – 2025»**

КОНКУРС

**«За освоение современных методов надзора за техническим состоянием
самоходных машин и других видов техники»**

НОМИНАЦИЯ

разработка нормативных правовых актов, нормативно-технической
документации и информационное обеспечение органов гостехнадзора

ТЕМА:

**ПРОГРАММА ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ СОТРУДНИКОВ
ОРГАНОВ ГОСТЕХНАДЗОРА «ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ
СОВРЕМЕННЫХ САМОХОДНЫХ МАШИН И ОРГАНИЗАЦИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО НАДЗОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ» НА БАЗЕ ФГБОУ
ВО РГАУ-МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА**

Авторы:

Дидманидзе Отари Назирович, зав. каф. тракторов и автомобилей, Академик РАН, д.т.н., профессор;

Перевозчикова Наталия Васильевна, доцент каф. тракторов и автомобилей, к.т.н., доцент;

Пуляев Николай Николаевич, доцент каф. тракторов и автомобилей, к.т.н., доцент;

Парлюк Екатерина Петровна, зам. заведующего кафедрой колесные машины по методической работе ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н., профессор;

Бугаев Александр Вячеславович, доцент каф. тракторов и автомобилей, к.т.н., доцент;

Дидманидзе Ремзи Назирович, доцент каф. эксплуатации машинно-тракторного парка, к.э.н., доцент;

Девянин Сергей Николаевич, профессор каф. тракторов и автомобилей, д.т.н., профессор;

Евграфов Алексей Владимирович, доцент каф. тракторов и автомобилей, д.т.н., доцент;

Манохина Александра Анатольевна, доцент каф. механизации сельского хозяйства, д.с.-х.н., доцент;

Полетаев Кирилл Вячеславович, учебный мастер каф. тракторов и автомобилей.

**Проректор по научной работе
д.б.н., профессор**



М.И. Селионова

Москва – 2025