



003451325

*На правах рукописи*

Колпаков Александр Васильевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ОРУДИЙ НАУГЛЕРОЖИВАНИЕМ  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

**Специальность 05.20.03 – технологии и средства технического  
обслуживания в сельском хозяйстве**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**30 ОКТ 2008**

Пенза - 2008

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГОУ ВПО «Нижегородская ГСХА») на кафедре «Надежность и ремонт машин»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
Лисунов Евгений Алексеевич

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Власов Павел Андреевич  
кандидат технических наук, доцент  
Петряков Сергей Николаевич

**Ведущая организация** Государственное учреждение Зональный  
НИИСХ Северо-Востока  
им. Н.В. Рудницкого (г. Киров)

Защита состоится 21 ноября 2008г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 220.053.02 при ФГОУ ВПО «Пензенская ГСХА» по адресу: 440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30, ауд. 1246.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО «Пензенская ГСХА».

Автореферат разослан 14 октября 2008 г.

**Ученый секретарь**  
диссертационного совета



Кухарев О. Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ресурс современных рабочих органов почвообрабатывающих орудий в значительной степени зависит от материала заготовки и способа упрочнения. Рабочие органы подвержены, в основном, абразивному изнашиванию. Снизить интенсивность этого вида изнашивания возможно путем применения воздействий, позволяющих произвести упрочнение рабочей поверхности. В связи с этим поиск эффективного технологического процесса упрочнения является актуальной задачей, определяющей цель настоящей работы. Существующие способы упрочнения являются сравнительно дорогостоящими и требуют значительных трудовых затрат.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с темой научно-исследовательской работы кафедры «Надежность и ремонт машин» ФГОУ ВПО «Нижегородская ГСХА» «Разработка эффективных ресурсосберегающих технологических процессов для повышения износостойкости деталей машин» и координируется ВНИИПТИМЭСХ по Программе «Разработать системы технологизации и инженерно-технического обеспечения агропромышленного производства как основы стабилизации АПК субъектов Российской Федерации Северо-Кавказского, Приволжского и Уральского федеральных округов на 2001-2005 годы».

**Цель исследований.** Повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих орудий путем применения вибродугового науглероживания поверхностного слоя графитовым электродом.

**Объект исследований.** Технологический процесс науглероживания поверхностного слоя рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

**Предмет исследований.** Показатели, характеризующие глубину науглероженного слоя и содержание в нем углерода.

**Научную новизну** представляют:

- зависимости глубины науглероженного слоя и содержания в нем углерода от напряжения на графитовом электроде, амплитуды вибрации рабочего органа и скорости науглероживания;
- методика расчета производительности процесса вибродугового науглероживания в зависимости от скважности технологического цикла;
- экспериментальная оценка влияния параметров вибродугового науглероживания на твердость и износостойкость науглероженного слоя.

**Практическую ценность** представляет процесс вибродугового науглероживания поверхностного слоя рабочих органов почвообрабатывающих орудий графитовым электродом, позволяющий почти в 2 раза повысить износостойкость рабочих органов без дорогостоящего легирования.

**Реализация результатов исследований.** Технологический процесс вибродугового науглероживания графитовым электродом внедрен в ОАО «Сельхозтехника» г. Богородск Нижегородской области и в учебном процессе по дисциплине «Технология ремонта машин» в ФГОУ ВПО «Нижегородская ГСХА».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях (1997 и 1998 гг.) в «Интелсервис» и Верхне-Волжском отделении академии технологических наук (г. Н. Новгород), на региональных научно-практических конференциях инженерного факультета ФГОУ ВПО «Нижегородская ГСХА» (1999, 2004 и 2006 гг.), на II<sup>й</sup> Всероссийской научно-практической конференции «Наука - Технология - Ресурсосбережение» в ФГОУ ВПО «Вятская ГСХА» (г. Киров, 2008 г.).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано шесть научных работ, в том числе две - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Четыре статьи опубликованы без соавторов. Общий объем публикаций 1,07 п.л., из них 0,79 п.л. принадлежит автору.

**На защиту выносятся** следующие научные положения и результаты исследований:

- аналитические зависимости глубины науглероженного слоя и содержания в нем углерода от напряжения процесса науглероживания, амплитуды вибрации рабочего органа, скорости науглероживания, тока и числа проходов графитового электрода;
- методика расчета производительности процесса науглероживания в зависимости от скважности технологического цикла;
- результаты экспериментальных исследований по оценке влияния параметров вибродугового науглероживания на глубину и содержание углерода в упрочненном слое, а также по износостойкости науглероженных графитовым электродом рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы из 107 наименований и приложения. Работа изложена на 149 с., содержит 46 рис. и 19 табл.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследований и основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Состояние вопроса и задачи исследований» обоснована необходимость применения науглероживания рабочих органов почвообрабатывающих орудий для повышения их износостойкости. Повышению износостойкости рабочих органов уделяется большое внимание в работах Рабинович А.Ш., Селиванова А.И., Курчаткина В.В., Тельнова Н.Ф., Ачкасова К.А., Артемьева Ю.Н., Хрущева М.М., Бабичева М.А., Шитова А.Н., Ткачева В.Н., Михальченкова А.Н., Петрова М.Ю., Кац А.А., и др. авторов.

На основании проведенного анализа и в соответствии с поставленной целью определены задачи исследований вибродугового науглероживания поверхностного слоя рабочих органов почвообрабатывающих орудий:

1. Установить возможные варианты науглероживания поверхности рабочего органа графитовым электродом, и выбрать оптимальный вариант, при котором получается структура науглероженной зоны подобная структуре белого чугуна и необходимая глубина упрочнения.

2. Выявить рациональные значения амплитуды вибрации и скорости процесса вибродугового науглероживания рабочего органа.

3. Определить рациональные режимы вибродугового науглероживания по напряжению и оптимальные значения скважности технологического цикла.

4. Провести многофакторный эксперимент для определения рациональных режимов вибродугового науглероживания по току, числу проходов электрода и амплитуде вибрации рабочего органа.

5. Оценить износостойкость науглероженных рабочих органов почвообрабатывающих орудий в условиях абразивного изнашивания и определить экономическую эффективность вибродугового науглероживания.

Во втором разделе «Теоретическое обоснование процесса науглероживания поверхностного слоя рабочих органов» дается обоснование необходимости получения на поверхности рабочего органа слоя белого чугуна. Технологическими условиями получения слоя белого чугуна на стального рабочего органа являются науглероживание до содержания углерода 3...4 % и охлаждение расплава со скоростью выше скорости графитизации.

Использование дуги от графитового электрода не дает науглероженного слоя толщиной более 0,012 мм, если поверхность не оплавлена. Следовательно, при дуговом режиме графитовым электродом не представляется возможным получить упрочненный слой с содержанием углерода 3...4 %. Нестандартные прерывистые вибродуговые разряды стабилизируют процесс, а оплавленная поверхность подобной обработкой на глубине 0,01 мм содержит 3,0...4,5 % углерода. Длительность горения дуги при таком процессе 0,0036...0,0056 с, а время контакта соответственно 0,0008...0,0010 с. Поэтому для увеличения содержания углерода предлагается вибродуговое науглероживание поверхностного слоя стальных рабочих органов.

Процесс вибродугового науглероживания можно представить в виде двух периодов: контактного и дугового. Длительность вибродугового цикла процесса

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{к}} + T_{\text{д}}, \text{ с}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{к}}$ ,  $T_{\text{д}}$  – длительности контактного и дугового периодов, с.

Расчетный параметр процесса – скважность технологического цикла

$$\psi = T_{\text{д}} / T_{\text{к}}. \quad (2)$$

Расчетная мощность цикла науглероживания

$$P_{\text{ц}} = P_{\text{д}} + P_{\text{к}} = I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \psi + I_{\text{к}} \cdot U_{\text{к}} \cdot (1 - \psi), \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{д}}$ ,  $P_{\text{к}}$  – соответственно мощности дугового и контактного периодов, Вт;

$I_k, I_d, U_k, U_d$  – ток и напряжение контактного и дугового периодов соответственно, А и В;  $\eta_n$  – коэффициент использования тепла дуги.

Секундный расплав металла

$$Q_{pm} = \frac{P_p \cdot \eta_t \cdot \rho}{S'_{pm}} = \frac{[I_d \cdot U_d \cdot \eta_n \cdot \psi + I_k \cdot U_k \cdot (1 - \psi)] \cdot \eta_t \cdot \rho}{S'_{pm}}, \text{ г/с}, \quad (4)$$

где  $\eta_t$  – термический КПД;  $\rho$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>;  $S'_{pm}$  – теплосодержание единицы объема, Дж/см<sup>3</sup>.

Науглероживающий поток (количество попадающего в расплавленную ванну углерода) с графитового электрода (анод)

$$Q_c = \frac{I_d \cdot \alpha_c \cdot \eta_n}{3600}, \text{ г/с}, \quad (5)$$

где  $\eta_n$  – коэффициент использования потока ионов углерода при науглероживании деталей;  $\alpha_c = 0,13$  г/А·ч – электрохимический эквивалент четырехвалентного углерода.

Процентное содержание углерода в науглероженном слое

$$C_n = \frac{Q_c \cdot 100}{Q_{pm}} = \frac{[I_d \cdot \eta_d \cdot \psi + I_k \cdot \eta_k \cdot (1 - \psi)] \cdot \alpha_c \cdot S'_{pm}}{[I_d \cdot U_d \cdot \eta_n \cdot \psi + I_k \cdot U_k \cdot (1 - \psi)] \cdot \eta_t \cdot \rho \cdot 3600}, \% \quad (6)$$

При скважности  $\psi < 0,6$  из-за увеличения тока идет расщепление электрода. Слой с содержанием менее 3 % углерода не обеспечивает требуемую износостойкость.

В третьем разделе «Программа и методика исследований поверхностного науглероживания рабочих органов» описана программа и методика лабораторных и эксплуатационных исследований:

1. Выбор варианта науглероживания рабочих органов в лабораторных условиях.
2. Определение рациональных и оптимальных режимов вибродугового науглероживания.
3. Определение производительности вибродугового науглероживания в зависимости от скважности технологического цикла.
4. Проведение многофакторного эксперимента и металлографического анализа науглероженных образцов и рабочих органов, определение микротвердости и твердости науглероженной зоны.
5. Оценку износостойкости науглероженных образцов в лабораторных условиях и рабочих органов в условиях эксплуатации, экономическая оценка целесообразности вибродугового науглероживания рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

Для реализации этой программы разработан граф общей методики (рис. 1).

Исследованиям подвергались три периода взаимодействия электрода и детали: контактный, дуговой и вибродуговой.

Выбор диапазона рациональных режимов и оптимального режима науглероживания (по току, числу повторных проходов электрода, амплитуде вибрации) проводился с применением теории планирования многофакторного эксперимента. Параметры оптимизации процесса науглероживания – содержание углерода в науглероженном слое и толщина науглероженного слоя.

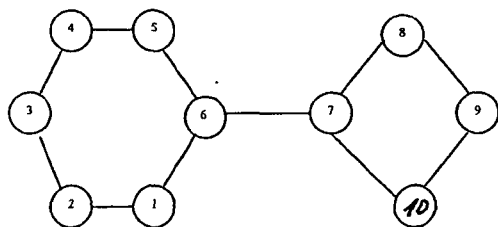


Рисунок 1 – Граф общей методики исследований:

1 – постановка вопроса; 2 – анализ способов повышения износостойкости рабочих органов; 3 – задачи исследований; 4 – патентный поиск способов науглероживания; 5 – обоснование поверхностного науглероживания; 6 – исследование вариантов науглероживания графитовым электродом; 7 – оптимизация режима науглероживания, реализация многофакторного эксперимента; 8 – металлографические исследования науглероженного слоя; 9 – определение износостойкости науглероженного слоя; 10 – разработка алгоритма расчета режима науглероживания.

Измерение толщины науглероженного слоя проводилось по микрошлифам на ПМТ–3М методом вдавливания алмазной пирамиды.

Обработка результатов эксперимента выполнялась на персональном компьютере с помощью программ Microsoft Excel 2003, Statgraphics plus version 5.1 for Windows.

Для оценки отклонения параметра оптимизации от среднего значения вычислялась дисперсия воспроизводимости параллельных опытов для каждой точки плана матрицы. Проверка гипотезы однородности выполнялась по критерию Кохрена для уровня значимости  $q = 5\%$ . Значимость коэффициентов модели регрессии оценивалась по критерию Стьюдента, адекватность – по критерию Фишера.

Установлены значения амплитуды колебаний детали соответствующие получению слоя требуемой структуры – 0,6 мм и 0,8 мм, скорость науглероживания изменялась  $(1,70...3,08) \cdot 10^{-3}$  м/с, частота вибрации 0,36 с<sup>-1</sup>. Для механизации вибродугового науглероживания была применена автоматизация подачи электрода. Подача на толкателе и цикловая подача электрода

$$S_n = S_{эл} \cdot \frac{a+v}{b}, \quad S_n = 1,32 \cdot S_{эл}, \quad (7)$$

где  $S_{эл}$  – подача электрода, мм;  $a$  и  $v$  – длина плеч держателя, мм.

$\frac{a+v}{b} = 1,32$  – соотношение длин плеч держателя от оси качания.

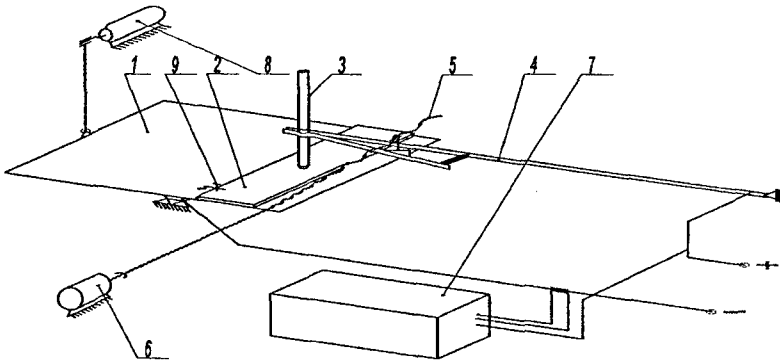


Рисунок 2 – Схема установки для исследования процесса науглероживания:  
 1 – платформа вибратора; 2 – образец (рабочий орган); 3 – графитовый электрод; 4 – электрододержатель; 5 – винтовая пара; 6 – мотор-редуктор мощностью 1,2 кВт; 7 – осциллограф Н-700; 8 – электродвигатель мощностью 1 кВт; 9 – фиксатор образца (рабочего органа)

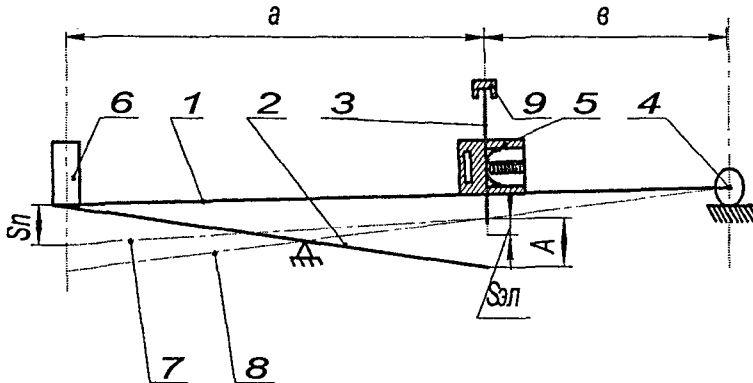


Рисунок 3 – Кинематическая схема держателя для автоматической осевой подачи электрода:  
 1 – электрододержатель; 2 – платформа вибратора в начале цикла; 3 – графитовый электрод; 4 – опора держателя; 5 – муфта со скользящим контактом; 6 – толкатель держателя; 7, 8 – положение держателя и платформы через  $0,5T$  цикла; 9 – толкатель электрода

Угол поворота привода определяется из диаграммы цикла процесса науглероживания (рис. 4).



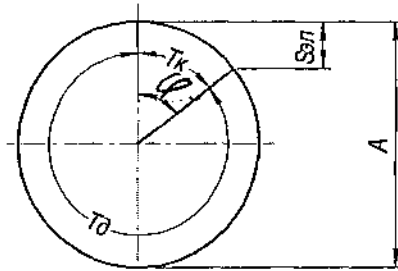


Рисунок 4 – Диаграмма цикла науглероживания:

$A$  - амплитуда вибрации;  $S_{эл}$  - вылет электрода;  $\varphi$  - угол поворота привода соответствующий времени контактного периода

Вылет электрода

$$S_{эл} = \frac{A}{2} \cdot (1 - \cos \varphi), \text{ мм.} \quad (8)$$

Используя выражение времени цикла (1) и скважности (2)

$$1 - \frac{T_d}{T_q} = \frac{T_q - T_d}{T_q} = 1 - \psi = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (9)$$

Выражаем  $\varphi$  и подставляем в (8)

$$S_{эл} = \frac{A}{2} \cdot \{1 - \cos[2\pi \cdot (1 - \psi)]\}. \quad (10)$$

Подача на толкателе

$$S_n = 1,32 \cdot \frac{A}{2} \cdot \{1 - \cos[2\pi \cdot (1 - \psi)]\}. \quad (11)$$

Для определения параметров вибродугового науглероживания разработана структурная схема, представленная на рисунке 5.

Образцы из Ст. 3 4×50×150 мм науглероживались с напряжением 24 В и 28 В со скважностью от 0,61 до 0,88 с интервалом 0,03. Для заданной скважности и при амплитудах вибрации  $A=0,6$  мм и  $A=0,8$  мм подсчитывалось и устанавливалось значение подачи электрода на толкателе  $S_n$  с точностью 0,01 мм. По микрошлифам измерялась площадь поперечного сечения науглероживаемой зоны с точностью 0,5 мм<sup>2</sup> и содержание углерода с точностью 0,10 %.

Производительность процесса по чугуну

$$m_q = F_{она} \cdot V_n \cdot \rho, \text{ г/с,} \quad (12)$$

где  $F_{она}$  – площадь зоны, см<sup>2</sup>;  $V_n$  – скорость науглероживания, см/с.

Производительность по углероду

$$m_c = \frac{m_v \cdot C_n}{100}, \text{ г/с.} \quad (13)$$

Фактическая тепловая мощность

$$P_\phi = \frac{F_{опл} \cdot V_n \cdot S'_{пл}}{\eta_m}, \text{ Вт,} \quad (14)$$

где  $\eta_m$  – коэффициент использования открытой дуги.

Параметры науглероженного слоя (содержание углерода, глубина упрочнения) зависят от скважности. Для оптимизации процесса науглероживания выбран критерий – длина сварочной ванны

$$L_{исв.с.} = \frac{10 \cdot P_p \cdot S'_{пл}}{8\pi \cdot \lambda \cdot C_p \cdot \rho_m \cdot T_{пл}^2}, \text{ мм,} \quad (15)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/см·с·°С;  $\rho_m$  – объемная теплоемкость, Дж/см<sup>3</sup>·°С;  $T_{пл}$  – температура плавления сплава, °С;  $P_p$  – расчетная тепловая мощность, Вт;  $C_p$  – расчетное значение содержания углерода, %.

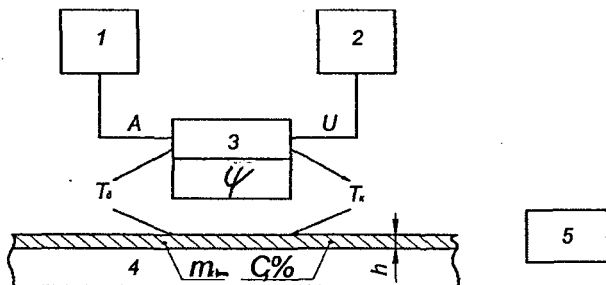


Рисунок 5 – Структурная схема процесса науглероживания с автоматической подачей электрода:

1 – платформа вибратора; 2 – источник питания; 3 – механизм автоматической подачи; 4 – деталь; 5 – механизм продольной подачи;  $\psi$  – скважность; U – напряжение; A – амплитуда;  $m_r = f(h)$  – масса науглероженного слоя; h – толщина науглероженного слоя; C, % – процентное содержание углерода

Исследования износостойкости науглероженного слоя по закрепленному абразиву проводилось по методике, разработанной М. Хрущевым и М. Бабичевым в лабораторных условиях на машине трения горизонтального типа 77 – МГ1. Образец прижимался к брусу из белого электрокорунда 25АСМ2К20М зернистостью 127 с усилием 0,2 МПа. Через каждые 5000 циклов (двойных ходов) производился

замер высоты образца микрометром МК–25 с точностью 0,01 мм и взвешивание на весах ВЛР–200 с точностью 0,00001 г.

Для эксплуатационных исследований были подготовлены лемеха П–702Б и стрелчатые культиваторные лапы УК – 1014. Науглероженная зона лемехов составляла ширину 20...25 мм в линейной части и 40...45 мм по носку на глубину 1...2 мм. На культиваторных лапах ширина зоны упрочнения составляла 10...15 мм, глубина – 0,5...1,0 мм.

Величина износа лемеха контролировалась по ширине в линейной его части, а у культиваторной стрелчатой лапы УК – 1014 измерялась ширина крыла и длина носка штангенциркулем ШЦ–I–300. Состояние науглероженного слоя контролировалось визуально по наличию кратера сварочной ванны. При изнашивании науглероженного слоя (зоны науглероживания) рабочий орган снимался с испытаний.

В четвертом разделе «*Результаты экспериментальных исследований процесса поверхностного науглероживания рабочих органов*» представлены результаты лабораторных и эксплуатационных исследований. Выявлено влияние амплитуды вибрации на структуру и глубину науглероженного слоя при контактном, дуговом и вибродуговом режимах. Установлено, что вибрация образца с частотой 23 Гц и амплитудой  $A \leq 0,35$  мм не обеспечивает дугового периода. Микроструктура этого слоя представляет собой заэвтектический сплав ледебуритной эвтектики с цементитными иглами. Режим науглероживания дает малую и неравномерную глубину проплавленного металла, но повышенное содержание углерода.

При дуговом науглероживании проплавление неравномерное. Средние значения тока и напряжения составляют  $I_d = 80...110$  А,  $U_d = 22...36$  В. Образуется большая ванна расплавленного металла. Микроструктура представляет собой перлитно-ледебуритную крупно зернистую структуру из 70% перлита и 30% ледебурита. Твердость этой структуры составляет  $H_{100} = 4520...5800$  МПа.

Вибродуговое науглероживание происходит при колебаниях детали с амплитудой  $A = 0,35...1,25$  мм. При  $A = 0,35...0,45$  мм процесс имеет не стабильный характер. При увеличении амплитуды до 0,55 мм и выше процесс стабилизируется. Определено, что длительность цикла соответствует частоте вибратора ( $T_{\psi} = 1/23$  с), а скажность процесса составляет: при  $A = 0,55$  мм  $\psi = 0,35$ ; при  $A = 0,65$  мм  $\psi = 0,45$ ; при  $A = 1,00$  мм  $\psi = 0,75$ .

Науглероженный слой с увеличением амплитуды колебаний увеличивается, но обедняется цементитная составляющая. При значениях амплитуды колебаний 0,45; 0,55; 0,65 мм структура имеет мелкозернистое строение. Наблюдается увеличение площади сечения науглероженного

слоя. При амплитудах 1,00 мм и 1,25 мм еще больше увеличивается глубина и ширина науглероженной зоны. Структура науглероженного слоя обогащается перлитом, твердость снижается до  $H_{100} = 4050 \dots 4240$  МПа.

По результатам исследований установлено, что факторами, влияющими на образование науглероженного слоя являются: ток –  $I (X_1)$ , количество повторных проходов электрода –  $n (X_2)$ , амплитуда вибрации –  $A (X_3)$ . Для определения рационального диапазона параметров науглероживания и оптимального режима использован полный факторный эксперимент.

При использовании науглероживания для повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих орудий процесс изнашивания этих деталей должен стабилизироваться. Условие стабилизации изнашивания

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{Y_{осн}}{Y_1}, \quad (16)$$

где  $H_1, H_2$  – износостойкость несущего и упрочненного слоев соответственно;  $Y_{осн}, Y_1$  – толщина несущего и упрочненного слоев соответственно, мм.

При регламентированном отношении для упрочненных рабочих органов  $H_2 / H_1 = 2,44$  и общей толщине детали (лезвие лемеха) 3 мм условие стабилизации изнашивания выполняется при  $Y_{осн} = 2,2$  мм и  $Y_1 = 0,8$  мм. Значит, требуются режимы, обеспечивающие получение слоя не менее 0,8 мм. Вторым параметром науглероживания является содержание углерода в слое.

Параметр  $Y_1$  (толщина науглероженного слоя) выбран с двухсторонним ограничением  $Y_{1\min} \leq Y_1 \leq Y_{1\max}$  при  $Y_{1\min} = 0,8$  мм и  $Y_{1\max} = 1,2$  мм. Параметр  $Y_2$  (содержание углерода) выбран с одним ограничением  $Y_2 > Y_{2\min}$ ,  $Y_{2\min} = 3\%$ , что соответствует получению требуемой структуры слоя. Из предварительных исследований определены основные уровни факторов ( $X_{ij}$ ). Каждый фактор варьировался в двух уровнях. Интервалы варьирования факторов: ток ( $X_1$ ) от 120 А до 180 А с интервалом 30 А; количество проходов электрода ( $X_2$ ) от 1 до 3 через 1; амплитуда вибрации образца или детали ( $X_3$ ) от 0,6 мм до 1,0 мм через 0,2 мм.

Получены уравнения регрессии

$$Y_1 = 0,62875 + 0,21625 \cdot X_1 + 0,19625 \cdot X_2 + 0,07875 \cdot X_3 + 0,05375 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,05125 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,06625 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,04875 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (17)$$

$$Y_2 = 3,7225 + 0,1025 \cdot X_1 + 0,4475 \cdot X_2 - 0,1325 \cdot X_3 - 0,2025 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1725 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,2075 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,1025 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (18)$$

По ним были построены поверхности отклика глубины упрочненного слоя  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  и содержания углерода в слое  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  и двумерные сечения этих поверхностей (рис. 6 и рис. 7). Определены интервалы кодированных переменных  $X_1, X_2$ ; и  $X_3$ , при которых глубина науглероженного слоя ( $Y_1$ ) не менее 0,84 мм и содержание углерода ( $Y_2$ ) не менее 3,95 %.

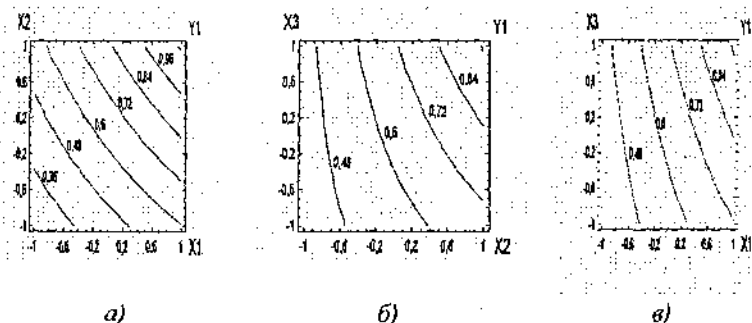


Рисунок 6 – Двухмерные сечения поверхностей откликов зависимости глубины слоя ( $Y_1$ ) от:  
 а) тока  $I$  ( $X_1$ ) и числа проходов  $n$  ( $X_2$ ); б) числа проходов  $n$  ( $X_2$ ) и амплитуды  $A$  ( $X_3$ ); в) тока  $I$  ( $X_1$ ) и амплитуды  $A$  ( $X_3$ )

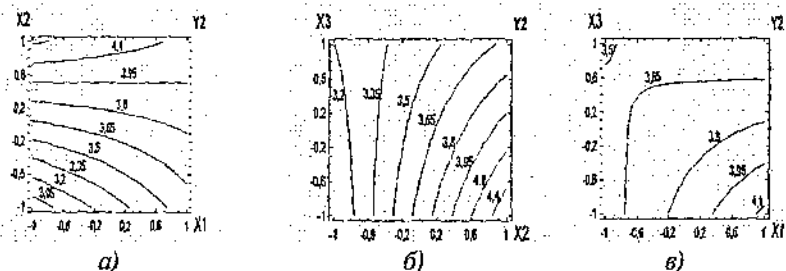


Рисунок 7 – Двухмерные сечения поверхностей откликов зависимости содержания углерода ( $Y_2$ ) от:  
 а) тока  $I$  ( $X_1$ ) и числа проходов  $n$  ( $X_2$ ); б) числа проходов  $n$  ( $X_2$ ) и амплитуды  $A$  ( $X_3$ ); в) тока  $I$  ( $X_1$ ) и амплитуды  $A$  ( $X_3$ )

Общими интервалами для глубины слоя ( $Y_1$ ) и содержания углерода ( $Y_2$ ) будут  $X_1 = [0,05; 1,00]$ ;  $X_2 = [0,35; 1,0]$ ;  $X_3 = [-0,1; 0,2]$ . При переводе кодированных переменных определены рациональные параметры процесса: ток 150...180 А; число проходов электрода 2 и 3; амплитуда вибрации 0,6 мм и 0,8 мм. На основании анализа поверхностей отклика установлено, что оптимальный режим вибродугового науглероживания: ток  $I=150$  А; число проходов  $n=3$  и амплитуда  $A=0,6$  мм.

Результаты изменения содержания углерода в науглероженном слое при изменении амплитуды вибрации и напряжения представлены на рисунке 8, а глубины науглероженной зоны в зависимости от напряжения и скорости науглероживания - на рисунке 9.

После математической обработки результатов опытов было установлено, что производительность процесса :

а) по чугуны при напряжении 28 В

$$m_q = 2,64 - 2,52 \cdot \psi, \text{ г/с}, \quad (19)$$

б) по углероду

$$m_c = 0,76 \cdot \psi^{-4,8}, \text{ г/с}. \quad (20)$$

Аналогично при науглероживании напряжением 24 В:

а) производительность по чугуны

$$m_q = 1,34 - 1,18 \cdot \psi, \text{ г/с}, \quad (21)$$

б) производительность по углероду

$$m_c = 0,85 \cdot \psi^{-2,5}, \text{ г/с}. \quad (22)$$

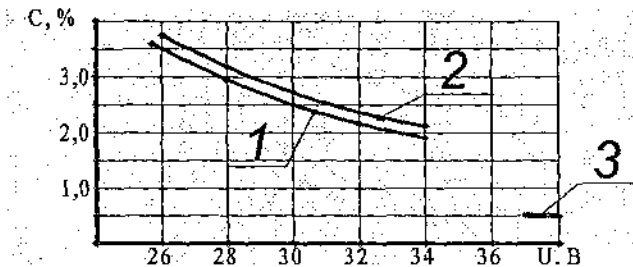


Рисунок 8 — Изменение содержания углерода в зависимости от напряжения:  
1 — амплитуда вибрации 0,8 мм; 2 — амплитуда вибрации 0,6 мм; 3 — дуговой режим оплавления

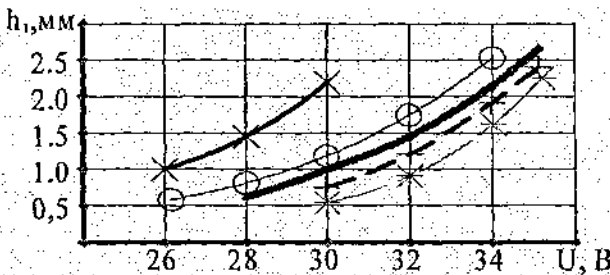


Рисунок 9 — Изменение глубины науглероживанной зоны в зависимости от  
напряжения и скорости науглероживания:

—x— скорость науглероживания  $1,70 \cdot 10^{-3}$  м/с; —o— скорость науглероживания  $2,00 \cdot 10^{-3}$  м/с;  
——— скорость науглероживания  $2,50 \cdot 10^{-3}$  м/с; --- скорость науглероживания  $2,90 \cdot 10^{-3}$  м/с;  
—\*— скорость науглероживания  $3,08 \cdot 10^{-3}$  м/с

Содержание углерода в слое:

а) при напряжении 28 В

$$C_H = \frac{0,76 \cdot \psi^{-4,8}}{2,64 - 2,52 \cdot \psi}, \% \quad (23)$$

б) при напряжении 24 В

$$C_H = \frac{0,85 \cdot \psi^{-2,5}}{1,34 - 1,18 \cdot \psi}, \% \quad (24)$$

Лабораторные исследования показали, что износостойкость науглероженных образцов почти в 3 раза выше износостойкости образцов без упрочнения и в 1,4 раза выше образцов, наплавленных сплавом «сормайт».

Эксплуатационные исследования науглероженных рабочих органов почвообрабатывающих орудий проводились в трех хозяйствах Нижегородской области на различных типах почв. При исследованиях фиксировалась наработка агрегата, затем рассчитывалась наработка на один рабочий орган. Результаты отражены (рис. 10, рис. 11 и рис. 12).

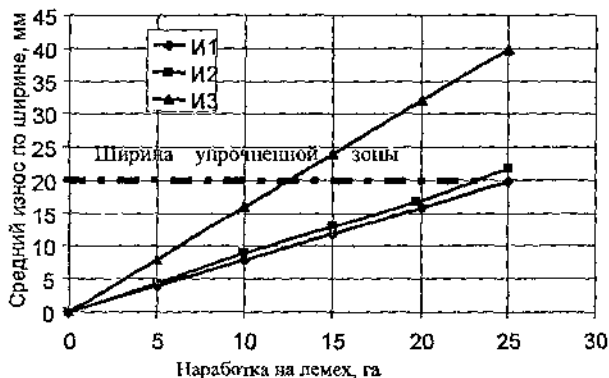


Рисунок 10 – Интенсивность изнашивания лемехов П-702Б при работе на суслинистых и суглинистых почвах;

И1 – науглероженный; И2 – наплавленный сплав «Сормайт-1»; И3 – без упрочнения

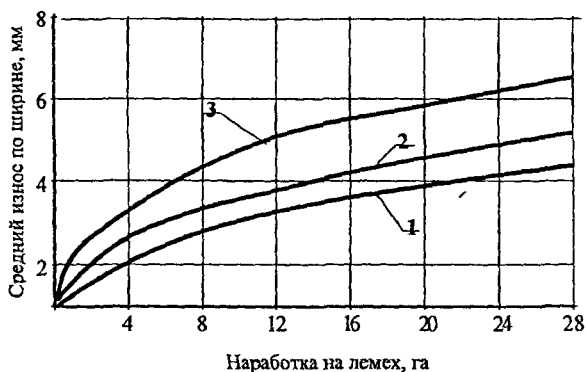


Рисунок 11 – Интенсивность изнашивания лемехов П-702Б при работе на болотно-подзолистых почвах:  
1 – науглероженный; 2 – наплавленный сплавом «Сормайт-1»; 3 – без упрочнения

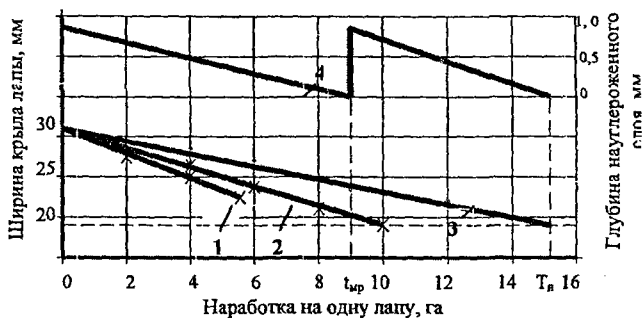


Рисунок 12 – Изменение ширины крыла культиваторных лап:  
----- – предельная ширина лапы по ТУ; 1 – изменение ширины не упрочненной лапы; 2 – изменение ширины наплавленной лапы; 3 – изменение ширины науглероженой лапы; 4 – изменение глубины науглероженого слоя

В пятом разделе «Экономическая эффективность науглероживания поверхности рабочих органов почвообрабатывающих орудий» произведен расчет экономических показателей процесса упрочнения вибродуговым науглероживанием поверхностного слоя лемехов и стрельчатых лап и сравнение с существующим в предприятии ОАО «Сельхозтехника» г. Богородск Нижегородской области технологическим процессом наплавки сплавом «сормайт» и с деталями без упрочнения.



Удельная себестоимость на 1 га пашни (руб./га):

а) лемеха П – 702Б: не упрочненного – 5,50; наплавленного – 3,28; науглероженного – 2,72;

б) стрелчатой лапы УК – 1014: без упрочнения – 6,06; наплавленной – 3,81; науглероженной – 3,76.

Годовая экономия по предприятию составила 279,6 тыс. руб. при программе науглероживания 60 тыс. деталей в год. Удельный расход электроэнергии снизился на 2,29 кВт·ч на одну деталь. Годовой экономический эффект по пахотному агрегату «ДТ – 75 + ПЛН 4 – 35» составляет 493, 4 руб., по агрегату для сплошной обработки почвы «МТЗ – 80 + КРН – 2,8» – 195, 6 руб.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Контактный режим дает науглероживание менее 0,5 мм; дуговое оплавление – большую глубину, содержание углерода менее 3 %; вибродуговой процесс – науглероженный слой до 2 мм, содержание углерода до 4,3 %.
2. Науглероженная зона при амплитуде вибрации рабочего органа 0,6 мм содержит на 0,20...0,25 % углерода больше, чем при амплитуде 0,8 мм. С увеличением скорости науглероживания глубина проплавления увеличивается, содержание углерода снижается. Оптимальная скорость науглероживания  $1,7 \cdot 10^{-3}$  м/с.
3. Оптимальная скважность технологического цикла для получения слоя белого чугуна на поверхности стального рабочего органа при напряжении 24 В – 0,70; при 28 В – 0,73.
4. Рациональный режим вибродугового науглероживания: ток 150...180 А; число проходов графитового электрода 2...3; амплитуда вибрации рабочего органа 0,6...0,8 мм. Оптимальный режим: ток – 150 А; число проходов графитового электрода – 3; амплитуда вибрации рабочего органа – 0,6 мм; глубина слоя – 0,84 мм; содержание углерода – 4,25 %.
5. Науглероженные рабочие органы почвообрабатывающих орудий имеют износостойкость в 1,8...3,0 раза выше, чем не упрочненные и на 15...18 % выше, чем наплавленные твердым сплавом. Годовой экономический эффект по пахотному агрегату «ДТ – 75 + ПЛН 4 – 35» составляет 493, 4 руб., по агрегату для сплошной обработки почвы «МТЗ – 80 + КРН – 2,8» – 195, 6 руб.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В  
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

*В изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Колпаков, А.В. Повышение износостойкости плужных лемехов методом науглероживания поверхностного слоя /А.В. Колпаков // Ремонт, восстановление и модернизация. – 2007. – №10. – С.11-12.
2. Колпаков, А.В. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин науглероживанием угольным электродом / А.В. Колпаков // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – №1. – С.42.

*В трудах и сборниках научных трудов*

3. Колпаков, А.В. Науглероживание поверхности рабочих органов сельскохозяйственных машин с целью повышения их износостойкости / А.В. Колпаков // Проблемы машиноведения: тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 10-летию Нф ИМАШ РАН. – Интелсервис, 1997. – С.43.
4. Колпаков, А.В. Упрочнение лезвий рабочих органов сельскохозяйственных машин / А.В. Колпаков // Упрочнение и восстановление деталей машин современными методами: Сб. трудов науч.-техн. конф. Верхне-Волж. отд. академии технолог. наук. – Н. Новгород, 1998. – С.21.
5. Колпаков, А.В. Исследование износостойкости упрочненных лемехов /А.В. Колпаков, С.А. Чувагин //Совершенствование процессов механизации и использование энергии в сельскохозяйственном производстве: Материалы региональной научно-практической конференции инженерного факультета Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии по итогам работы за 1996-1999 годы. – Н. Новгород, 1999.– С.360-362.
6. Лисунов, Е.А. Исследование износостойкости почвообрабатывающих орудий /Е.А. Лисунов, А.В. Колпаков //Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы II<sup>а</sup> Всероссийской научно-практической конференции «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: Сб. науч. трудов. – Киров, 2008.– Вып.8. – С.124-127.

Подписано в печать 9.10.08г. Объем 1 усл. п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 583

Отпечатано с готового оригинал-макета в мини-типографии

Свидетельство № 5551

440600, г. Пенза, ул. Московская, 74