УДК 621.793
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156779

Обоснование параметров технологического процесса восстановления деталей машин методом пластического деформирования

А. А. Дудников, В. В. Дудник, Е. В. Иванкова, О. А. Бурлака

Проведено дослідження технологічних процесів відновлення зношених деталей сільськогосподарських машин (плужних лемешів, культиваторних лап), що працюють в умовах підвищеного абразивного зношування. Визначено вплив режимних параметрів технологічного процесу на якість відновленої поверхні ріжучих елементів робочих органів машин в умовах звичайного і вібраційного деформування. Відзначено, що технології відновлення на основі вібраційних коливань дозволяють створювати нові методи обробки, які характеризуються більш високою інтенсивністю: фізико-механічними властивостями матеріалу відновлених деталей, формою і розмірами, режимами обробки. Проведено тензометричні дослідження зміни параметрів ріжучих елементів робочих органів ґрунтообробних машин, що дозволили визначити величину деформацій в процесі обробки деталей. Розроблено математичну модель динаміки абразивного зношування вище зазначених робочих органів, яка дозволила визначити закономірності розподілу інтенсивності зносу ріжучого елемента робочого органу.

На підставі отриманих кривих щільності розподілу величин зносу ріжучих елементів зазначених деталей визначено закон зношування, що дозволило виявити закономірності зміни деформаційно-напруженого стану робочої поверхні ріжучого елемента. Зроблено оцінку впливу основних факторів на процеси, що протікають в матеріалі деталей при експлуатації. Встановлені основні фактори вібраційної обробки робочої поверхні деталей: амплітуда, частота коливань обробного інструменту, час зміцнення. Встановлено критерії граничного стану деталей в умовах абразивного зношування: товщину кромки ріжучого елемента деталей та зміна розміру. Встановлена позитивна роль стискаючих напружень при обробці матеріалу деталей в підвищенні їх зносостійкості. Встановлено залежність величини зносу деталей від наступних основних факторів: матеріалу, способу відновлення, часу роботи. Доведено, що застосування вібраційних коливань обробного робочого органу, знижує інтенсивність зношування деталей ґрунтообробних машин, що є важливим і актуальним для підвищення надійності сільськогосподарських машин

Ключові слова: зміцнююча обробка, пластичне деформування, вібраційне зміцнення, залишкові напруження, шорсткість поверхні, інтенсивність зношування

Только для чтения

1. Введение

Применение эффективных технологических процессов, как при изготовлении новых деталей, так и при восстановлении изношенных, способствует повышению прочности их контактирующих поверхностей, а, следовательно, долговечности и надёжности.

Изменение качественных характеристик технологических процессов работы современных машин ставят задачи перед ремонтной службой, заключающиеся в повышении ресурса. Значительная часть (до 25 %) всех расходов, связанных с использованием машин, относятся к затратам на ремонт и техническое обслуживание [1].

Повышение долговечности деталей является комплексом проблем: применение материалов с необходимыми физико-механическими свойствами; использование эффективных технологий при изготовлении и восстановлении деталей; оптимальные режимы эксплуатации и др. [2].

Надёжность сельскохозяйственных машин, как правило, определяется долговечностью трущихся пар. В этой связи важной проблемой является проведение исследований по изысканию эффективных технологий упрочнения поверхности слоёв контактирующих деталей.

Вопросы качества обработки деталей имеют весьма важное значение, поскольку способствуют получению необходимой шероховатости трущихся поверхностей. Таким требованиям удовлетворяют вибрационная, ультразвуковая обработки, а такие методы тонкого пластического деформирования, обеспечивающие требуемое состояние поверхности деталей за счёт уплотнения их наружных слоев материала.

Эффективной технологией восстановления следует считать такую, при которой суммарные затраты на восстановление и эксплуатацию, отнесённые к единице выработанной продукции или произведенной работы, будут минимальными.

Актуальность данной проблематики состоит в комплексном изучении вибрационной обработки рабочих поверхностей деталей, работающих в абразивной среде. В частности, это касается определения оптимальных значений параметров процесса восстановления: амплитуды и частоты колебаний обрабатывающего инструмента, и времени обработки материала детали.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Решение проблемы надежности сельскохозяйственной техники является резервом повышения производительности труда и эффективности производства, что позволит на 25–30 % сократить энергетические ресурсы на устранение отказов, связанных с износом деталей [2].

Анализ работы [3] указывает, что немалая часть изношенных деталей и сборочных единиц имеет значительную остаточную стоимость. При восстановлении расходуется в 20…30 раз материалов меньше, чем при изготовлении новых, одна-

Не является переизданием

ко авторы рассматривают этот вопрос только концептуально, вследствие этого имеется необходимость изучить этот вопрос более подробно.

Повышения долговечность деталей и сборочных единиц можно достигнуть применением передовых технологий по улучшению свойств материалов, в том числе и с использованием вибрационных колебаний. Авторы [4] отмечают, что этого можно достигнуть при применении разных конструкционных схем в процессе обработкой давлением. Тем не менее, предложенная в работе схема не позволяет применить ее при восстановлении деталей.

Ряд исследователей [5, 6] отмечают, что применение эффективных технологий при изготовлении и восстановлении деталей способствует повышению усталостной прочности и обеспечивает снижение исходной шероховатости их материала. Это связано с наличием в поверхностном слое материала остаточных напряжений сжатия. Однако следует отметить, что одной из главных задач при решении вопроса повышения надежности, долговечности и усталостной прочности деталей машин следует считать выбор таких режимов обработки, которые обеспечивают в поверхностном слое материала деталей наличие остаточных напряжений сжатия.

По мнению [7], в процессе эксплуатации деталей машин в слоях, прилегающих к поверхности, нередко образуется новая структура, по сравнению с сердцевиной. В ней возникают остаточные напряжения. Однако их влияние на прочностные характеристики материала деталей, работающих в почвенной среде, еще не полностью изучено в связи с недостаточными пока исследованиями в этой области.

Как отмечают авторы [8], сбережение показателей износостойкости и прочностных характеристик обрабатываемых поверхностей достигается формированием оптимальной структуры поверхностных слоев, что частично связано с применением направленных колебаний. Однако данный процесс не полностью раскрыто в работе, что накладывает определенные ограничения на применение предложенных решений.

Повышение долговечности восстанавливаемых (изготавливаемых) деталей, в большинстве случаев, может быть обеспечено приданием материалу поверхностного слоя необходимых физико-механических свойств при циклическом нагружении [9]. В поверхностном слое при его деформации возникают все характеристики сопротивления деформации (пределы прочности, текучести, упругости, твердости, усталости и др.). Пластичность при этом понижается, т. е. металл становится более хрупким.

К числу перспективных методов пластического поверхностного деформирования относятся метод вибрационно-центробежной упрочняющей обработки [10]. Как отмечают авторы [11], он способствует улучшению механических свойства рабочей поверхности детали. Исследования физико-механических свойств поверхностного слоя детали, упрочнённых этим методом, свидетельствуют о высокой эффективности: производительность труда повышается в 4…6 раз, что подтверждает его экономическую эффективность [2].

Только для ознакомления

В работе [12] авторы указывать о повышение эффективности технологического процесса восстановления деталей при применении вибрационных колебаний. Все же, несмотря на преимущества, остается не раскрытой проблема поиска оптимальных параметров при пластическом деформировании.

При вибрационной обработке периодически происходит отрыв поверхности рабочей части инструмента от обрабатываемой поверхности детали. При этом происходит микропроцесс разгрузки контактируемых поверхностей инструмента и детали. Динамическое воздействие возрастает с увеличением амплитуды и частоты колебаний обрабатывающего инструмента [13]. Данные параметры, как отмечают авторы [14], оказывают существенное влияние на поверхностное упрочнение деталей.

Износостойкость деталей почвообрабатывающих машин, подвергаемых вибрационной обработке, во многом определяется глубиной закаленного слоя. Однако работа [15] свидетельствует об отсутствии конкретных рекомендаций по определению его значений в литературе.

В связи с этим, нужны комплексные исследования по применению вибрационных колебаний в технологических процессах восстановления деталей почвообрабатывающих машин.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение надежности деталей почвообрабатывающих машин путем определения рациональных технологических параметров при их восстановлении и упрочнении методом вибрационной деформации.

Для реализации поставленной цели определено решение следующих задач:

– проанализировать условия работы деталей почвообрабатывающих машин для восстановления вибрационным методом;

– исследовать и определить технологические параметры вибрационной обработки указанных деталей, позволяющих управлять качеством их восстановления.

4. Методика определения показателей качества

Показателями качества упрочняющей обработки деталей машин при поверхностном пластическом деформировании их материала являются: микротвёрдость поверхности, толщина упрочненного слоя и степень упрочнения, шероховатость обработанной поверхности, величина остаточных напряжений и характер их распределений.

Выбор технологии деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания (плужные лемехи, культиваторные лапы и др.), обосновывали учётом степени изнашивания, характера дефектов их режущих элементов, свойств материала, конструктивных параметров, точности обработки. Анализ состояния восстановленных и новых указанных деталей проводили по их износу в процессе проведения лабораторных и эксплуатационных испытаний.

Не является переизданием

Лабораторные исследования по упрочнению деталей методом вибрационного деформирования проводились на изготовленной установке, состоящий из вибровозбудителя, системы гидравлического подъёма и опускания, вспомогательного оборудования. Скорость деформирования регулировали клиноременным вариатором привода насоса.

Величина усилия деформирования фиксировалась манометром и приспособлением для стабилизации его показаний.

Для изучения влияния вида нагружения (обычного и вибрационного) на прочностные характеристики обрабатываемой поверхности исследования проводили на образцах-моделях, а также на новых дисках копачей, плужных лемехах и культиваторных лапах. Амплитуда колебаний вибратора составляла 0,5–1,0 мм, частота колебаний обрабатывающего инструмента 700–2100 мин$^{-1}$, время обработки – 20–40 с.

Исследования структуры и свойств материала указанных деталей проводили с использованием микроскопа МИМ-8, твердомера ТМ-2М, микротвердомера ПМТ-3М. Шероховатость поверхности образцов замерялась на профилометре портативном модели 253 (№ В-334).

Тензометрические исследования проводились с использованием аппаратуры, включающей осциллограф Hitachi V-1565, двенадцатиканальную установку ТУП-12. Скорость протяжки фотобумаги в осциллографе составляла 5 см/с. В качестве датчиков применяли проволочные тензорезисторы с базою 5 мм и сопротивлением 100 Ом. Тензодатчики приклеивали на образцы клеем БФ-88 и подвергали термической обработке, согласно инструкции по наклейке.

Степень уплотнения поверхности ε_y вычисляли по следующей зависимости:

$$\varepsilon_{\text{у}} = \frac{H_{\text{у}} - H_{\text{н}}}{H_{\text{н}}} \cdot 100\,\%, \qquad (1)$$

где $H_{\text{у}}$ – микротвёрдость упрочнённой поверхности; $H_{\text{н}}$ – микротвёрдость неупрочнённой (начальной поверхности).

Оценка шероховатости поверхности осуществлялась по критериям R_a и R_z.

Образцы для металлографических исследований вырезалась из указанных деталей, восстановленных разными способами, размером 30×20×30 мм.

Исследованиями было установлено, что изменение толщины режущей кромки культиваторной лапы и плужного лемеха распределяется по нормальному закону и следующей зависимости:

$$f(h,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_h}} \exp\left\{-\frac{h - \bar{h}(t)^2}{2\sigma_h^2}\right\}, \qquad (2)$$

Только для чтения

где h – текущее значение толщины режущей кромки лезвия; $\bar{h}(t)$ – среднее значение толщины кромки лезвия; σ_h – среднеквадратическое отклонение в момент времени t.

При пластическом деформировании образца в связи с изменением его размеров, происходит уплотнение материала, что способствует упрочнению обрабатываемой поверхности [16].

Степень уплотнения (упрочнения) η определяли по следующей зависимости:

$$\eta = \log \varepsilon \frac{\delta_S}{\delta_T}, \tag{3}$$

где ε – логарифмическая степень деформации; δ_S – напряжение течения металла; δ_T – предел текучести.

5. Результаты исследования упрочнения материала рабочих органов культиваторных лап, плужных лемехов и дисков копачей

5. 1. Моделирование динамики изнашивания режущих элементов

Построение математической модели динамики абразивного изнашивания режущих элементов почвообрабатывающих машин включало:

а) обработку базы накопленных данных по уже имеющимся техническим процессам восстановления указанных деталей;

б) оценку влияния величины полученных основных факторов на протекающие процессы в материале деталей при эксплуатации в условиях абразивной среды;

в) моделирование динамики протекания процессов в поверхностных слоях указанных деталей.

Изнашивание поверхности обрабатывающих рабочих органов культиваторных лап и плужных лемехов может быть описано дифференциальным уравнением:

$$\frac{dJ}{dt} = \varphi(J,t) + \psi(J,t)\cdot\xi(t), \tag{4}$$

где $\varphi(J,t)$ и $\psi(J,t)$ – функции, характеризующие интенсивность изнашивания; $\xi(t)$ – случайная составляющая; t – продолжительность изнашивания.

Поскольку процесс изнашивания является случайным, то он может оцениваться вероятностью, удовлетворяющей интегральному уравнению Маркова [17]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{da(J,t)\omega}{dJ} + \frac{1}{2}\frac{d\text{в}(J,t)\omega}{dJ^2}, \tag{5}$$

Не является переизданием

где $a(J,t)$ и в(J,t) – соответственно коэффициенты, описывающие среднюю скорость случайного процесса изнашивания.

Плотность распределения долговечности определяется величиной износа режущих элементов:

$$f(t)=\int_0^{\infty} g(t)\gamma(t-t_0)\,\mathrm{d}t, \tag{6}$$

где $g(t)$ – плотность распределения вероятности исследуемого процесса допустимым значением износа; $\gamma(t-t_0)$ – плотность распределения начальной стадии процесса изнашивания:

$$g(t)=\frac{d}{dt}\int_{-\infty}^{t}(J_0,t_0,J,t), \tag{7}$$

Совместное решение уравнений (5) и (6) позволило определить значения плотности распределения изнашивания режущих элементов (рис. 1).

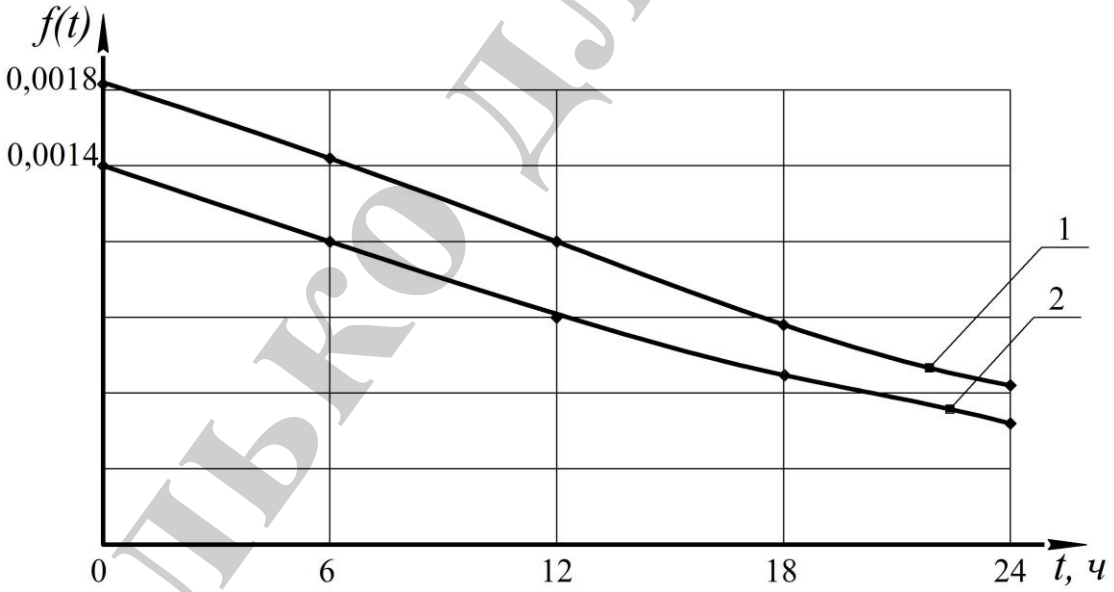

Рис. 1. Плотность распределения долговечности режущих элементов:
1 – плужного лемеха; 2 – стрельчатой лапы культиватора

Плотность распределения долговечности режущих элементов определяется величиной износа в соответствии с однородным процессом Маркова [17].

Только для чтения

5. 2. Определение оптимальных параметров упрочняющей обработки

Экспериментальными исследованиями процесса упрочнения материала деталей, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания, установлены критерии их предельного состояния [7].

Для лемехов почвообрабатывающих машин такими критериями следует считать величину изнашивания носка Δh и толщину стенки лемеха Δa; для культиваторных стрельчатых лап – изнашивание ширины крыла на конце лезвия Δc и изнашивание носка Δh.

Результаты экспериментальных исследований износа культиваторных лап и плужных лемехов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований износа деталей подвергнутых вибрационному упрочнению

Номер опыта	Амплитуда колебаний обрабатывающего инструмента A, мм	Частота колебаний n, мин$^{-1}$	Время упрочнения t, с	Величина износа	
				Варианты лап	Варианты лемехов
1	0,5	700	20	1,22	1,42
2	0,5	700	30	0,82	1,24
3	0,5	700	40	0,77	1,20
4	0,5	1400	20	0,91	0,85
5	0,5	1400	30	0,49	1,47
6	0,5	1400	40	0,63	1,40
7	0,5	2100	20	0,97	1,68
8	0,5	2100	30	0,82	1,46
9	0,5	2100	40	1,01	1,34
10	0,75	700	20	1,04	1,47
11	0,75	700	30	0,80	1,22
12	0,75	700	40	1,00	1,19
13	0,75	1400	20	0,64	0,99
14	0,75	1400	30	0,47	0,95
15	0,75	1400	40	0,49	0,91
16	0,75	2100	20	0,78	1,28
17	0,75	2100	30	0,67	1,24
18	0,75	2100	40	0,69	1,12
19	1,0	700	20	1,08	1,80
20	1,0	700	30	0,97	1,44
21	1,0	700	40	1,03	1,66
22	1,0	1400	20	0,94	1,32
23	1,0	1400	30	0,71	1,11

Не является переизданием

24	1,0	1400	40	0,74	1,24
25	1,0	2100	20	1,10	1,79
26	1,0	2100	30	0,98	1,10
27	1,0	2100	40	1,05	1,72

Экспериментально установлены следующие параметры вибрационного упрочнения указанных деталей, обеспечивающие технологический процесс упрочняющей обработки. При восстановлении плужного лемеха амплитуда колебаний обрабатывающего инструмента: A=0,5 мм, время обработки t=20 с, частота колебаний n=1400 мин$^{-1}$.

Оптимальными режимами обработки культиваторных стрельчатых лап являются: амплитуда колебаний A=0,75 мм; частота колебаний обрабатывающего инструмента n=1400 мин$^{-1}$; время упрочнения t=30 с.

Анализ микроструктурных исследований показал, что при вибрационной обработке микроструктура более мелкозернистая и равномерная (рис. 2, 3), что создает условия, которые способствуют упрочнению обработанной поверхности.

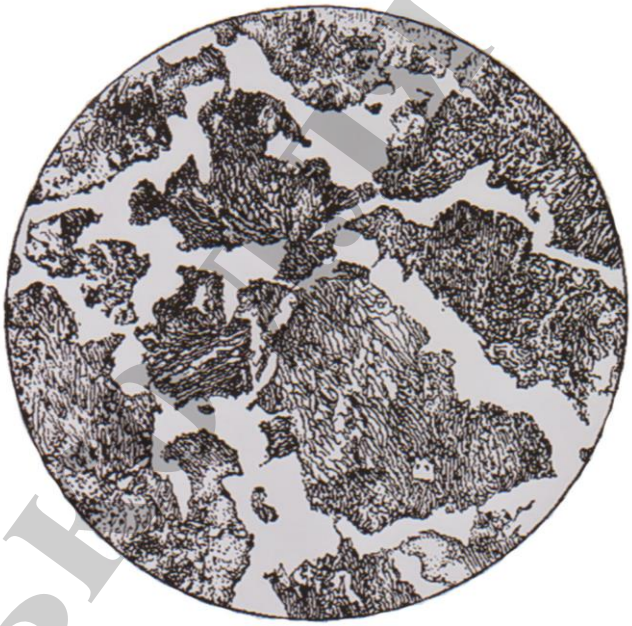

Рис. 2. Микроструктура стали 45 с наплавкой сормайтом без упрочнения, ×50

Только для чтения

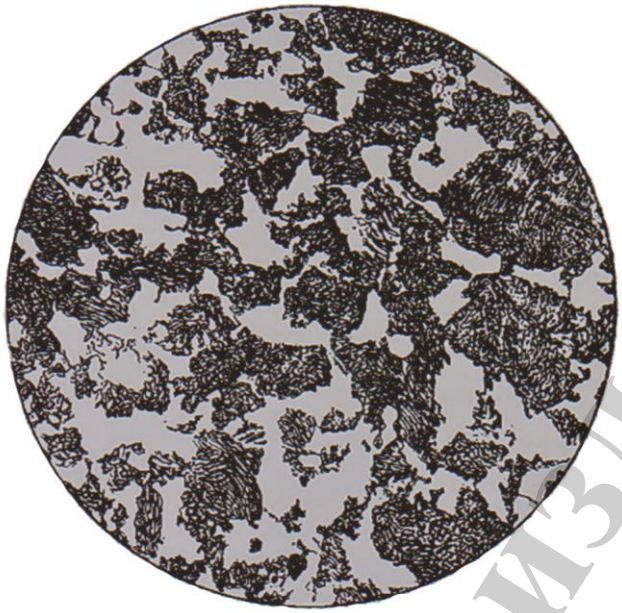

Рис. 3. Микроструктура стали 45 с наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнения, ×50

Выявлено, что по глубине в материале наплавки и основы культиваторной лапы, восстановленной приваркой угловой пластины из стали 45 с наплавкой сормайтом после вибрационного упрочнения микротвердость составила (табл. 2).

Таблица 2

Результаты изменения микротвердости

Глубина слоя, мм	0,5	1,0	1,5	2,0
Материал наплавки				
Микротвердость, Н/мм^2	701	497	388	317
Материал основы лапы				
Микротвердость, Н/мм^2	609	452	356	302

При восстановлении деталей почвообрабатывающих машин в материале их режущих элементов возникающие остаточные напряжения, существенно влияющие на их износостойкость: остаточные напряжения сжатия способствуют повышению прочности, а остаточные напряжения растяжения снижают ее.

По полученным тензометрическим данным построены кривые остаточных напряжений по глубине режущих элементов (рис. 4).

Не является переизданием

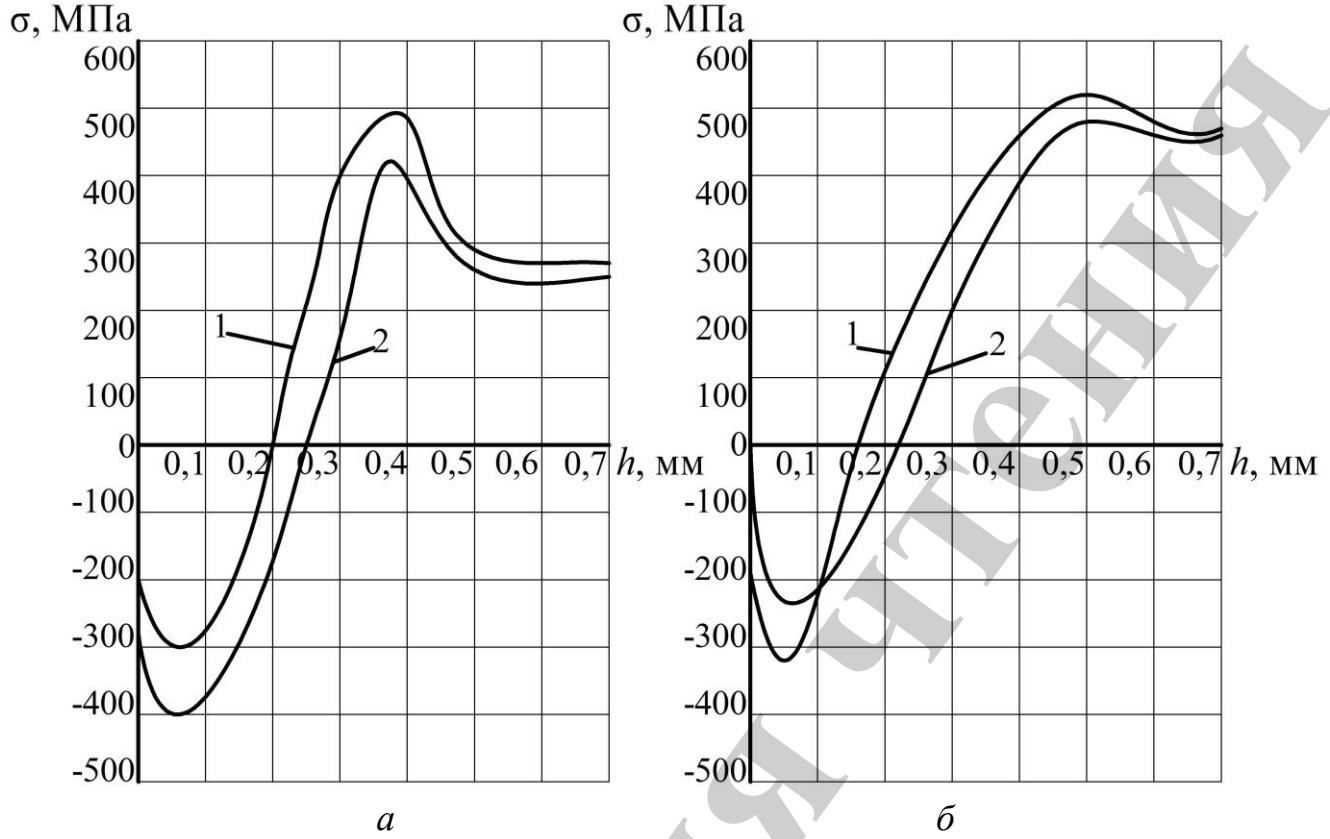

Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в зависимости от метода восстановления: *а* – культиваторных лап: 1 – восстановленных приваркой угловых пластин из стали 45 с последующей наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением, 2 – новых лап, упрочненных вибрационным методом; *б* – плужные лемехи: 1 – восстановленных приваркой шин из стали 45 с наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением, 2 – новых лемехов, упрочненных вибрационным деформированием

5. 3. Оценка износостойкости деталей почвообрабатывающих машин

Экспериментальные (стендовые) исследования износостойкости материала указанных деталей, восстановленных разными методами, проводились на почвенном канале, при соблюдении условия подобия их работы на стенде и в процессе эксплуатации.

Техническая характеристика используемого при испытании стенда приведена в табл. 3.

Для оценки влияния состава абразивной смеси в почвенном канале на величину изнашивания режущих элементов указанных деталей использовали следующий ее состав: 65–70 % кварцевого песка и гравия, 30–35 % глины, цемента и пыли [18].

Стендовые испытания позволили в сравнительно короткое время оценить исследуемые варианты восстановления деталей и определить наиболее эффективный.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

Таблица 3

Характеристика испытательного стенда

Параметры стенда	Значения
1. Размеры стенда, мм: длина ширина высота	 10000 1200 800
2. Мощность электродвигателя, кВт	10
3. Максимальное тяговое усилие, Н	3000
4. Диапазон скоростей, м/с	1–3

Результаты исследований (табл. 4) свидетельствуют, что величина износа деталей зависит от следующих основных факторов: их материала, способа обработки и времени работы.

Таблица 4

Изменение линейного изнашивания режущего элемента в зависимости от метода упрочнения и времени работы

Варианты деталей	Значение величины износа, мм			
	6 ч.	12 ч.	18 ч.	24 ч.
1. Лапа культиватора, восстановленная приваркой угловой пластины из стали 45 с наплавкой сормайтом	1,30	2,60	3,92	5,15
2. Лапа культиватора, восстановленная приваркой угловой пластины из стали 45 с наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением	1,12	2,28	3,40	4,22
3. Лемех плуга (новый), подвергнутый вибрационному упрочнению	0,28	0,60	0,79	1,14
4. Лемех, восстановленный приваркой шин из стали 45 с последующей наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением	0,25	0,52	0,59	0,80

Данные табл. 4 свидетельствуют, что величина износа культиваторных лап, восстановленных приваркой угловых пластин из стали 45 с наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением в 1,22 раза меньше, чем при обычном восстановлении.

Интенсивность износа плужных лемехов, восстановленных приваркой шин из стали 45 с последующей наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением в 1,42 раза ниже по сравнению с новыми лемехами, подвергнутыми вибрационному упрочнению.

На рис. 5 показан лемех, восстановленный приваркой шин из стали 45 с последующей наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением.

Не является переизданием

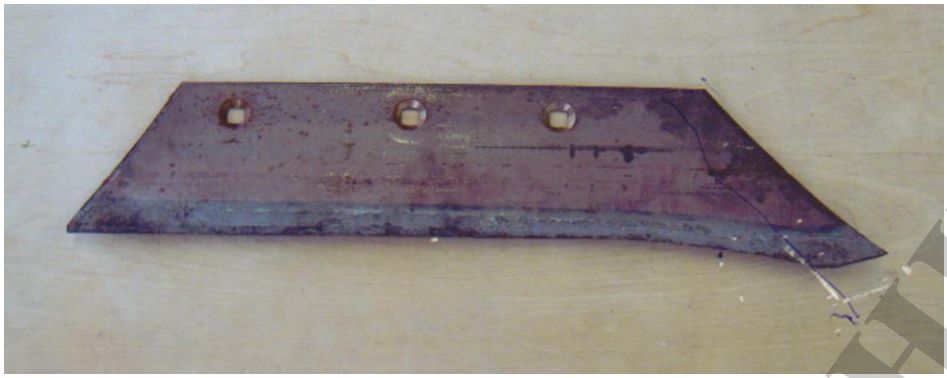

Рис. 5. Лемех, восстановленный приваркой шин из стали 45 с последующей наплавкой сормайтом и вибрационным упрочнением

Эксплуатационные показатели указанных вариантов лемехов показали их соответствие стендовым испытаниям. Более надежными (на 31 %) оказались лемехи, восстановленные приваркой шин из стали 45 с автоматической наплавкой сормайтом и упрочненные вибрационным деформированием.

6. Обсуждение результатов исследований повышения износостойкости деталей почвообрабатывающих машин вибрационным упрочнением

Проведенные исследования позволили разработать технологический процесс восстановления деталей почвообрабатывающих машин методом вибрационного упрочнения. Особенностью данной технологии является использование вибрационных колебаний при пластическом деформировании для компенсации изношенных поверхностей деталей. Выбранные оптимальные параметры обрабатывающего инструмента позволяют снизить величину изнашивания деталей. Преимуществом технологии является обеспечение более высокой износостойкости по сравнению с существующими методами, за счет улучшения структуры поверхностного слоя. Повышение износостойкости является следствием равномерного распределения усилия обработки между микроскопическими объемами обрабатываемых деталей. Это обеспечивает более равномерную мелкозернистую структуру материала.

Следует обратить внимание на недостатки, которые заключаются в увеличении изнашиваемости в зависимости от состава и влажности обрабатываемой почвы. Данное суждение может быть использовано при разработке, а также усовершенствовании технологий упрочнения давлением в машиностроении и ремонтном производстве.

Исследования являются продолжением проведенных ранее работ, основывающихся на использовании вибрационных колебаний в технологических процессах.

7. Выводы

1. Исследовано влияние режимных параметров при вибрационном пластическом деформировании. При амплитуде A=0,75 мм, частоте n=1400 мин$^{-1}$ колебаний

Только для чтения

обрабатывающего инструмента и времени обработки t=30 с величина износа культиваторных лап, восстановленных по разработанной технологии в 1,22 раза меньше, чем при обычном восстановлении.

2. Интенсивность износа плужных лемехов, при амплитуде A=0,5 мм, частоте n=1400 мин$^{-1}$ колебаний обрабатывающего инструмента и времени обработки t=20 с, восстановленных по данной технологии в 1,42 раза ниже по сравнению с новыми лемехами.

3. Данные, полученные в результате проведенных исследований, амплитуда, время и число колебаний обрабатывающего инструмента, позволяют их использовать при разработке технологических операций восстановления других деталей почвообрабатывающих машин.

Литература

1. Бабей Ю. И., Бутков Б. И., Сысов В. Г. Поверхностное упрочнение металлов. Киев: Наукова Думка, 1995. 253 с.
2. Білоусько Я. К., Бурилко А. В., Галушко В. О. Проблеми реалізації технічної політики в агропромисловому комплексі. Київ: ННЦ ІАЕ, 2007. 216 с.
3. Świercz R., Oniszczuk-Świercz D. Experimental Investigation of Surface Layer Properties of High Thermal Conductivity Tool Steel after Electrical Discharge Machining // Metals. 2017. Vol. 7, Issue 12. P. 550. doi: https://doi.org/10.3390/met7120550
4. Nikolaenko A., Hussein A. T. Modeling of vibrating machine-tool with improved construction // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. 2014. Vol. 14, Issue 1. P. 174–181. URL: http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot14_1/Teka_14_1.pdf
5. Effect of vibro-impact strengthening on the fatigue strength of metallic surfaces / Djema M., Hanouda K., Babichev A., Saidi D., Halimi D. // Metall. 2012. Issue 5. P. 23–25.
6. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir / Mamalis A. G., Grabchenko A. I., Mitsyk A. V., Fedorovich V. A., Kundrak J. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 70, Issue 1-4. P. 263–276. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6
7. Dynamics of wear of the cutting elements of tillers / Dudnykov A., Belovod A., Pasyuta A., Gorbenko A., Kelemesh A. // Annals of Wasaw University of Life Sciencec – SGGW. 2015. Issue 65. P. 15–19.
8. Surface Modification of Products by Plastic Deformation and the Application of Functional Coatings / Belevskii L. S., Belevskaya I. V., Belov V. K., Gubarev E. V., Efimova Y. Y. // Metallurgist. 2016. Vol. 60, Issue 3-4. P. 434–439. doi: https://doi.org/10.1007/s11015-016-0310-y
9. Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State / Hamouda K., Bournine H., Tamarkin M. A., Babichev A. P., Saidi D.,

Не является первоисточником

Amrou H. E. // Materials Science. 2016. Vol. 52, Issue 2. P. 216–221. doi: https://doi.org/10.1007/s11003-016-9946-9

10. Вибрационно-центробежная упрочняющая обработка деталей: монография / Афтаназив И. С., Берник П. С., Сивак Р. И., Клименко А. Д. Винница: ВДАУ, 2002. 235 с.

11. Stotsko Z., Kusyj J., Topilnytskyj V. Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindric long-sized machine parts // Journal of Manufacturing and Industrial Engineering. 2012. Vol. 11. P. 15–17.

12. Effects of vibration amplitude and relative grain size on the rheological behavior of copper during ultrasonic-assisted microextrusion / Lou Y., He J. S., Chen H., Long M. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 89, Issue 5-8. P. 2421–2433. doi: https://doi.org/10.1007/s00170-016-9288-7

13. Gichan V. Active control of the process and results of treatment // Journal of Vibroengineering. 2011. Vol. 13, Issue 2. P. 371–375.

14. Jurcius A., Valiulis A., Kumslytis V. Vibratory stress relieving – It's advantages as an alternative to thermal treatment // Journal of Vibroengineering. 2008. Vol. 10, Issue 1. P. 123–127.

15. The Impact of Mechanical Vibration on the Hardening of Metallic Surface / Djema M. A., Hamouda K., Babichev A. P., Saidi D., Halimi D. // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 626. P. 90–94. doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.626.90

16. Effect of part cutting type on stress state of material / Dudnykov A., Belovod O., Dudnyk V., Kanivets O., Kelemesh A. // Annals of Wasaw University of Life Sciencec. SGGW. 2011. Issue 58. P. 85–87.

17. Анілович В. Я., Гринченко О. С., Литвиненко В. Л. Надійність машин в завданнях та прикладах. Харків: Око, 2001. 320 с.

18. Качинский Н. А. Физика почв. Москва: Высшая школа, 1985. 224 с.

Только для чтения