

3. Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль процессов нагрева и упрочнения деталей на машиностроительных предприятиях : сборник научных трудов / под ред. П. С. Гурченко. – Мн. : УП «Технопринт», 2002. – 163 с.

4. Conit, Rabid and Rabedur Rabewerk – Entwicklungen mit Höchster Materialqualität / Anbau – Drehpflüge /. – 1994. – №7. – С. 26–27.

5. Landmaschinenwelt «97/98». Technische Anbeningen, Vorbehalten, 1997. – 181 с.

6. Бернштейн Д. Б. Лемехи плугов. Анализ конструкций, условий изнашивания и применяемых материалов / Д. Б. Бернштейн, И. В. Лискин. – М. : ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш, 1992. – 36 с.

7. Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль термических процессов на машиностроительных предприятиях : сборник трудов / под ред. П. С. Гурченко. – Мн. : РДУП «Издательство ОСПИ», 2005. – 104 с.

8. Патент на изобретение № 223370. РФ. Рабочий орган почвообработывающих машин (варианты) / Г. Ф. Бетенья, В. П. Лобозов [и др.]. – М. : ФИПС, 2004. – 24 с.

9. Патент на полезную модель. № 1590. РБ. Изделие с самозатачивающимся биметаллическим почворезущим профилем / Г. Ф. Бетенья, В. С. Ивашко [и др.]. – Мн. : НЦИС, 2004. – 3 с.

УДК 621.792

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ОБРАБОТКОЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*Кожуро Л. М., доктор техн. наук, профессор;  
Капцевич В. М., доктор техн. наук, профессор*

*(УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск)*

Для повышения конкурентоспособности изделий машиностроения необходимо в первую очередь повышать их надежность и долговечность технологическими методами, так как достигнутый уровень последних не соответствует возросшим современным требованиям. Об этом свидетельствует тот факт, что удельный вес новых запасных

частей за последние годы увеличился и составил более 65% от стоимости приобретенных технических средств [1]. Одной из основных часто встречающихся причин выхода из строя деталей машин является износ их рабочих поверхностей, так как форсирование любого рабочего процесса в машине неизбежно вызывает интенсификацию процессов изнашивания трущихся деталей.

Для упрочнения и восстановления деталей машин применяют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Каждый из известных способов упрочняющей обработки в силу своих особенностей имеет рациональную область применения и не всегда решает задачи, вызванные необходимостью повышения долговечности деталей машин. Поэтому наряду с совершенствованием известных способов упрочняющей обработки необходима разработка новых, дополняющих уже известные и расширяющих их технологические возможности. При этом актуальным является совмещение способов упрочняющей обработки, использующих комбинированное воздействие потоков энергии различного вида на обрабатываемую поверхность детали. Это позволяет получать качественно новые эксплуатационные характеристики поверхностей деталей, а также снижать энергоемкость процессов за счет использования технологического тепла.

В последние годы широко исследуются и получают практическое применение методы обработки деталей машин, использующие энергию магнитного и электрического полей. К ним можно отнести электромагнитную наплавку (ЭМН) и магнитно-абразивную обработку (МАО). Поскольку связкой порошка при указанных методах обработки служит энергия магнитного поля, появляется возможность существенным образом изменить условия упрочнения и восстановления, а также полирования изделий. В связи с этим применение этих методов обработки становится задачей первостепенной важности.

Электромагнитная наплавка [2–4], к достоинствам которой следует отнести высокую прочность сцепления наплавляемого покрытия с основой, минимальное тепловыделение и расплавление материала основы, что исключает термическое деформирование обрабатываемых деталей, является прогрессивным методом упрочнения и восстановления изделий. Сочетание ЭМН с поверхностным пластическим деформированием (ППД) способствует повышению эксплуатационных свойств различных деталей, так как при этом снижаются шеро-

ховатость поверхности и пористость покрытия, увеличиваются плотность и твердость поверхностного слоя, повышается сопротивление усталости и др.

Использование технологического тепла ЭМН при упрочнении ППД позволяет совместить операции наплавки и термомеханического упрочнения и создать условия для комбинированного формирования параметров качества поверхностного слоя, наиболее полно с точки зрения эксплуатационной наследственности параметров процесса отвечающих служебному назначению деталей машин.

Известно, что наплавленный металл отличается неоднородностью структуры и химического состава, наличием сварочных дефектов, значительными колебаниями твердости, высокой внутренней напряженностью и другими дефектами, поэтому представляет интерес оценка эксплуатационных свойств покрытий, полученных электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием различных ферропорошков, по критериям износостойкости и усталостной прочности.

Износостойкость покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД, изучалась при трении скольжения на машине для испытаний материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 по схеме «вал-колодка» линейным методом.

Покрытия толщиной 1 мм на диаметр наносили на образцы из стали 45 с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм, подвергнутые нормализации. Колодка из чугуна ХТВ имела высоту 10 мм, что позволило сохранять измерительную базу, так как по краям образца оставались цилиндрические ленточки. Измерение образцов производили в двух взаимно перпендикулярных плоскостях по двум сечениям, используя оптический длинномер ИЗВ-1, точность измерения которого составляла 0,001 мм. Для ускорения процесса изнашивания использовали масляно-абразивную смесь (масло индустриальное 20, содержащее 2% карбида бора зернистостью 4–5 мкм), которую в количестве 40 мл заливали в камеру для масла. При этом для каждой партии испытываемых образцов использовали свежую порцию смеси.

Абразивные частицы во взвешенном состоянии в период испытаний поддерживались лопастями крыльчатки, посаженной на одном валу с образцом, а стабильность температурного режима смеси поддерживалась пропусканием воды через двойное дно камеры.

Образцы после нанесения покрытий шлифовались. Затем они прирабатывались с колодкой. Окончание приработки определяли по стабилизации момента трения пары, регистрируемого аппаратурой машины.

Режим испытаний соответствовал условиям работы деталей авто-тракторных и сельскохозяйственных машин, для которых характерны скорость скольжения – до 2,5 м/с и удельная нагрузка – 1,5–3,0 МПа. Испытывали партии по пять образцов.

Результаты испытаний сопоставляли с эталоном (сталь 45 нормализованная и закаленная с нагрева ТВЧ на глубину 1,2–1,6 мм до 52–54 HRC). Кроме того, учитывали, что абразивное изнашивание имеет преимущественно механический характер разрушения поверхности. Интенсивность его, как известно [5, 6], в наибольшей степени зависит от твердости сопрягаемых материалов, удельной нагрузки и скорости перемещения.

Исследования эксплуатационных свойств покрытий проводили на образцах, наплавленных и обработанных при оптимальных условиях и режимах процессов, установленных в работе [4] (образцы после ЭМН и ЭМН с ППД подвергали абразивному шлифованию и МАО для получения шероховатости поверхности  $Ra = 0,8–0,6$  мкм).

Триботехнические характеристики покрытий приведены в таблице 1, где в числителе представлены результаты покрытий, полученных ЭМН, а в знаменателе – ЭМН с ППД. Их анализ показывает, что решающее влияние на износостойкость покрытий оказывают химический и фазовый составы покрытий и метод их нанесения. Так, покрытия, полученные ЭМН с ППД, для всех исследуемых материалов ферропорошков имеют более высокую износостойкость по сравнению с покрытиями, полученными ЭМН. Обусловлено это тем, что ППД повышает плотность и однородность покрытия; воздействует на формирование его структуры, делая ее более дисперсной; приводит к изменению характера распределения упрочненного слоя, в котором происходят превращения, соответствующие полной закалке. Вместе с тем момент трения и коэффициент трения для методов нанесения покрытий не имеют существенных различий, а для ферропорошков они значительны.

Таблица 1. Триботехнические характеристики покрытий, полученных ЭМН и ЭМН с ППД

Материал ферропорошка	Параметр				
	Интенсивность изнашивания J, мкм/км	Момент трения M <sub>тр</sub>		Коэффициент трения	
		с маслом	всухую	с маслом	всухую
ПР-Сталь 45-1%B	3,6/3,2	<u>0,86</u> 0,76	<u>1,37</u> 1,26	0,13/0,12	0,21/0,19
Fe-6,5%Cr	2,2/2,0	<u>0,79</u> 0,70	<u>1,06</u> 1,00	0,12/0,11	0,16/0,15
Fe-9%B	2,8/2,9	<u>0,93</u> 0,90	<u>1,10</u> 0,98	0,14/0,13	0,16/0,15
Fe-5%V	3,4/2,2	<u>0,99</u> 0,86	<u>1,58</u> 1,45	0,15/0,13	0,24/0,22
P6M5K5	2,1/1,6	<u>0,73</u> 0,67	<u>0,87</u> 0,80	0,11/0,10	0,13/0,12
Сталь 45 (эталон)	4,1	0,84	1,26	0,12	0,19

Известно, что основная причина разрушения деталей, работающих в условиях циклического нагружения, – усталость металла. Усталостное разрушение начинается с поверхностного слоя, от физико-механических свойств которого зависит в значительной степени предел выносливости. Поэтому в работе проводились исследования усталостной прочности деталей, упрочненных ЭМН с ППД. При этом исследовалось влияние на усталостную прочность наплавленных поверхностей только от метода наплавки и химического состава ферропорошка.

Исследование проводили на образцах круглого сечения из нормализованной стали 45, имеющих соотношение  $l/d=15$ , где  $l=150$  мм – длина и  $d=10$  мм – диаметр. В качестве ферропорошков применили Fe-5%V и Fe-6,5%Cr. Образцы после ЭМН с ППД подвергались абразивному шлифованию и MAO, обеспечивая шероховатость поверхности  $Ra=0,8-0,6$  мкм. Испытания образцов на усталостную прочность проводили на машине типа У-20М в условиях действия знакопеременной нагрузки с постоянной амплитудой.

Кривые выносливости строили в двойной логарифмической системе координат, благодаря чему функциональная зависимость напряжений от числа циклов  $\sigma = f(N)$  представлена уравнением

$$\text{mlg } \sigma - + \text{lg}N = \text{lg}C, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;

$m$  – параметр кривой,  $m = 10$ ;

$N$  – число циклов нагружения;

$C$  – коэффициент.

Следовательно, криволинейная зависимость  $\sigma = f(N)$  в логарифмических координатах была приведена к уравнению прямой, что позволило применять метод линейной корреляции. Анализ полученных результатов испытаний показывает, что при циклическом нагружении образцы покрытия имеют различную способность к сопротивлению усталостному разрушению. Это может быть объяснено неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дислокационному скольжению, то есть к процессам, влияющим на усталостное разрушение. Видно, что усталостная прочность наплавленных поверхностей ферропорошками Fe–5%V и Fe–6,5%Cr выше эталона соответственно в 1,4 и 1,3 раза. Обусловлено это тем, что ЭМН с ППД формирует в системе покрытие – основа остаточные напряжения сжатия, увеличивает зону термического влияния [3], [4]. Кроме того, происходит выделение дисперсных карбидов и интерметаллидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения. Это обеспечивает повышение поверхностной прочности, особенно проявляющейся в покрытиях со следующими структурами: мартенсит, легированные дисперсные карбиды и интерметаллиды [3], [4]. Кроме того, ЭМН с ППД уменьшает пористость [5], что также повышает усталостную прочность наплавленных поверхностей (рис. 1).

Таким образом, применение ЭМН с ППД для упрочнения или восстановления деталей машин, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания и циклического нагружения, позволяет технологическим методом увеличить их износостойкость до 2,5 раза и усталостную прочность до 1,4 раза по сравнению со сталью 45, закаленной с нагрева ТВЧ на глубину 1,2–1,6 мм до 52–54 HRC.

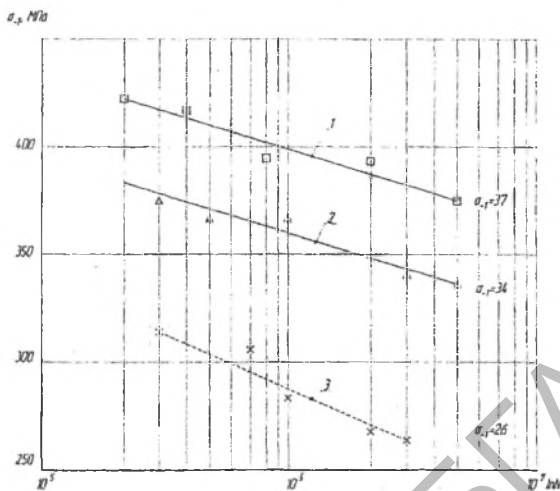


Рис. 1. Влияние химического состава ферропорошка на усталостную прочность упрочненных электромагнитной наплавкой с ППД деталей:  
1 – Fe-5 %V; 2 – Fe-6,5 %Cr; 3 – сталь 45

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П. А. Теория и практика газопламенного напыления / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, Е. Д. Манойло [и др.]. – Мн. : Навука і тэхніка, 1993. – 195 с.
2. Кожуро Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Мн. : Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. Хейфец М. Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М. Л. Хейфиц, Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек. – Гомель : ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
4. Ракомсин А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / под ред. П. А. Витязя. – Мн. : Парадокс, 2000. – 201 с.
5. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки материалов / П. И. Яценцин, Л. М. Кожуро, И. А. Сенчило, М. Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси. – 1995. – Т. 39. – № 1 – С. 112–116.
6. Gordienko A.J., Kheifetz M.L., Kozhuro L.M. and other. Combined physico-chemical treatment: synergetic aspects. – Minsk: UE «Technoprint», 2004. – 200 p.