

покрытия на 30...65%. На пористость покрытия оказывает влияние как высота, так и форма микронеровностей поверхности подложки. Для получения минимальной пористости шероховатость подложки должна быть в пределах Ra 0,08...0,16 мкм, а толщина наносимого покрытия превышать 3 мкм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Закономерности формирования покрытий в вакууме / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Б.С. Митин и др. // ФХОМ. – 1986. – № 5. – С. 92-97. 2. Транспортировка плазменных потоков в криволинейной плазмооптической системе / И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // Физика плазмы. – 1978. – Т. 4. № 4. – С. 758-763. 3. А.с. 1704029 СССР, МКИЗ G01N 15/08. Способ определения пористости неорганических покрытий на металлических подложках / Е.В. Макаревич, В.И. Плахотнюк, С.А. Иващенко, И.С. Фролов. – № 4802969/25; Заявлено 19.03.90; Опубл. 07.01.92, Бюл. № 1 // Изобретения. – 1992. – №1. – С. 171. 4. Карпенко Г.Д., Лойко В.А. Исследование структуры покрытий на основе нитрида титана // Известия АН БССР. Сер. физ. техн. наук. – 1986. – № 1. – С. 31–34. 5. Палатник Л.С., Черемской П.Г., Фукс М.Я. Поры в пленках. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с. 6. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы / И.И. Аксенов, В.Г. Брень, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // ЖТФ. – 1978. – Т. 48. № 6. – С. 1165-1169. 7. Синькевич Ю.В., Фролов И.С., Симонович Л.П. Использование электроимпульсного полирования для повышения качества ионно-плазменных покрытий // Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением: Материалы III междунар. науч.-техн. конф., Киев, окт. 1990 г. / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев, 1991. – С. 111–115.

УДК 621.792

**П. И. Ящерицын, А. П. Ракомсин, И. П. Филонов, Л. М. Кожуро**

## **ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

*Государственное предприятие "МАЗ"*

*Белорусская государственная политехническая академия*

*Белорусский государственный аграрный технический университет*

*Минск, Беларусь*

Научно-технический прогресс во всех отраслях экономики определяется техническим уровнем машиностроения. В Республике Беларусь оно по праву занимает

одно из ведущих мест. Приоритетными направлениями являются автомобиле- и тракторостроение, производство сельскохозяйственных машин, станков и инструментов, разработка новых материалов и технологий их обработки. Учитывая, что республика работает в значительной степени на привозном сырье, особенно актуальным является создание новых металло- и энергосберегающих технологий обработки материалов, способных создавать конкурентоспособные изделия.

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, использующих 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 пласти-

ческим деформированием (ППД) способствует повышению эксплуатационных свойств различных деталей, так как при этом снижается шероховатость поверхности и пористость покрытия, увеличивается 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, 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 с ППД, изучалась в условиях гидроабразивного изнашивания 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, подвергнутых 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 взаимноперпендикулярных 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 – 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 автотракторных и сельскохозяйственных машин, для которых характерна 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  $Ra = 0,8 \dots 0,6$  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 упроченного 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, мкм/км	Момент трения, нм		Коэффициент трения	
		с маслом	всухую	с маслом	всухую
ПР-Сталь 45-1%B	3,6/3,2	$\frac{0,86}{0,76}$	$\frac{1,37}{1,26}$	0,13/0,12	0,21/0,19
Fe-6,5%Cr	2,2/2,0	$\frac{0,79}{0,70}$	$\frac{1,06}{1,00}$	0,12/0,11	0,16/0,15
Fe-9%B	2,8/2,2	$\frac{0,93}{0,90}$	$\frac{1,10}{0,98}$	0,14/0,13	0,16/0,15
Fe-5%V	3,4/2,9	$\frac{0,99}{0,86}$	$\frac{1,58}{1,45}$	0,15/0,13	0,24/0,22
P6M5K5	2,1/1,6	$\frac{0,73}{0,67}$	$\frac{0,87}{0,80}$	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 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  $Ra = 0,8 \dots 0,6$  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

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C,$$

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 (рис. 1) показывает, что при циклическом нагружении образцов 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.

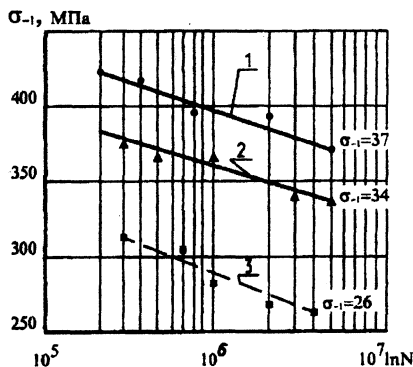


Рис. 1. Влияние химического состава ферропорошка на усталостную прочность упрочненных электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием деталей: 1 – Fe-5%V; 2 – Fe-6,5%Cr; 3 – сталь 45

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко и др. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
2. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 232 с.
3. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Ракомсин А.П. и др. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Мн.: ФТИ НАН Беларуси, 1997. – 416 с.
4. Ракомсин А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле. – Мн.: Парадокс. 2000. – 200 с.
5. Филонов И.П., Кожуро Л.М., Фельдштейн Е.Э. Износостойкость покрытий, полученных электромагнитной наплавкой / XXIII jesienna szkola tribologiczna. – Zielona Gora – Lubiatow, 21-24 wrzesien, 1999. – S. 35...38.
6. Rakomsin F.P., Kozhuro L.M., Minevich A.A. Tribological properties of coating produced by electromagnetic facing / 12-th International colloquium «Tribology 2000 – Plus». – Stuttgart, 2000. – V. 3. – P. 1981–1995.