

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКОЙ

Л.М. КОЖУРО, д.т.н., профессор;
А.В. КРУТОВ, к.т.н., доцент (БГАТУ);
Д.М. ЩЕРБО, инженер (БелНИИМСХ)

Износостойкость и усталостная прочность поверхности детали являются основными ее эксплуатационными свойствами. Их повышение обеспечивается путем нанесения износостойкого покрытия различными технологическими методами, в том числе наплавкой. Одним из перспективных способов является электромагнитная наплавка, суть которой заключается в наплавке порошка на поверхность детали в постоянном магнитном поле при пропускании через зону контакта постоянного тока большой силы [1, 2]. Принципиальная схема электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием приведена на рис.1. Данная технология характеризуется экономным расходом энергии и материалов, универсальностью и простотой технологического оборудования. Использование данной технологии позволяет снизить себесто-

имость процесса в 1,6 раза по сравнению с газотермическими методами, повысить износостойкость поверхности относительно исходной в 1,5, а прочность сцепления покрытия с основой - в 2 раза.

Для электромагнитной наплавки используются порошки на железной основе, обладающие высокими магнитными свойствами и имеющие сравнительно невысокую температуру плавления. Поскольку в наплавленном металле наблюдаются неоднородные структура и химический состав, сварочные дефекты (поры, трещины, шлаковые включения и др.), а также возможны колебания твердости и высокие внутренние напряжения, то представляет интерес оценка физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий из различных ферромагнитных порошков, нанесенных электромагнитной наплавкой.

сопряженный вал - подшипник скольжения сельскохозяйственных, транспортных и других машин, которые выходят из строя из-за абразивного изнашивания. Образцы после наплавки и финишной механической обработки прирабатывались с колодкой. Режим испытаний: скорость скольжения 1,2 м/с, удельная нагрузка 3,0 МПа. Исходная шероховатость обработанной поверхности $Ra=0,63$ мкм. Оценка износостойкости производили по средней интенсивности изнашивания $I=W/h$, где W - линейный износ образца на диаметре, мкм; $h = \pi \cdot D \cdot N \cdot 10^{-6}$ - путь трения за время испытаний, км; D - номинальный диаметр образца, мм; N - общее число оборотов, совершенных образцом. В качестве эталона принимали сталь 45, закаленную с нагревом ТВЧ на глубину 1,2 - 1,6 мм до твердости 52...54 HRC. Температуру фрикционного разогрева в данном исследовании не измеряли. Приведенные значения напряжений, интенсивностей изнашивания, моментов и коэффициентов трения получены как средние из пяти измерений. Более глубокую статистическую обработку не проводили.

Исследования усталостной прочности проводили общеизвестным методом с построением зависимости Велера в координатах $\sigma_{-1} - \lg N$, при нагрузке в условиях изгиба с вращением консолюю закрепленного образца на машине У-20М. Критерием выхода из строя являлось разрушение образца под действием знакопеременной нагруз-



Рис. 1. Схема установки для электромагнитной наплавки и ППД: 1 - обрабатываемая деталь, 2 - скользящий контакт, 3 - электромагнит, 4 - полюсный наконечник, 5 - ферропорошок, 6 - дозирующее устройство, 7 - шариковый обкатник.

Методика исследований

Изучение износостойкости покрытий проводили на машине для испытаний материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 линейным методом по схеме вал - колодка. Основа образцов - сталь 45, колодку изготавливали из чугуна ХТВ ГОСТ 3185-74. Измерения образцов производили оптическим длинномером. Для ускорения процесса изнашивания использовали масляно-абразивную смесь (масло И-20 с добавками 2% карбида бора зернистостью 4...5 мкм). Такие условия наиболее близки к реальным условиям эксплуатации

1. Результаты испытания на износостойкость

| Материал ферропо- рошка | Электромагнитная наплавка | | | | | Электромагнитная наплавка с последующим поверхностным пластическим деформированием | | | | |
|-------------------------------|---|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|--|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | интен- сивность изнаши- вания, мкм/км | момент трения, Нм | | коэффициент трения | | интен- сивность изнаши- вания, мкм/км | момент трения, Нм | | коэффициент трения | |
| | | с маслом | без смазки | с маслом | без смазки | | с маслом | без смазки | с маслом | без смазки |
| Fe-2%V | 3,6 | 0,99 | 1,58 | 0,15 | 0,24 | 3,1 | 0,87 | 1,45 | 0,13 | 0,22 |
| C-300 | 2,2 | 0,79 | 1,06 | 0,12 | 0,16 | 1,9 | 0,73 | 1,00 | 0,11 | 0,15 |
| P6M5K5 | 2,1 | 0,73 | 0,87 | 0,11 | 0,13 | 1,7 | 0,68 | 0,80 | 0,10 | 0,12 |
| Ферробор ФБ-3 | 2,8 | 0,93 | 1,10 | 0,14 | 0,16 | 2,25 | 0,90 | 0,99 | 0,13 | 0,15 |
| Сталь45 (эталон) | 4,1 | 0,84 | 1,26 | 0,12 | 0,19 | | | | | |

ки с постоянной амплитудой. Образцами служили цилиндрические заготовки из нормализованной стали 45, имеющие соотношение $l/d=15$, где $l=150$ мм - длина и $d=10$ мм - диаметр.

Результаты экспериментов
и их обсуждение

Результаты испытаний на износостойкость приведены в табл. 1. Анализ показывает, что решающее влияние на износостойкость покрытий после электромагнитной наплавки оказывает их химический и фазовый состав. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия из порошка быстрорежущей стали P6M6K5 и сплава C-300 на основе высокохромистого чугуна. Износостойкость этих покрытий в 2,0 и 1,9 раза выше соответственно износостойкости эталона. Далее в порядке убывания следуют покрытия из порошков ферробора ФБ-3 и феррованадия Fe-2% V. Минимальный износ контртела и сопряжения в целом получен для покрытия на основе порошка C-300. Обусловлено это наличием в структуре остаточного аустенита, что обеспечивает более пластичную и мягкую фазу, которая служит демпфером, снижающим динамические нагрузки на поверхностный слой, и ускоряет процесс приработки деталей сопряже-

ния. Этот вывод подтверждается не большими коэффициентом и моментом трения, как со смазкой, так и без нее.

С целью повышения износостойкости покрытия рассматривали возможности дополнительного поверхностного пластического деформирования и различных технологий финишной механической обработки. Применение поверхностного пластического деформирования позволяет увеличить износостойкость покрытия примерно до 2,4 раза (табл. 1) за счет повышения твердости, прочности, снижения остаточной пористости, закрытия микротрещин. Роль механической обработки рассматривали для покрытий на основе феррованадия и ферробора, серийно выпускаемых металлургической промышленностью и более предпочтительных для массового применения. На первом этапе исследовали влияние режима шлифования на износостойкость обработанной поверхности. Для этого образцы, прошлифованные на различных режимах, испытывали на машине трения. Выявлено, что влияние режима обработки значительно меньше, чем влияние состава покрытия. Из элементов режима шлифования наибольшее влияние оказывает попеременная подача, а скорость вращения детали практически не влия-

ет. Если принять износостойкость эталона $J - 1/I$ (км/мкм) за 100%, то относительная износостойкость феррованадия (%)

$$J_o = 183S^{0,071} S_{np}^{0,061}, \text{ а ферробора}$$

$$J_o = 278S^{0,158} S_{np}^{0,027}. \text{ Установлена}$$

связь между микротвердостью H_T (ГПа) и относительной износостойкостью покрытий. Для феррованадия и ферробора соответственно имеем $J_o = \exp(1,97 + 0,30H_T)$, $J_o = \exp(3,73 + 0,13H_T)$. Выполненные исследования показали, что связь между износостойкостью деталей с электромагнитными покрытиями и такими параметрами наклепа поверхностного слоя, как напряжения второго рода и плотность дислокаций, практически отсутствует.

Известно, что работоспособность поверхностного слоя в значительной степени определяется последовательностью технологических операций. В этом случае наблюдается технологическое наследование свойств, позволяющее обеспечить наилучшие выходные показатели поверхности. Анализировали три способа обработки покрытия - чистовое шлифование, полирование и магнитно-абразивная обработка. Нанесенный слой покрытия подвергали предварительному шлифованию и последующей чистовой обработке тем или иным способом до достижения ше-

2. Результаты сравнительных испытаний на износостойкость

| Материал ферропо- рошка | Шлифование | | | Полирование | | | Магнитно-абразивная обработка | | |
|-------------------------------|---|----------------------|---------------|---|----------------------|---------------|---|----------------------|---------------|
| | интенсив- ность изнаши- вания, мкм/км | момент трения, Нм | | интенсив- ность изнаши- вания, мкм/км | момент трения, Нм | | интенсив- ность изнаши- вания, мкм/км | момент трения, Нм | |
| | | с маслом | без смазки | | с маслом | без смазки | | с маслом | без смазки |
| Fe-2%V | 3,6 | 0,99 | 1,58 | 3,3 | 0,98 | 1,60 | 2,9 | 0,98 | 1,62 |
| C-300 | 2,2 | 0,79 | 1,06 | 2,1 | 0,79 | 1,04 | 1,8 | 0,77 | 1,05 |
| P6M5K5 | 2,1 | 0,73 | 0,87 | 2,0 | 0,72 | 0,90 | 1,8 | 0,72 | 0,90 |
| Ферробор ФБ-3 | 2,8 | 0,93 | 1,10 | 2,7 | 0,90 | 1,12 | 2,4 | 0,91 | 1,14 |
| Сталь45 (эталон) | 4,1 | 0,84 | 1,26 | 4,0 | 0,82 | 1,29 | 3,8 | 0,82 | 1,30 |

роховатости обработанной поверхности $Ra=0,63\text{ мкм}$. Результаты сравнительных испытаний приведены в табл. 2. Не оценивая преимуществ различных марок электромагнитных покрытий, остановимся на роли технологической наследственности. Легко заметить преимущества магнитно-абразивной обработки по сравнению с полированием и шлифованием. Этот способ обеспечивает повышение износостойкости по сравнению с другими соответственно на 4-5 и 10-15 %; момент трения практически не изменяется. Очевидно, что повышение износостойкости после магнитно-абразивной обработки связано с более благоприятным микрорельефом обработанной поверхности, имеющим стохастический характер, в отличие от полированной и шлифованной поверхностей, у которых отдельные риски расположены в направлении скорости резания, а также с формированием в ходе магнитно-абразивной обработки более благоприятного напряженного состояния в поверхностных слоях образцов для испытаний.

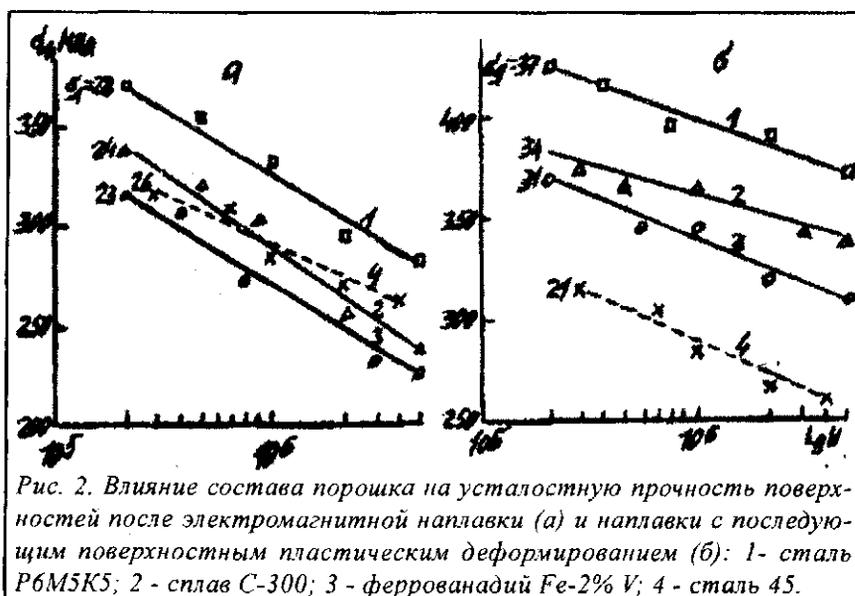
Проведенные исследования структуры, фазового состава и физико-механических свойств покрытий, полученных в ходе электромагнитной наплавки, показывают, что они имеют высокую прочность, плотность, однородность, износостой-

кость и наличие фаз с особыми свойствами. Отсюда можно предположить, что основные эксплуатационные характеристики электромагнитных покрытий могут удовлетворять условиям работы на ответственных деталях, работающих при циклических нагрузках в условиях трения и изнашивания. Поэтому в работе исследовалось влияние на усталостную прочность наплавленных поверхностей только технологических особенностей наплавки и химического состава материала порошка.

Анализ полученных результатов (рис. 2) показывает, что при циклическом нагружении образцов электромагнитные покрытия имеют различную способность к сопротив-

лению усталостному разрушению. Это можно объяснить неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дислокационному скольжению, т.е. к процессам, влияющим на усталостное разрушение. Видно, что электромагнитная наплавка порошков C-300 и Fe-2% V на детали из стали 45 вызывает снижение сопротивления усталости последней на 8 и 12 % соответственно, а порошка P6M5K5 - увеличение на 8 % (рис. 2а).

Снижение предела выносливости у наплавленных образцов вызвано рядом причин: наличием дефектов в виде пор и трещин, остаточных напряжений растяжения и др. Из рис. 2б видно, что усталостная прочность



наплавленных поверхностей порошками Р6М5К5, С-300 и Fe-2% V выше эталона соответственно в 1,4, 1,3 и 1,2 раза. Это обусловлено тем, что в ходе наплавки с поверхностным пластическим деформированием в системе покрытие - основа формируются остаточные напряжения сжатия и увеличивается зона термического влияния. Это приводит к распаду остаточный аустенит и превращает его в мартенсит с образованием при деформации высокодисперсных карбидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения. В конечном итоге это обеспечивает повышение поверхностной прочности, особенно проявляющейся в покрытиях с мартенситно-аустенитной структурой. Поверхностное пластическое деформирование уменьшает пористость покрытия, что также повышает усталостную прочность наплавленных поверхностей.

Изучение характера излома наплавленных образцов показывает, что трещины усталости зарождаются на поверхности образцов и в их глубине, т.е. в покрытии и зоне его сплавления с основой. Очаг зарождения трещины зависит от качества покрытия. В покрытиях, полученных наплавкой с последующим поверхностным пластическим деформированием, трещины усталости зарождаются в зоне сплавления и распространяются в сторону основы. Для изломов почти всех наплавленных образцов характерно непостоянство в их месторасположении по длине образцов, что также подтверждает определяющее влияние концентраторов напряжений на усталостную прочность. Все это указывает на то, что восстановление и упрочнение ответственных деталей машин, подверженных в эксплуатации воздействию динамических повторно-переменных нагрузок, необходимо производить с дополнительным поверхностным пластическим деформированием. Упрочнение покрытия, как показали исследования, значительно увеличивает предел усталости.

Наряду с применением поверхностного пластического деформирования для повышения циклической прочности наплавленных поверхностей необходимо совершенствовать технологию наплавки, применяя эффективные ферромагнитные порошки (Р6М5К5, С-300), а также другие меры, обеспечивающие получение электромагнитных покрытий без сварочных дефектов (пор, трещин и др.).

Полученные данные можно использовать для выбора наилучших условий обработки деталей с покрытиями, нанесенными электромагнитной наплавкой. Использование метода линейного программирования для оптимизации режима резания при черновом шлифовании детали с износостойким покрытием из ферробора и следующей магнитно-абразивной обработкой показано на рис. 3. В качестве целевой функции принят максимальный в заданных условиях съем металла Q. Техническими ограничениями служат: 1 - шероховатость обработанной поверхности Ra; 2 - микротвердость обработанной поверхности; 3 - отклонение от круглости обработанной поверхности не более чем на 30% общего поля допуска; 4 - отклонения в величине реально снятого припуска (не более 15% номинального значения); 5 - относительная износостойкость (принято ее возрастание по сравнению со сталью 45 не менее 140%); 6- требуемая производительность обработки. Оптимальное сочетание режимов шлифования в заданных условиях $S_{II} = 0,02$ мм/дв. ход, $S_{np} = 1,5$ м/мин.



Рис. 3. Графическая интерпретация оптимизации режима.

Выводы

1. Установлено, что решающее влияние на износостойкость покрытий оказывает химический и фазовый составы покрытий и метод их нанесения. Покрытия, полученные ЭМН с ППД, для всех исследуемых материалов ферропорошков имеют более высокую износостойкость по сравнению с покрытиями, полученными ЭМН. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия из ферропорошка быстрорежущей стали Р6М5К5 и сплава С-300 на основе высокохромистого чугуна. Износостойкость этих покрытий выше износостойкости эталона в 2,0 и 1,9 раза для ЭМН и 2,4 и 2,2 раза – для ЭМН с ППД.

2. Показано, что магнитно-абразивная обработка обеспечивает повышение износостойкости по сравнению с полированием на 4 – 5 % и шлифованием на 10 – 15 %.

3. Выявлено, что ЭМН ферропорошков С-300 и Fe-2% V снижает сопротивление усталости образцов из стали 45 на 8 – 12 % соответственно, а ферропорошка Р6М5К5 увеличивает на 8 %. Усталостная прочность поверхностей с покрытиями, полученными ЭМН с ППД, ферропорошков Р6М5К5, С-300 и Fe-2% V, выше эталона соответственно в 1,4; 1,3; 1,2 раза. Обусловлено это тем, что ЭМН с ППД формирует в системе покрытие – основа остаточные напряжения сжатия, обеспечивает выделение дисперсных карбидов, блокирующих сдвиги по плоскости скольжения, уменьшает пористость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М. и др. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. - М.: Наука и техника, 1988. - 272 с.
2. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле.- М.: Наука и техника, 1995.- 232 с.