

Электрохимическая обработка позволяет производить изделия с качественной поверхностью и достигать необходимой производительности, позволяя при этом обрабатывать сложнопрофильные и точные изделия из труднообрабатываемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седыкин Ф.В. Технология машиностроения: Электрофизические и электрохимические методы обработки металлов. - Тула: ТПИ, 1976. - 166 с.

УДК 621.793.7

Ю.Ю. Ярмак, С.В. Лаптев

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАРБИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

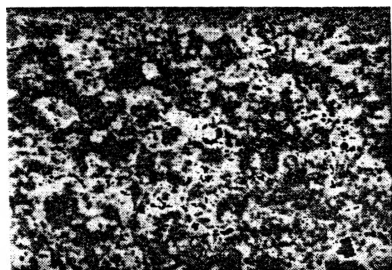
Износ рабочих поверхностей является одной из причин, вызывающих преждевременный выход из строя деталей и узлов и снижающих надежность и долговечность машин в целом. Путем различных конструктивных и технологических мероприятий возможно значительно повысить износостойкость рабочих поверхностей, а, соответственно, и увеличить срок эксплуатации машин. Одним из технологических путей уменьшения износа деталей машин и повышения их надежности и долговечности является повышение твердости и микротвердости рабочих поверхностей. Это может достигаться изготовлением деталей машин из тугоплавких материалов, обладающих достаточно высокой твердостью и микротвердостью. Тугоплавкие материалы обладают целым рядом положительных свойств, но, как показывает практика, во многих случаях не могут применяться для изготовления компактных изделий из-за их высокой хрупкости и низкой прочности при динамических нагрузках, а также из-за технологических трудностей при механической обработке.

Нанесение защитных покрытий из твердых самофлюсующихся сплавов, карбидов, боридов и других тугоплавких материалов на изделия из конструкционных материалов является реальным способом обеспечения необходимых физико-механических свойств рабочих поверхностей и повышения их надежности и долговечности. Однако уже первые исследования в области нанесения плазменных покрытий из чистых карбидов показали, что такие покрытия имеют высокую пористость и низкую прочность сцепления с подложкой. Покрытия характеризуются наличием остаточных напряжений, отрицательно

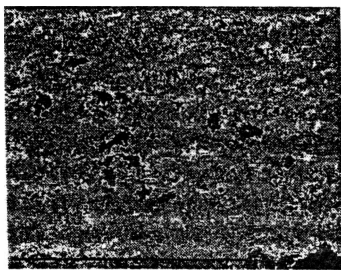
вливающих на прочность сцепления с подложкой, а частицы порошка при термическом напылении подвергаются сильному окислению. Нанесение карбидных покрытий в виде плакированного порошка позволяет сохранить свойства исходного материала в процессе плазменного напыления и значительно улучшить качество покрытий.

В данной работе были проведены исследования физико-механических свойств и износостойкости плазменных покрытий из «чистого» карбида титана (TiC) и карбида титана плакированного никель-молибден-фосфорной оболочкой (TiC-Ni-Mo-P). Плакирование карбида титана осуществлялось по методу, изложенному в [1] и позволяющему получение никелевой оболочки на частицах TiC с наличием легирующих элементов фосфора и молибдена. В результате плакирования частиц карбида титана был изготовлен порошок TiC-Ni-Mo-P с различным процентным соотношением карбида и металлической матрицы. Исследования порошка показали, что металлическая оболочка из никеля имеет хорошее сцепление с частицами TiC и равномерно распределена по периметру частиц. Аморфная никелевая оболочка с агломерированной структурой образована из круглых, химически осажденных мелких частиц. Осаждение частиц Ni-Mo-P не приводило к изменению формы частиц карбида титана, но позволило перераспределить содержание различных фракций порошка за счет увеличения размеров частиц. Это положительно сказалось на текучести порошка и обеспечило возможность транспортирования его в плазменную струю при напылении. Определенное влияние процесс плакирования оказал и на химический состав порошка [2]. Выбор никеля, в качестве металлической матрицы в покрытии, объясняется относительной доступностью и простотой реализации процесса нанесения плакирующей оболочки на мелкие частицы. Никель характеризуется хорошей смачиваемостью со многими твердыми сплавами.

Нанесение покрытий осуществлялось на следующих режимах: $U=60V$; $I=400A$; $S=100mm$. Структура покрытий, полученных из «чистого» карбида титана и плакированного порошка (65% TiC + 35% Ni-Mo-P, исходная фракция до 40 мкм) показана на рис 1.



а)



б)

Рис. 1. Структура плазменных карбидных покрытий ($\times 400$):

а – TiC; б – TiC-Ni-Mo-P.

Покрyтия, полученные из TiC отличаются большой пористостью и низкой прочностью сцепления с подложкой (рис. 1а). Процесс нанесения покрyтий из TiC сопровождался проблемами, связанными с транспортировкой порошка в плазменную струю, окислением его в процессе напыления и другими негативными явлениями [2]. Улучшение качества покрyтий было достигнуто при плазменном нанесении плакированного карбида титана. Покрyтие, полученное из плакированного порошка, характеризуется относительно низкой пористостью (до 15%), высокой прочностью сцепления с подложкой (до 38 МПа), наличием относительно мягкой матрицы (HV_{50} до 17000 МПа), не свойственной покрyтиям из никеля, с закрепленными в ней твердыми включениями карбида титана (HV_{50} до 30000 МПа). Переходная зона между покрyтием и подложкой характеризуется резким переходом по содержанию химических элементов. Это говорит о соединении покрyтия с подложкой, как о комбинации механического и псевдодиффузионного соединения. Распределение легирующих элементов в покрyтии и переходной зоне было исследовано на микроанализаторе SEMQ. Содержание химических элементов в различных зонах покрyтия колеблется в следующих пределах: Ti – 40...75%; Ni – 11...48%; P – 1...7%; Mo – до 1%; C – до 10%. В покрyтии фактически отсутствуют зоны с содержанием каких-то отдельных элементов за исключением зерен карбида титана. Покрyтие состоит из различных соединений элементов, которые характеризуются определенным цветом и соответствующей микротвердостью. Это зависит от процентного содержания в зоне таких химических элементов как титан и никель, а также их соединений с углеродом. Рентгеновский анализ показал, что в покрyтии образуются соединения TiC, Ti(CN), Ni₃C, TiO₃, TiO₂. Основными фазами в покрyтии являются TiC, Ni₃C. В меньших количествах установлены фазовые соединения TiO₃, TiO₂, а также TiN, Ti(CN). Для сравнения были исследованы покрyтия, полученные из порошка в виде механической смеси (65% TiC+35% Ni). В этих покрyтиях было установлено наличие только соединений TiC, TiO₂ и как отдельный элемент Ni. Микротвердость матрицы в этих покрyтиях составляла 420 МПа ($HV_{(50)}$) и частиц карбида титана до 30000 МПа ($HV_{(50)}$) [3].

Качество плазменных карбидных покрyтий зависит также от содержания в покрyтии таких химических элементов как: кислород, азот и углерод. Процентное содержание этих элементов в покрyтии и их влияние на качество покрyтия определялось в зависимости от напряжения (U), тока (I) и расстояния нанесения покрyтий (S). Интервалы варьирования указанных режимов напыления позволили изменять мощность плазменного потока от 12 до 35 кВт. В результате проведенных исследований было установлено, что напряжение и расстояние напыления являются основными факторами, влияющими на содержание углерода и кислорода в покрyтии, а также на микротвердость покрyтия. С увеличением напряжения содержание углерода в покрyтии и микротвердость увеличиваются. Увеличение расстояния напыления приводит к снижению содержания углерода в покрyтии, но, в тоже время, микротвер-

дость покрытия увеличивается. Влияние тока на содержание химических элементов в покрытии является незначительным, причем это влияние зависит существенно от других параметров плазменного потока.

Следует отметить, что общей тенденцией явилось уменьшение содержания углерода в покрытии и резкое увеличение содержания кислорода и азота по отношению к их процентному содержанию в порошке. Это увеличение особенно значительно при напылении чистого карбида титана. Нанесение плакированного карбида титана позволяет значительно сократить потери углерода при напылении в атмосфере, уменьшить в покрытии содержание кислорода и азота по сравнению с покрытиями из TiC. Металлическая матрица из плакированного порошка обладает достаточно высокой микротвердостью не свойственной покрытиям из никеля. Это можно объяснить, как показал рентгеноструктурный анализ, образованием различных фаз и соединений в процессе плазменного напыления.

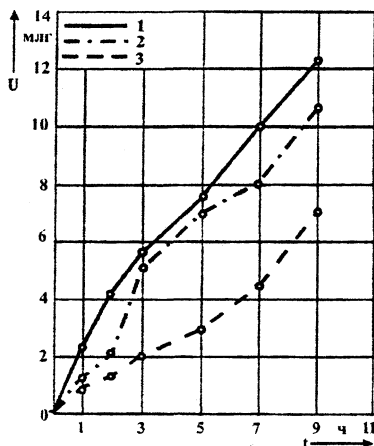


Рис. 2. Зависимость износа образцов от времени испытаний: 1 - сталь 45 (закаленная); 2 - TiC; 3 - 65% TiC + 35% Ni-Mo-P.

С целью получения оптимальных эксплуатационных свойств покрытий исследовано также влияние режимов плазменного потока на износостойкость карбидных покрытий. Покрытия наносились аргоно-водородной плазмой. Режимы напыления варьировались в пределах: $U = 40 \dots 70$ В; $I = 300 \dots 500$ А; $S = 70 \dots 150$ мм. Указанные интервалы режимов нанесения покрытий позволяли изменять мощность плазменного потока от 12 до 35 кВт. Для проведения исследований был выбран полнофакторный эксперимент типа 2^3 . В результате проведения эксперимента для плакированного порошка с содержанием 65% TiC + 35% Ni-Mo-P было получено следующее уравнение множественной регрессии для износа покрытия (Dy):

$$Dy = -1,45 - 0,08U - 0,02I + 0,22S + 7,33UI - 24,83US - 1,975IS.$$

Анализ полученного уравнения показывает, что напряжение и дистанция нанесения покрытия, как смешанные элементы, оказывают наибольшее влияние на износостойкость покрытий. В тоже время напряжение, ток и дистанция напыления, как линейные члены уравнения, в отдельности незначительно влияют на износостойкость.

На основе анализа влияния процесса плазменного напыления на физико-механические свойства покрытий и их износостойкость были определены режимы нанесения карбидных покрытий для проведения исследований на износостойкость.

Сравнительные исследования износостойкости покрытий из TiC, TiC-Ni-Mo-P и образцов из закаленной стали 45 проводились в условиях сухого трения с использованием пары трения штифт-шайба ($v=9,8$ м/с; $P=0,14$ МПа). В качестве контртела использовалась закаленная шайба из стали 45. Результаты исследований показали, что покрытия из карбида титана имеют несколько меньший износ, чем образцы из стали 45. Однако это преимущество является незначительным. Лучшей износостойкостью характеризуются покрытия из карбида титана с никель-молибден-фосфорной матрицей. Они показали в два раза меньший износ в сравнении с образцами из стали и покрытиями из «чистого» карбида титана (рис. 2). Состояние поверхностей трения образцов после испытаний на износ приведены на рис. 3.

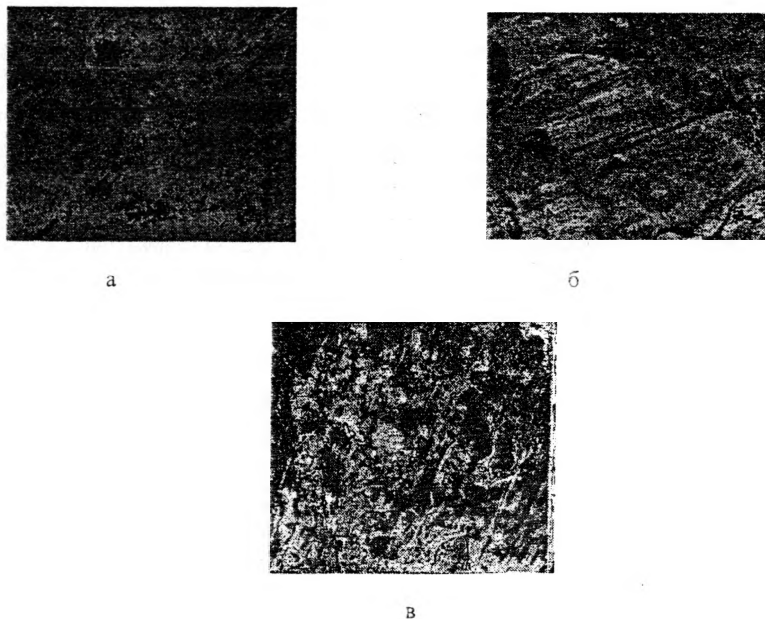


Рис 3. Поверхность трения образцов после испытаний на износ ($\times 1200$):
а – сталь 45 (закаленная); б – TiC; в – 65 % TiC + 35% Ni-Mo-P.

В процессе трения происходит разрушение покрытий из TiC (рис. 3 б). Это объясняется низкой прочностью сцепления частиц TiC в покрытии из-за недостаточного их разогрева в плазменной струе. Покрытия из плакированного порошка не разрушались в процессе трения (рис.3 в). Металлическая матрица удерживает частицы карбида в процессе трения, которые могут воспринимать большие нагрузки и определенным образом влиять на износостойкость покрытий. Влияние металлической матрицы на износостойкость покрытий из карбида титана объясняется наличием в ней фосфора и молибдена. Фосфор в процессе напыления, а так же при последующей термической обработке покрытия, снижает возможность протекания процессов окисления в никелевой матрице и этим самым положительно влияет на процесс адгезии и другие физико-механические свойства плазменных покрытий. В свою очередь молибден при высоких температурах может соединяется с никелем в виде смешанных кристаллов и образовывать с карбидом титана смешанные карбиды. Это положительно сказывается на протекании механизмов соединения матрица — карбид, снижает выкрашивание частиц карбида титана из покрытия и таким образом может существенно улучшить износостойкие свойства покрытий.

Проведенные исследования показали, что из плакированного карбида титана никель-молибден-фосфорной оболочкой можно наносить покрытия характеризующиеся достаточно высокой микротвердостью, низкой пористостью и хорошей прочностью сцепления с подложкой. Покрытия характеризуются образованием различных фаз, положительно влияющих на их эксплуатационные свойства. Сравнительный анализ износостойкости покрытий из карбида титана и покрытий из карбида титана с никель-молибден-фосфорной оболочкой показал, что последние обладают более высокой износостойкостью и меньшим значением коэффициента трения. Износостойкость покрытий зависит также от режимов плазменного нанесения, причем напряжение и дистанция напыления, как смешанные факторы, имеют преобладающее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голего Н.Н., Горбачевская Л.А., Ковальчук Ю.М. Осаждение никель-молибден-фосфорных покрытий на порошкообразные материалы // Порошковая металлургия. - Киев, 1975. - № 11 (155). С. 5-9.
2. Ярмак Ю.Ю., Ф. Блюме и др. Моделирование процесса плазменного нанесения твердосплавных карбидных покрытий // "Машиностроение". - Мн., 2001. - Вып. 17. С.484-488.
3. Ярмак Ю.Ю., Лаптев С.В., Фюссель У., Эккарт Г. Исследование процесса нанесения износостойких плазменных покрытий // Мир технологий. – Минск, 2002. - №3. С. 7-10.