

ЛИТЕРАТУРА

1. Hutchings, I.M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials / I.M. Hutchings. – Cambridge, 1992. – p.273.
2. Голего, Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля – Киев: «Техніка», 1974 – 272 с.
3. Tomlinson, G.A. – “Proc. R. Soc.”, A, 1927. – Vol. 115. – p.472.
4. Tomlinson, G.A., Thorpe, P.L., Gough, H.J. – “Proc. Instn. Mech. Engers.”, Vol. 141, 1939. – p. 223.
5. Feng, I.-M., Uhlig, H.H. – “J. Appl. Mech.”, 1954. – Vol. 21. – p. 395.
6. Reed, F.E., Batter, J. F. – “Trans. Am. Soc. Lubric. Engers”, Vol. 2, 1960. – p.159.
7. Уотерхауз, Р.Б. Фреттинг-коррозия. Пер. с англ. под ред. канд. техн. наук Г.Н. Филимонова. Л.: «Машиностроение», 1976. – 272с.
8. de Gee A.W.J., Commissaris C.P.I., Zaat J.H. – “Wear”, 1964. – Vol. 7. – p.535.
9. Uhlig, H.H., Tierney, W. D., Mc Clellan, A. – ASTM Spec. Tech. Publ., No. 144, 1953. – p.71.
10. Wright, K.H.R. – “Proc. Instn. Mech. Engers.”, Vol. 1 B, 1952-3. – p.556.
11. Алябьев, А.Я. Методы защиты деталей от фреттинг-коррозии // Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей. – Киев, КНИГА, Вып.1, 1971. – С.58-62.

УДК 621.793

Максимченко Н.Н.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ПЛАКИРОВАНИЯ

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Получена математическая модель, позволяющая на стадии разработки технологического процесса определить режимные параметры метода плакирования гибким инструментом, обеспечивающие перенос композиционного материала покрытия на обрабатываемую поверхность, улучшение качественных характеристик сформированного покрытия и повышение эксплуатационных свойств узлов трения.

Введение. Метод плакирования гибким инструментом (ПГИ), основанный на механо-термическом воздействии ворса вращающейся металлической щетки на элемент из материала покрытия и обрабатываемую поверхность, при котором ворсинки щетки переносят частицы материала покрытия на поверхность детали, одновременно осуществляя ее наклеп, успешно применяется для формирования на деталях машин покрытий различного функционального назначения (антифрикционных, износостойких и коррозионностойких, приработочных), а также для восстановления изношенного поверхностного слоя [1-4]. Известно, что покрытия, сформированные методом ПГИ, по своим физико-механическим свойствам значительно отличаются от исходного материала, способствуя улучшению эксплуатационных свойств деталей. В частности, превышение микротвердости нанесенных покрытий над значениями микротвердости массивного материала, используемого для его нанесения, достигает десяти и более раз [2]. Износостойкость в зависимости от вида наносимого материала в условиях циркуляционной смазки при скорости относительного перемещения трущихся поверхностей 0,5 м/с повышается в 10–20 раз, предел выносливости на знакопеременный изгиб увеличивается на 14–20 % [1, 2]. Являясь экономичным, простым в использовании, экологически чистым способом формирования покрытий, метод ПГИ требует тщательного выбора технологических режимов нанесения покрытия, в зависимости от материала покрытия, условий эксплуатации, требуемых свойств покрытия и др. Имеющаяся научно-техническая информация касается в основном технологических режимов формирования однородных покрытий из таких материалов, как медь, латунь, алюминий. Для них разработаны математические модели, устанавливающие взаимосвязи между технологическими параметрами процесса ПГИ (относительное сближение оси щетки и обрабатываемой поверхности (натяг), скорость перемещения щетки по поверхности, усилие прижатия щетки, вре-

мя обработки) и толщиной покрытия, а также показателем износостойкости [1, 2]. Однако в некоторых случаях для обеспечения комплекса эксплуатационных свойств поверхностного слоя (износостойкости, усталостной прочности, прирабатываемости и т.п.) эффективнее использовать композиционные покрытия, в которых матричный материал легирован неметаллическими твердыми (карбидами, оксидами, боридами и др.) или мягкими (графит, дисульфид молибдена, фторопласт и др.) фазами [5, 6]. В случае добавки твердых веществ последние обеспечивают необходимую несущую способность поверхностного слоя, а пластичный матричный материал – оптимальные условия трения. В отличие от известных методов формирования композиционных покрытий, в частности, гальванических, технологические возможности метода ПГИ в области создания композиционных покрытий пока еще недостаточно изучены, имеется очень мало данных о влиянии состава материала покрытия и режимов его нанесения на физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых композиционных покрытий. Легирующие элементы, внедренные в матрицу, создают определенные трудности при переносе материала покрытия металлической щеткой, препятствуя адгезии материала-донора к подложке, в отличие от однородных покрытий. Поэтому при выборе технологических режимов ПГИ, обеспечивающих перенос композиционного материала покрытия на обрабатываемую поверхность, с улучшенными качественными характеристиками сформированного покрытия и повышенными эксплуатационными свойствами узлов трения, использование рекомендаций, разработанных для однородных покрытий, не всегда дает положительный результат. В то же время подбор технологических режимов экспериментальным путем – весьма трудоемкий и длительный процесс, требующий проведения большого количества опытов. В этой связи разработка математической модели, позволяющей на предварительном этапе исследований определить режимные параметры процесса ПГИ, обеспечивающие формирование легированного неметаллическими фазами покрытия, представляет значительный научный и практический интерес.

Методика исследований. Разработку математической модели процесса ПГИ осуществляли с использованием методов математического планирования эксперимента [7, 8]. В качестве варьируемых факторов были взяты исходные технологические параметры процесса нанесения покрытий методом ПГИ: натяг N (фактор X_1), отношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали к линейной скорости вращения щетки $V_d/V_{щ}$ (фактор X_2), время обработки, количественно выражаемое числом проходов n щетки по поверхности детали (фактор X_3). Учитывая результаты собственных предварительных исследований и имеющиеся в литературе рекомендации [1], установили следующие интервалы варьирования факторов: N (фактор X_1) – 0,5...1,5 мм; $V_d/V_{щ}$ (фактор X_2) – 0,0015...0,0035; n (фактор X_3) – 3...9. Параметр оптимизации – толщина h композиционного покрытия. Для получения математической модели процесса в виде полинома второй степени был реализован некомпозиционный план второго порядка.

По технологическим режимам, соответствующим матрице планирования эксперимента, осуществляли формирование композиционного покрытия на экспериментальных образцах. В качестве материала-донора при нанесении покрытий использовали материалы на основе бронзы, легированной компонентами твердой смазки (графит, дисульфид молибдена), полученные методами порошковой металлургии из порошковой шихты прессованием с последующим спеканием. Покрытия наносили на прямоугольные образцы, изготовленные из серого чугуна СЧ-20. Для нанесения покрытия использовали стальную проволочную щетку с ворсом из стали 65Г (ГОСТ 1050-88). Геометрические параметры щетки: диаметр 250 мм, ширина 80 мм, вылет и диаметр ворса соответственно 47 мм и 0,2 мм. Для измерения толщины плакированного слоя использовали цифровой магнитный толщиномер МТЦ-3М. Значения толщины сформированных покрытий получали как среднее из 20-25 измерений. В зависимости от технологического режима ПГИ на обрабатываемой поверхности осаждались покрытия толщиной от 4 до 14 мкм.

Результаты. После статистической обработки экспериментальных данных и выделения статистически значимых коэффициентов регрессии по известным методикам была получена математическая модель процесса нанесения композиционного покрытия методом ПГИ:

$$h = 10,57 + 2,98X_1 - 0,74X_2 + 1,89X_3 + 1,08X_1X_3 - 2,85X_1^2.$$

Проверка по критерию Фишера при 5 %-ном уровне значимости подтвердила адекватность разработанной модели.

Анализ полученного уравнения показывает, что на толщину композиционного покрытия, сформированного методом ПГИ из легированных компонентами твердой смазки материалов на основе бронзы, наибольшее влияние оказывают факторы X_1 и X_3 , причем их влияние проявляется как индивидуально, так и во взаимодействии. Влияние фактора X_2 менее существенно. Из уравнения следует, что для увеличения толщины композиционного покрытия факторы X_1 и X_3 следует устанавливать на верхнем уровне, а фактор X_2 – на нижнем.

Для удобства интерпретации полученных результатов и использования модели для практических расчетов целесообразно перейти к натуральным значениям факторов:

$$h = -4,41 + 24,45N - 737,5(V_d/V_{щ}) - 0,09n + 0,72Nn - 11,4N^2.$$

Полученная математическая модель позволяет на стадии разработки технологического процесса определить режимные параметры метода ПГИ, обеспечивающие перенос материала покрытия на обрабатываемую поверхность и формирование композиционного покрытия требуемой толщины. В качестве примера на рис. 1, 2 приведены зависимости толщины покрытия h от исследуемых технологических параметров процесса плакирования, построенные с использованием разработанной модели.

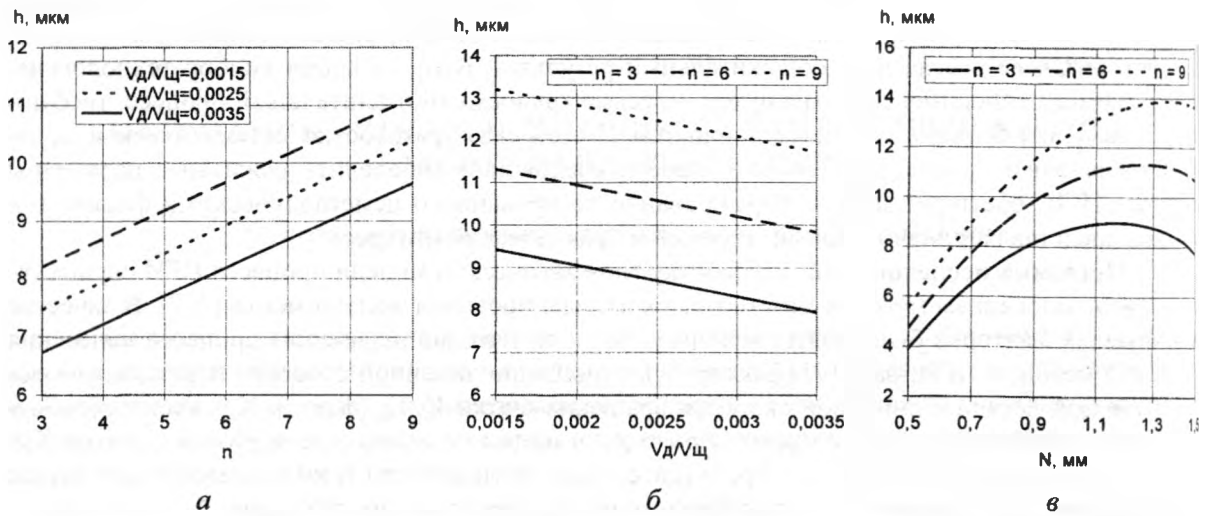


Рис. 1. Зависимость толщины h покрытия от числа проходов n при $N = 0,8$ мм (а), отношения линейной скорости перемещения обрабатываемой детали к линейной скорости вращения щетки $V_d/V_{щ}$

при $N = 1$ мм (б), натяга N при $V_d/V_{щ} = 0,0025$ (в)

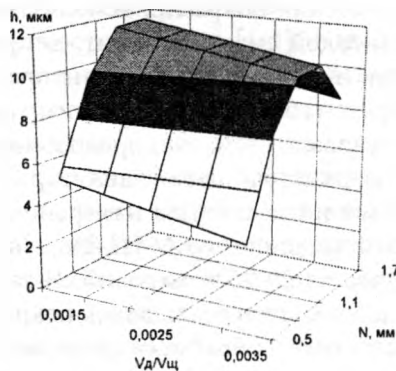


Рис. 2. Влияние одновременного воздействия факторов $V_d/V_{щ}$ и N на изменение толщины h композиционного покрытия при постоянном числе проходов n , равном 6

На основании анализа полученных зависимостей можно заключить, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение натяга и времени обработки, а также уменьшение отношения $V_d/V_{щ}$ приводит к приращению толщины покрытия. Зависимость

толщины покрытия от величины натяга носит нелинейный характер: прирост толщины покрытия происходит до определенного уровня ($N = 1 \dots 1,3$ мм), дальше которого увеличение N не приводит к существенному росту покрытия. Причина в том, что при величине натяга, большей $1,1 \dots 1,3$ мм, происходит не столько перенос ворсом щетки материала покрытия на обрабатываемую поверхность, сколько, наоборот, снятие части ранее сформированного слоя вследствие развивающихся процессов микрорезания. Подобный эффект наблюдается и при чрезмерной длительности обработки: практика показывает, что увеличение числа проходов щетки по обрабатываемой поверхности более девяти не приводит к значительному приращению толщины покрытия, а может лишь ухудшить качество поверхностного слоя.

Назначая на основании разработанной модели технологические режимы формирования покрытия методом ПГИ, следует также принимать во внимание, что чрезмерное время обработки снижает производительность процесса нанесения покрытия, а увеличение натяга может вызвать преждевременный износ ворса металлической щетки.

С учетом вышеизложенного и руководствуясь полученной математической зависимостью, а также ее графической интерпретацией, были установлены рациональные режимные параметры процесса ПГИ, обеспечивающие нанесение композиционных покрытий из легированных медьсодержащих материалов: натяг $N = 0,8 \dots 1,0$ мм; число проходов $n = 5 \dots 6$; соотношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали и линейной скорости вращения щетки $V_d/V_{щ} = 0,0023 \dots 0,0027$. Использование установленных технологических параметров способствует формированию сплошного, прочно сцепленного с основой покрытия толщиной $10 \dots 12$ мкм, что достаточно для обеспечения антифрикционных и приработочных свойств сопряжения.

Для опытной проверки эффективности разработанной модели на направляющих скольжения станин металлорежущих станков, изготовленных из чугуна СЧ-20, в соответствии с рациональными режимами плакирования были сформированы композиционные покрытия из бронзы, легированной компонентами твердой смазки – графитом и дисульфидом молибдена. При этом конструктивные параметры используемой для переноса материала покрытия металлической щетки (диаметр и ширина щетки, диаметр и длина ворса, число ворсинок щетки) выбирали с учетом ранее установленных зависимостей [9]. Оценку работоспособности направляющих скольжения с композиционным покрытием выполняли на стенде, имитирующем условия работы направляющих скольжения при перемещении по ним ползуна с грузом. Испытания проводили на двух скоростях перемещения ползуна: 125 мм/мин и 190 мм/мин. Величину удельной нагрузки изменяли в диапазоне $0,01 \dots 0,1$ МПа. Результаты испытаний показали улучшение равномерности медленных перемещений ползуна по направляющим скольжения в 87 случаях из 100, а также снижение коэффициента трения в среднем на $20 \dots 40$ % по сравнению с направляющими без покрытия [10]. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования разработанных подходов для установления технологических параметров процесса формирования композиционного покрытия методом плакирования гибким инструментом.

Заключение. Использование полученной математической модели позволяет на стадии разработки технологического процесса установить рациональные режимные параметры метода ПГИ, обеспечивающие перенос материала покрытия на обрабатываемую поверхность и формирование композиционного покрытия требуемой толщины, улучшение качественных характеристик сформированного слоя и повышение эксплуатационных свойств узлов трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белевский, Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л.С. Белевский. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. лица РАН, 1996. - 230 с.
2. Анцупов, В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – 241 с.
3. Леванцевич, М.А. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, В.Г. Зольников //

Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. - 2005. - № 1. - С. 67-72. 4. Леванцевич М.А. Повышение износостойкости деталей машин деформационным плакированием гибким инструментом / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Технопринт, 2004. – Вып. 2, Т. 4. – С. 192-197. 5. Батаев, А. А. Композиционные материалы. Строение, получение, применение: учеб. / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 383 с. 6. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко [и др.]. – М.; Гомель: Энергоатомиздат БелГУТ, 2004. – 519 с. 7. Жарский, И.М. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие для вузов / И.М. Жарский, Б.А. Коледин, И.Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2003. – 178 с. 8. Инютин, В.И. Основы научных исследований: учеб.-метод. пособие / В.И. Инютин. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 43 с. 9. Леванцевич, М.А. Выбор рациональных режимов плакирования направляющих скольжения металлорежущих станков / Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Лукашик А.А. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – № 2. – С. 80-82. 10. Исследование работоспособности направляющих скольжения с покрытием из порошковых материалов / Леванцевич М.А. [и др.] // Порошковая металлургия: Сб. науч. тр. / Ин-т порошковой металлургии НАН Беларуси. – Мн., 2008. – № 31. – С. 93-97.

УДК 621.793

Сокоров И.О., Спиридонов Н.В., Володько А.С., Пилецкая Л.И.

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОПОРНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ВАЛОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

На начальном этапе исследований ставилась задача экспериментально изучить свойства газотермических покрытий из композиционных материалов, составленных исходя из поставленной цели исследований – обеспечить работоспособность покрытий в условиях высоки удельных нагрузок. Поэтому разрабатывались композиционные материалы на основе износостойких, антифрикционных и терморреагирующих материалов. Выбор исходных порошковых материалов для создания композиций с целью последующего получения газотермических покрытий производился исходя из соответствия их следующим условиям:

- высокого уровня физико-механических свойств покрытий, обеспечивающих защиту от различных видов износа (абразивного, фреттинг-коррозии) и прочности сцепления, гарантирующей работоспособность деталей с покрытиями;

- минимальной себестоимости композиционного материала.

Первому условию соответствуют материалы на основе никеля, железа, медесодержащие (бронзы, баббиты). Повышенный уровень свойств в покрытии прогнозируется в случаях наличия в исходном материале значительного количества легирующих элементов, способствующих повышению износостойкости, стойкости к фреттинг-коррозии, антифрикционных свойств и прочности сцепления. Это характерно для самофлюсующихся материалов на основе никеля и железа, а также для бронз. Терморреагирующие материалы за счет экзотермической реакции повышают температуру в зоне контакта напыляемого материала и основы, что способствует их проплавлению и повышению температуры в контакте «покрытие – основа», увеличивая тем самым прочность сцепления.

Второму условию удовлетворяют самофлюсующиеся сплавы на основе железа и материалы на основе меди. Кроме того, согласно [1] сопротивлением изнашиванию при фреттинг-коррозии обладают материалы на основе никеля, железа, алюминия, меди и содержащие карбиды хрома, титана, ванадия. Известна [2] композиция ПС-85Н70Х17С4Р4+15Ю10Н стойкая к износу и фреттинг-коррозии.