

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ НА НАПРАВЛЯЮЩИХ СКОЛЬЖЕНИЯ

МАКСИМЧЕНКО Н. Н.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси

В современном машиностроении в подвижных сопряжениях технологического оборудования широкое применение получили направляющие скольжения, обладающие высокой жесткостью и устойчивостью к вибрациям. Вместе с тем одну из серьезных проблем при их эксплуатации, например в металлорежущих станках, представляет возникающее при медленных перемещениях станочных узлов по направляющим скольжения скачкообразное движение, вызванное появлением в направлении движения автоколебаний релаксационного или гармонического типа, приводящих к неравномерности подачи, снижению точности и чувствительности заданных перемещений, а следовательно, и точности обработки и качества обработанных поверхностей деталей. Основной причиной возникновения подобных явлений считают трение в направляющих скольжения, порождающее нестабильность сил трения при малых скоростях движения, усугубляемую разрушением защитных поверхностных пленок (смазочных, адсорбированных, окисных) и микроадгезионным схватыванием на участках фактического контакта трущихся поверхностей, при недостаточной жесткости всей системы [1, 2]. Для обеспечения плавного, без рывков движения сопрягаемых узлов по направляющим скольжения используют в основном или изменение условий фрикционного взаимодействия путем применения смазочных материалов с высокими антискачковыми свойствами, антифрикционных материалов и покрытий, или изменение параметров механической системы в целом, путем повышения жесткости привода, улучшения демпфирующих свойств системы и разгрузки направляющих [2, 3]. Перспективным направлением в решении задачи снижения трения и улучшения равномерности медленных перемещений является формирование на рабочих поверхностях

направляющих скольжения антифрикционных покрытий. Для формирования антифрикционных покрытий на направляющих скольжения широко используют процессы электроискрового легирования и напыления порошковых самофлюсующихся сплавов с последующим оплавлением [4, 5], финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) рабочих поверхностей с применением смазочных материалов, содержащих поверхностно-активные вещества [6]. Однако применение указанных методов формирования покрытий, учитывая крупные габариты станин и большую длину направляющих, не всегда экономически оправдано, а в некоторых случаях и технически трудно осуществимо. Кроме того, для реализации большинства рассмотренных методов во многих случаях требуется дорогостоящее оборудование и принятие специальных мер по экологической защите, что увеличивает себестоимость изготовления направляющих; серьезную проблему представляет и последующая механическая обработка сформированных покрытий. В этой связи задача разработки экономичного и экологически чистого метода формирования антифрикционных покрытий на направляющих скольжения с целью повышения равномерности перемещений и точности позиционирования станочных узлов является весьма актуальной, а ее решение важно как для станкостроения, так и для других отраслей промышленности.

Состояние вопроса и цель исследований.

Из большого разнообразия методов формирования покрытий получает распространение сравнительно недорогой и простой в реализации метод плакирования гибким инструментом (ПГИ), в качестве которого чаще всего используется вращающаяся металлическая щетка. Метод основан на механотермическом воздействии гибких элементов (ворса) вращающейся

металлической щетки на элемент из материала покрытия и обрабатываемую поверхность, при котором ворс щетки переносит частицы материала покрытия на поверхность детали, формируя плакирующий слой, и одновременно осуществляет ее наклеп [7, 8]. Ранее выполненные исследования показали, что покрытия из литых цветных металлов и сплавов, преимущественно на медной основе, способствуют улучшению триботехнических характеристик пар трения скольжения [7], однако обладают ограниченными технологическими возможностями и не всегда удовлетворяют растущим требованиям по повышению износостойкости, усталостной прочности, несущей способности и других показателей деталей трибосопряжений. Анализ эксплуатационных свойств современных антифрикционных материалов показал, что для расширения технологических возможностей покрытий, сформированных методом ПГИ, целесообразно в качестве материала покрытия использовать композиционные материалы, легированные упрочняющими и антифрикционными компонентами. В то же время на основании результатов предварительной экспериментальной оценки установлено, что режимные параметры процесса ПГИ, используемые при формировании покрытий из литых цветных металлов и сплавов, оказываются малоприспособными для формирования покрытий из композиционных материалов. Неметаллические включения (графит, дисульфид молибдена, ультрадисперсная алмазно-графитная шихта УДАГ и т. п.) препятствуют схватыванию и транспортировке ворсом щетки микрочастиц материала донора на обрабатываемую поверхность и их прочному сцеплению с основой, что приводит к неудовлетворительной сплошности сформированных покрытий и слабой прочности сцепления с основой. В связи с этим цель представленных исследований заключалась в разработке экспери-

ментально-статистической модели процесса формирования композиционных плакирующих слоев на направляющих скольжения, позволяющей управлять технологическими режимами процесса ПГИ, обеспечивая повышение эксплуатационных свойств подвижных сопряжений станочных узлов.

Для достижения поставленной цели использовали математические методы планирования эксперимента, в частности некомпозиционные планы второго порядка.

Уравнение отклика от независимых переменных с учетом эффектов их взаимодействия и ошибки эксперимента была представлена в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где y – параметр оптимизации; k – число факторов; i, l – номера факторов, $i \neq l$; x_i, x_l – варьируемые факторы; b_0, b_i, b_{il}, b_{ii} – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

В качестве варьируемых факторов были взяты технологические параметры процесса формирования плакирующего слоя методом ПГИ: время обработки, количественно выражаемое числом проходов n щетки по поверхности детали (фактор x_1); натяг (относительное сближение оси щетки и детали) N (фактор x_2); отношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали к линейной скорости вращения щетки $v_d/v_{щ}$ (фактор x_3). Факторы варьировались в диапазонах, приведенных в табл. 1. Параметр оптимизации – толщина h плакирующего композиционного слоя, сформированного на направляющих скольжения в результате обработки.

Таблица 1

Диапазоны варьирования технологических факторов

Фактор (параметр)	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Кодируемое значение		
			-1	0	+1
Число проходов n	x_1	5	5	10	15
Натяг N , мм	x_2	0,5	0,5	1,0	1,5
Отношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали к линейной скорости вращения щетки $v_d/v_{щ}$	x_3	0,1	0,15	0,25	0,35

Для удобства интерпретации полученных результатов и использования разработанной экспери-

ментально-статистической модели в практических расчетах осуществляли переход от коди-

рованных значений варьируемых факторов к натуральным:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i},$$

где x_i , X_i – значение i -го фактора соответственно в кодированном и натуральном масштабах; X_{0i} – основной уровень (значение «0») i -го фактора; ΔX_i – интервал варьирования i -го фактора.

Методика проведения эксперимента. По технологическим режимам, соответствующим матрице планирования эксперимента, осуществляли формирование плакирующих слоев на экспериментальных образцах, изготовленных из серого чугуна СЧ-20 (HRC 54–56). В качестве материала-донора использовали композиционные материалы на основе меди с добавками олова, свинца, железа, компонентов твердой смазки (графита, дисульфида молибдена), полученные методами порошковой металлургии. 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 40–75 мм и 0,2 мм. Для измерения толщины плакирующего слоя использовали цифровой магнитный толщиномер МТЦ-3М. Значения толщины сформированных покрытий получали как среднее из 20–25 измерений. В зависимости от технологического режима ПГИ толщина плакирующих слоев, сформированных на обрабатываемой поверхности, составляла 4–14 мкм.

Статистическая обработка экспериментальных данных и выделение статистически значимых коэффициентов регрессии по известным методикам позволили получить экспериментально-статистическую модель процесса формирования плакирующего композиционного слоя на рабочих поверхностях направляющих скольжения:

$$h = 9,524 + 3,125x_1 + 2x_2 + 1,125x_3 - 1,493x_2^2 - 1,247x_3^2.$$

Проверка по критерию Фишера при 5%-м уровне значимости подтвердила адекватность разработанной модели. В переходе к натуральным значениям варьируемых факторов полученная модель принимает вид:

$$h = -17,3 + 0,63n + 15,94N + 73,6(v_d/v_{ш}) - 5,97N^2 - 124,7(v_d/v_{ш})^2.$$

а

б

Анализ полученных результатов исследований. На основании анализа полученных зависимостей можно заключить, что в пределах установленных интервалов варьирования факторов увеличение натяга и времени обработки, а также уменьшение отношения $v_d/v_{ш}$ приводит к приращению толщины покрытия. Зависимость толщины покрытия от величины натяга носит нелинейный характер: прирост толщины покрытия происходит до определенного уровня ($N = 1–1,3$ мм), дальше которого увеличение N не приводит к существенному росту покрытия. Причина в том, что при величине натяга, большей 1,1–1,3 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.

На рис. 1 приведены зависимости толщины покрытия h от исследуемых технологических параметров процесса плакирования, построенные с использованием полученной модели.

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 изложенного выше, руководствуясь полученной экспериментально-статистической зависимостью, а также ее графической интерпретацией, были определены оптимальные технологические режимы процесса ПГИ, обеспечивающие формирование композиционных плакирующих слоев из медьсодержащих материалов с неметаллическими включениями на направляющих скольжения: натяг $N = 0,8–1,3$ мм; число проходов $n = 8–12$; соотношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали и линейной скорости вращения щетки $v_d/v_{ш} = 0,23–0,27$.

в

г

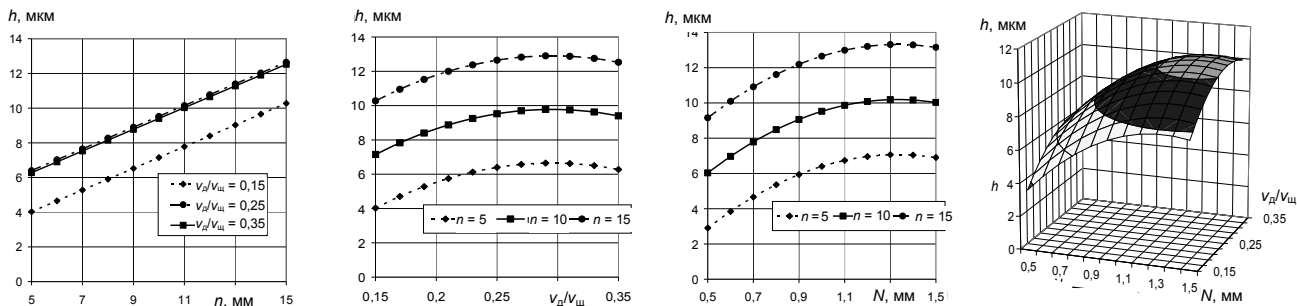


Рис. 1. Зависимость толщины h плакирующего композиционного слоя: а – от n при $N = 1,0$ мм; б – от $v_d/v_{ш}$ при $N = 1,0$ мм; в – от N при $v_d/v_{ш} = 0,25$; г – от $v_d/v_{ш}$ и N при $n = 10$

Использование установленных технологических параметров способствует формированию покрытия толщиной 8–12 мкм, что достаточно для обеспечения антифрикционных и приработочных свойств сопряжения.

Результаты оценки сплошности λ композиционных покрытий, сформированных с использованием установленных диапазонов значений n , N и $v_d/v_{ш}$, подтвердили, что выбранные оптимальные интервалы варьирования факторов обеспечивают получение сплошного ($\lambda = 95–100\%$) покрытия (рис. 2). Для сравнения, на рис. 2 показаны кривые, характеризующие покрытия, сформированные на режимах, выходящих за пределы установленных интервалов. Очевидно, что уменьшение нижней границы интервала не обеспечивает стопроцентной сплошности покрытия, а увеличение верхней границы интервала технически и экономически нецелесообразно.

Качественная оценка прочности сцепления композиционных покрытий методом крацевания (ГОСТ 9.302–88) стальными щетками с последующим визуальным осмотром поверхности показала, что на поверхности образцов отсутствуют дефекты в виде вздутий или отслаивания покрытия, что свидетельствует о высокой адгезии покрытия к подложке.

Таким образом, установленные на основании разработанной экспериментально-статистической модели оптимальные режимы формирования композиционных покрытий методом ПГИ были использованы для нанесения покрытий на рабочие поверхности направляющих скольжения станин металлорежущих станков.

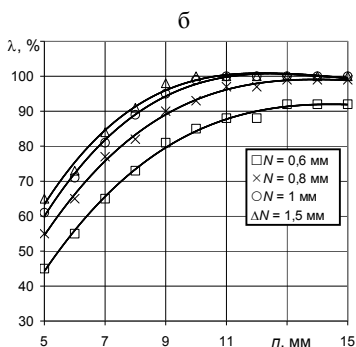
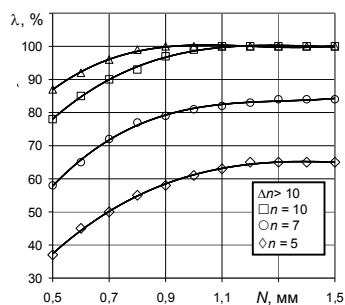


Рис. 2. Зависимость сплошности λ плакирующего слоя при $v_d/v_{ш} = 0,25$: а – от N ; б – от n

Исходная шероховатость поверхности направляющих по параметру R_a составляла 0,63 мкм, твердость – 48–50 HRC. После обработки толщина сформированного плакирующего слоя составила 10–12 мкм, шероховатость поверхности R_a – 0,4 мкм. Формирование покрытий осуществляли с помощью специально изготовленного технологического модуля (рис. 3), состоящего из электродвигателя, металлической дисковой щетки, бруска из материала покрытия, устройства для подачи материала покрытия.



Рис. 3. Формирование плакирующего слоя на рабочей поверхности треугольных направляющих скольжения станины

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 и 190 мм/мин. Величину удельной нагрузки изменяли в диапазоне 0,01–0,1 МПа. Результаты испытаний показали снижение коэффициента трения в среднем в 1,3–1,7 раза, а также улучшение равномерности медленных перемещений станочных узлов по направляющим скольжения в 1,74 раза по сравнению с направляющими без покрытия. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования разработанной экспериментально-статистической модели для установления оптимальных технологических параметров процесса формирования плакирующих композиционных слоев методом ПГИ, способствующих улучшению эксплуатационных свойств направляющих скольжения.

Технологический процесс формирования композиционных покрытий методом ПГИ на направляющих скольжения станин металлорежущих станков на основании результатов испытаний внедрен на ПРУП «МЗАЛ им. П. М. Машерова».

ВЫВОДЫ

Разработанная экспериментально-статистическая модель процесса формирования плакирующего композиционного слоя на направляющих скольжения позволяет управлять технологическими режимами плакирования гибким инструментом с целью получения заданных свойств покрытия (толщины, сплошности, адгезионной прочности).

Установлены оптимальные технологические режимы процесса ПГИ, обеспечивающие формирование сплошных, прочно сцепленных с основой композиционных покрытий требуемой толщины: $N = 0,8–1,3$ мм; $n = 8–12$; $v_d/v_{ш} = 0,23–0,27$.

Результаты экспериментальной оценки работоспособности направляющих скольжения, плакированных композиционным слоем, сформированным по установленным технологическим режимам ПГИ, подтвердили улучшение эксплуатационных свойств подвижных сопряжений станочных узлов по сравнению с направляющими без покрытия: снижение коэффициента трения в среднем в 1,3–1,7 раза, улучшение равномерности медленных перемещений станочных узлов по направляющим скольжения в 1,74 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Технология** машиностроения. Колебания и точность при обработке материалов резанием: учеб. пособие / С. Л. Мурашкин [и др.]; под общ. ред. С. Л. Мурашкина. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 280 с.
2. **Проников, А. С.** Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 559 с.
3. **Сергель, Н. Н.** Металлорежущие станки: курс лекций / Н. Н. Сергель. – Барановичи: Баранович. гос. ун-т, 2006. – 358 с.
4. **Сердобинцев, Ю. П.** Триботехническое моделирование и исследование модифицированных пар трения технологического оборудования: монография / Ю. П. Сердобинцев, А. А. Подшипков. – Волгоград: Политехник, 2002. – 179 с.
5. **Тополянский, П. А.** Плазменно-дуговая наплавка – эффективный метод получения специальных свойств поверхностей и восстановления изношенных размеров деталей / П. А. Тополянский // Промышленный вестник. – 2000. – № 1–2. – 17 с.
6. **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность): учеб. / Д. Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
7. **Леванцевич, М. А.** Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками / М. А. Леванцевич, Н. Н. Максимченко, В. Г. Зольников // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 1. – С. 67–72.
8. **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.

Поступила 07.07.2009