

¹Л.А. Лопата, канд. техн. наук, доц.,
²Б. А. Ляшенко, д-р техн. наук, проф.,
³В. И. Калиниченко, канд. техн. наук, доц.,
⁴Ю. В. Волков, соискатель,
⁴Т. В. Лопата, студентка

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ

¹Национальный авиационный университет

²Институт проблем прочности НАН Украины

³Одесская национальная морская академия

⁴Кировоградский национальный технический университет

Рассмотрено получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием. Показано, что нанесение дискретных покрытий позволяет устранить явление краевого эффекта при электроконтактном припекании порошковых материалов. При этом обеспечивается равномерное уплотнение, нагрев припекаемого порошкового слоя и получение покрытий с однородной пористостью и адгезионной прочностью при одновременном обеспечении минимального уровня напряженно-деформируемого состояния покрытия под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Постановка проблемы. Главной причиной, обуславливающей снижение надежности рабочих параметров машин, является износ деталей. Одним из путей повышения работоспособности деталей машин и механизмов и защиты контактных поверхностей от интенсивного износа является нанесение износостойких покрытий на их рабочие поверхности.

Нанесение износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием (ЭКПП) находит все большее применение в машиностроении [1]. Этому способствуют высокая адгезионная прочность, низкая энергоемкость процесса, минимальные припуски на финишную обработку [2]. Наиболее эффективна эта технология для упрочнения и восстановления деталей типа «вал». При

этом температура детали не превышает 60...80 °С, а следовательно, отсутствует термическое коробление и поводки детали. Технология ЭКПП относится к категории «холодных» и «сухих», следовательно не требует жидких технологических сред [2].

Недостатком технологии является краевой эффект, который при использовании цилиндрического электрода не обеспечивает равномерности температуры и давления по его ширине. Следствием этого является неоднородная пористость покрытия, максимальная в зонах кромки электрода, а также неравномерность адгезионной прочности со снижением ее в зоне кромки покрытия [3]. Краевой эффект проявляется в двух вариантах ЭКПП – при нанесении покрытия на плоскую поверхность с использованием точечного электрода и оборудования для точечной сварки, а также при нанесении покрытия на цилиндрическую поверхность с использованием роликового электрода и оборудования для шовной сварки.

Для устранения этого недостатка разработан электрод с трапецевидной формой сечения [4]. На рис. 1 приведена схема фасонного электрода.

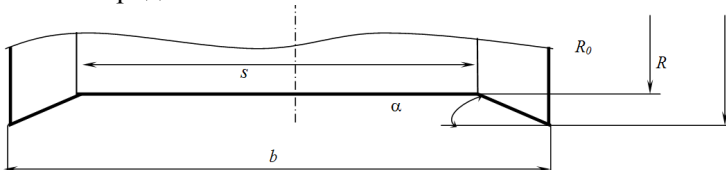


Рис. 1. Схема трапецевидного электрода

При постоянной ширине электрода ($b = 10$ мм), а также выбором его глубины R_0-R и угла наклона кромок α , достигли удовлетворительной равномерности распределения температур (рис. 2, а) и давлений (рис. 2, б) по ширине электрода b . Что обеспечило равномерную пористость покрытия (рис. 2, в) и его адгезионную прочность (рис. 2, г) по ширине электрода.

Фасонный электрод неизбежно создает прерывчатость слоя покрытия, нанося на вал покрытие в виде спирали. Макрогеометрия сечения покрытия приведена на рис. 3. Это обстоятельство позволяет реализовать принцип нанесения дискретных покрытий повышенной термомеханической стойкости [5; 6]. При этом следует отметить две особенности:

– дискретная структура образуется при непрерывном технологическом процессе ЭКПП;

– дискретность структуры образуется за счет промежутка между соседними витками спирали покрытия. Таким образом, дискретность структуры покрытия, его прерывистость образуется в направлении действия максимальных осевых напряжений, возникающих при эксплуатации вала.

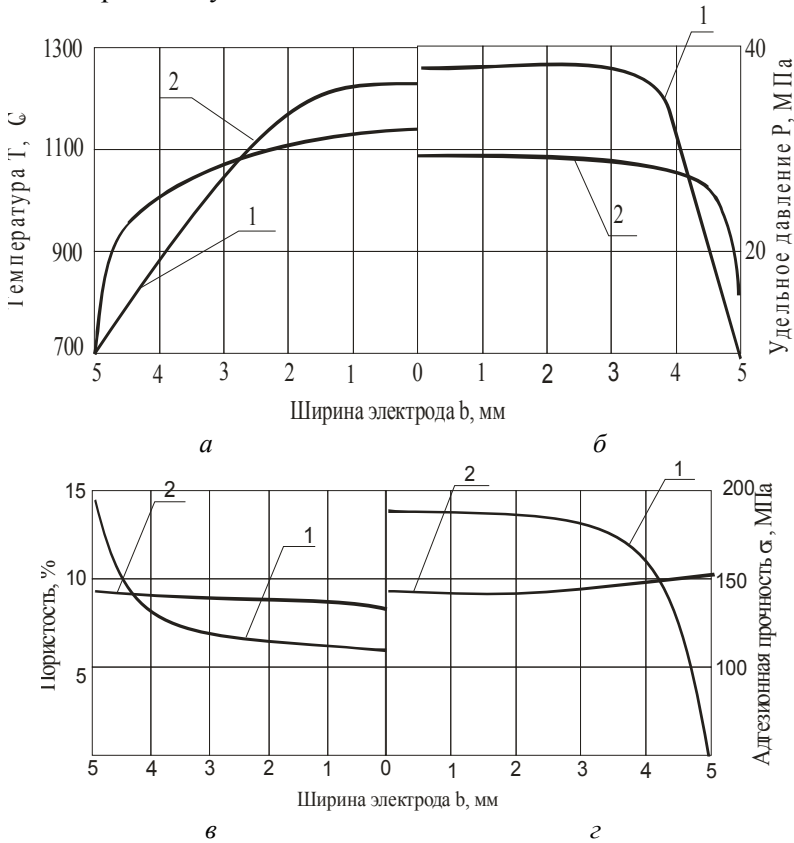


Рис. 2. *а* – распределение температуры по ширине электрода; *б* – распределение удельного давления по ширине электрода; *в* – распределение пористости покрытия по ширине электрода; *г* – распределение адгезионной прочности по ширине электрода; 1 – цилиндрический электрод; 2 – трапецидальный электрод

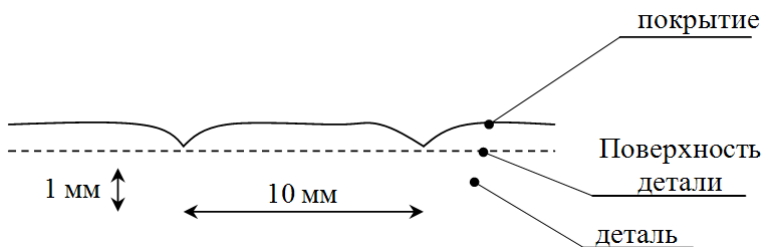


Рис. 3. Макрогеометрия поверхности покрытия

Применение подобного решения для газотермического напыления дискретных покрытий протекторного свойства на длинномерных теплообменниках повысило предельное состояние деформируемой основы более чем в 3 раза за счет повышения когезионной и адгезионной стойкости покрытия [7]. Схема электроконтактного припекания порошковых покрытий фасонным роликовым электродом приведена на рис. 4.

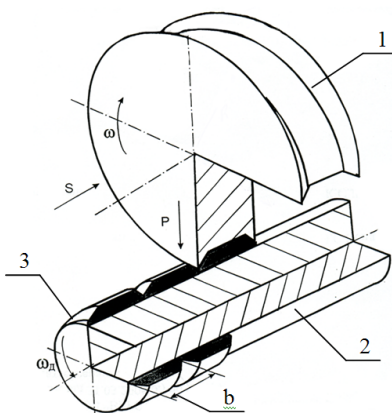


Рис. 4. Схема электроконтактного припекания порошкового покрытия: 1 – фасонный электрод, 2 – деталь, 3 – покрытие, P – давление на электроде, S – подача электрода, ω , ω_d – угловые скорости электрода и детали

При упрочнении плоской поверхности точечным электродом с фасонной торцевой поверхностью образуется покрытие с классической дискретной структурой островкового типа [5; 6].

Выбор геометрических параметров фасонных электродов проводится эмпирически из условий равномерной пористости и адгезионной прочности покрытия.

Цель статьи – наряду с однородной пористостью и адгезионной прочностью обеспечить минимальный уровень напряженно-деформируемого состояния покрытия под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Средство достижения цели – выбор геометрических параметров дискретных покрытий, обеспечивающих минимальную концентрацию напряжений как в слое покрытия, так и в плоскости адгезионного контакта.

Методика исследований. Для формирования износостойких покрытий использовали самофлюсующие порошки на никелевой и железной основе [1–3]. Самофлюсующиеся порошки представляют собой многокомпонентные гетерогенные системы на основе Ni, Co, Fe, содержащие мягкую матрицу и твердые дисперсные включения карбидов, боридов, силицидов. Наиболее широко применяется хромоникелевые порошки ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4 (системы Ni-Cr-B-Si-C)ГОСТ 21448-75. Для повышения износостойкости, твердости и других свойств покрытий целесообразно использовать порошки на основе железа. Они являются наиболее массовым продуктом порошковой металлургии. К тому же механическая обрабатываемость материалов на основе железа значительно выше, чем на никелевой основе. Температуры плавления самофлюсующихся порошков на никелевой основе составляют 980–1150 °С [1–3]. Самофлюсующиеся порошки на железной основе имеют на 50–80 °С более высокую температуру плавления. Данные, полученные авторами [1–3], позволили выбрать порошки ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4 на никелевой основе и ПГ-С1 на железной основе, как лучшие, в качестве эталонов для разработки покрытий, обладающих высоким комплексом эксплуатационных характеристик (износостойкостью, теплостойкостью, коррозионной стойкостью. Для исследований в качестве материала покрытия использовались порошки ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4 ПГ-СР4 ГОСТ 21448-76 и ПГ-С1 ГОСТ 21448-75.

Покрытия наносилось на образцы методом электроконтактного припекания на специально разработанном оборудовании под давлением при прямом пропускании электрического тока при следующих параметрах процесса: силе тока – 8...30 кА, вторичном

напряжении 1...6В, давления до 100 МПа, времени импульса 0,04...0,2 с, времени паузы 0,04...0,2 с. Скорости нагрева достигали $10^3 \dots 10^4$ К/с. В качестве инструмента для нанесения дискретных покрытий использовался специально разработанный электрод (см. рис. 4).

Расчет напряженно-деформируемого состояния композиции основа–покрытие проводили методами численного анализа [8] в лицензионном конечно-элементном комплексе MSC VisualNastran for Windows 2003 [9; 10]. Методика расчета напряжений заключается в том, что строится конечно-элементная модель композиции основа–дискретное покрытие, задаются необходимые физико-механические свойства материалов основы и покрытия, а также граничные условия в виде силового нагружения и закрепления. Для упрощения расчетов используем модели с упорядоченной схемой расположения дискретов на основе расчетной схемы, изображенной на рис. 5.

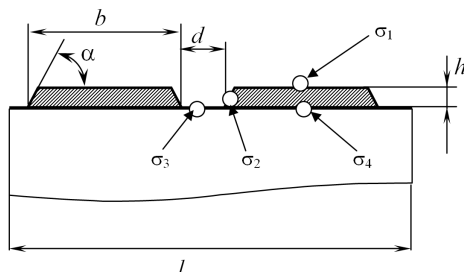


Рис. 5. Схематическое изображение композиции основа–покрытие с изменяемыми параметрами и зонами напряжений: σ_1 – напряжения в центре покрытия (зона когезионного растрескивания); σ_2 – напряжения на краю покрытия (зона адгезионного разрушения); σ_3 – напряжения в основе между дискретами; σ_4 – напряжения в основе под покрытием

Конечно-элементная модель композиции основа–покрытие с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу показана на рис. 6. Поскольку модель имеет ось симметрии, то анализ проводили для половины расчетной схемы. Количество элементов модели с электроконтактным дискретным покрытием составляет 2750, узлов – 2865. Физико-механические свойства основы: $E_o = 2$ ГПа, $\nu_o = 0,25$; покрытия: $E_n = 1,5$ ГПа, $\nu_n = 0,3$. Базовые параметры покрытия $b = 10$ мм, $h = 1,5$ мм, $d = 2$ мм (см. рис. 2) взяты согласно условиям

эксплуатации, при которых покрытие работает на деформируемой основе [2].

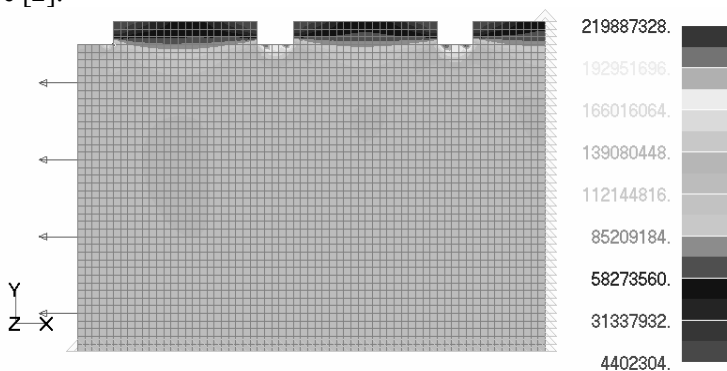


Рис. 6. Напряженно-деформируемое состояние композиции основа-покрытие от действия силового нагружения вдоль оси X с параметрами покрытия $d = 2,5$ mm, $b = 10$ mm, $h = 1,5$ mm.

Анализ результатов численного моделирования показывает, что с уменьшением расстояния между дискретам соответственно растет концентрация напряжений σ_3 . Пики напряжений на краях покрытия можно сгладить варьированием угла α . При изменении высоты электрода h , при постоянной длине верхней его части s , формирующей форму покрытия, и неизменной ширине b меняется угол наклона кромки (таблица).

Таблица

Характер изменения угла α при изменении высоты электрода

H	1,5	1,2	1	0,8	0,5	0,3
α	64	58,6	54,5	48,2	34,4	22,8

Изменение напряжений в междискретной зоне в зависимости от расстояния d показано на рис. 7. Сравнение σ_3 в зоне между дискретам для покрытий различной толщины $h = 0,5$ и $h = 1,5$ показывает, что для разной толщины покрытий характер снижения напряжений с увеличением междискретного расстояния соблюдается.

Зависимость напряжений во всех рассматриваемых нами характерных точках композиции основа-покрытие от толщины показана на рис. 8. Пересечение графика σ_2 и σ_3 говорит о том, что для обеспечения адгезионной прочности покрытия с основой при нор-

мальном нагружении, необходимо соблюсти соотношения ширины покрытия к его высоте как 1/12,5. При этом угол наклона кромок покрытия α составляет около 50 градусов.

σ_3 , МПа

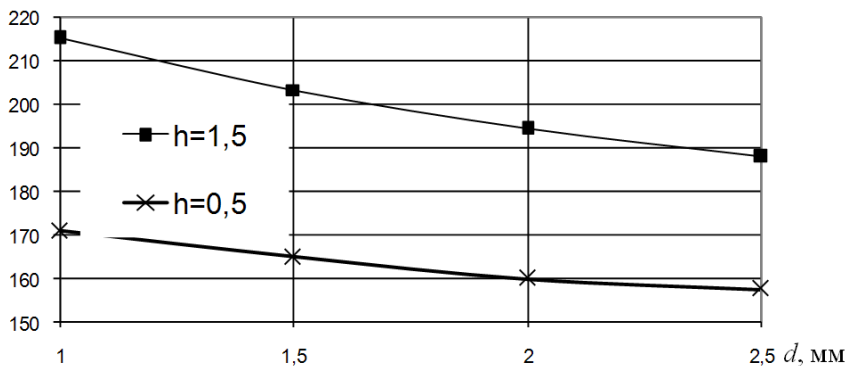


Рис. 7. Зависимость напряжений σ_3 в основе между покрытием от разного междискретного расстояния d

σ , МПа

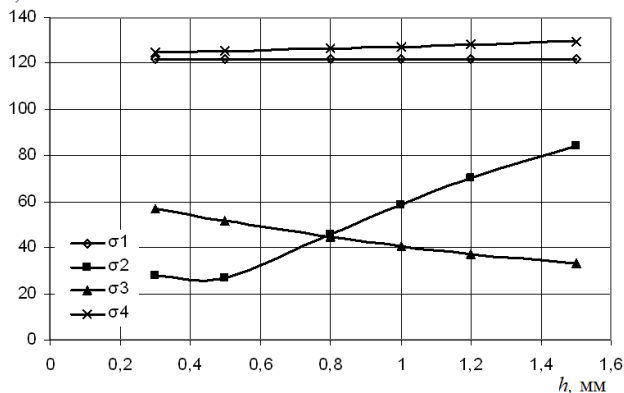


Рис. 8. Зависимость эквивалентных напряжений для основы и покрытия в зависимости от его толщины при $d = 2$ мм

Влияние ширины покрытия D при $h = 0,5$ мм и $d = 2$ мм на соотношение напряжений σ_1/σ_2 , σ_3/σ_4 от действия распределенной растягивающей нагрузки в основе вдоль оси x отображено на графике (рис. 9).

Условно график можно разделить на три части: покрытия с размерами от 0 до 10 мм, от 10 до 20 мм и от 20 мм и выше. Первая часть относится к покрытиям с высокой адгезионной стойкостью, вторая часть – к покрытиям, прочностные характеристики которых слабо зависят от ширины покрытия, и третья часть – это те покрытия, которые по прочностным характеристикам ближе к сплошному покрытию.

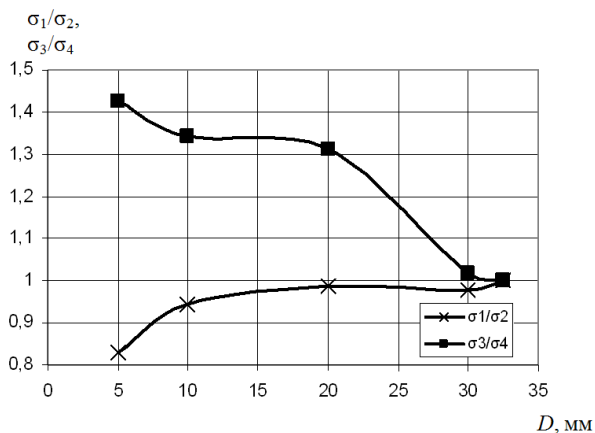


Рис. 9. Соотношение эквивалентных напряжений в покрытии и в основе от размера дискретного участка D , мм

Наличие информации о величине и знаке напряжений в покрытии необходимо для расчета прочности композиции основа–покрытие при различных видах эксплуатационных нагрузок (осевая; контактная), а также для принятия решения о необходимости их снижения.

Закключение. Проектирование дискретного покрытия с оптимальным соотношением геометрических параметров позволяет обеспечить стойкость конструкций, которые работают в условиях высоких контактных нагрузок и трения.

Результаты исследований можно использовать при разработке технологических процессов формирования электроконтактных покрытий на этапе проектирования с целью повышения его надежности и износостойкости.

Список литературы

1. *Канарчук В.С., Посвятенко Е.К., Лопата Л.А.* Електроконтактне зміцнення як метод інженерії поверхні деталей транспортних засобів при їх виготовленні і відновлення. Вісник /Зб. наук. праць транспорт. ун-ту та транспорт. академії України. – Вип. № 4, – К., РВВ НТУ, 2001, – С.3–6.
2. *Лопата Л.А.* Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием с силовым активированным сдвигом. Автореф.... дисс. канд. техн. наук – Минск, 1987.– 27 с.
3. *Красота М.В.* Технологія електроконтактного наварювання порошків з отриманням рівномірних властивостей по перерізу покриття. Автореф.... дис. канд. техн. наук. – К., 2002.– 20 с.
4. Пат. України 37465А, МКИ В22F 1/00. Електрод для електроконтактного прип'якання порошків / Л.А.Лопата, Ф.Й.Златопольський, М.В.Красота Заявл. 14.01.99, опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.
5. *Ляшенко Б.А., Кузема Ю.А., Дигам М.С. и др.* Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью. – К. 1984, ИПП АН УССР. – 57 с.
6. *Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы. – 2001, № 4. – С. 17–25.
7. Авт. свид. СССР 1256434, С23С 4/00. Способ защиты от коррозии труб теплообменников. Шаривкер С.Ю., Ляшенко Б.А., Цыгулев О.В. и др. –Опубл. 07.09.86, Бюл. № 33.
8. *Бате К., Вилсон Е.* Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
9. *Шимкович Д.Г.* Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows . – М.:ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
10. (SN=1410876-07592353bb492cfce94a)

Стаття надійшла до редакції 05.04.09.