

УДК 621.91

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЕ ПРИПЕКАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ

*канд. техн. наук, доц. Л.А. ЛОПАТА**(Национальный авиационный университет, Киев);**д-р техн. наук, проф. Б.А. ЛЯШЕНКО, канд. техн. наук В.И. КАЛИНИЧЕНКО**(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный 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.

Введение. Электроконтактное припекание порошковых покрытий (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 150 °С, а следовательно, отсутствует термическое коробление и поводки детали. Недостатком технологии является неравномерность свойств в получаемых покрытиях. Причина этого недостатка – 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. Поэтому для получения покрытий с равномерными свойствами необходимо было устранить этот недостаток метода электроконтактного припекания, что и явилось целью работы – разработать способ устранения явления краевого эффекта при электроконтактном припекании порошковых покрытий за счет создания покрытий дискретной структуры, который позволит наряду с однородной пористостью и адгезионной прочностью обеспечить минимальный уровень напряженно-деформируемого состояния покрытий 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.

Метод и методика исследований. Покрытие наносилось на образцы методом электроконтактного припекания на специально разработанном оборудовании под давлением. Параметры процесса: сила тока до 8...30 кА; вторичное напряжение 1...6 В; давление до 100 МПа; время импульса 0,04...0,2 с; время паузы 0,04...0,2 с. Скорость нагрева достигала $10^3...10^4$ К/с.

В качестве инструмента для нанесения дискретных покрытий использовался электрод специальной конструкции. 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 применяются хромоникелевые порошки ПР-НХ13СР, ПР-НХ13СР3, ПР-НХ15СР2, ПР-НХ16СР3 (системы Ni – Cr – В – Si – С) производства ОАО «Полема», г. Тула. 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]. Температура плавления самофлюсующихся порошков на железной основе на 50...80 °С выше. Данные, полученные авторами [1 – 3], позволили выбрать порошки ПР-НХ13СР, ПР-НХ13СР3, ПР-НХ15СР2, ПР-НХ16СР3 на никелевой основе и ПР-ЖХСР на железной основе как лучшие, в качестве эталонов для разработки покрытий, обладающих высоким комплексом эксплуатационных характеристик (износостойкостью, теплостойкостью, коррозионной стойкостью). Расчет напряженно-деформируемого состояния композиции основа – покрытие проводили методами численного анализа в лицензионном конечно-элементном комплексе MSC Visual Nastran for Windows 2003 [4, 5].

Получение дискретных покрытий электроконтактным припеканием. Для достижения равномерных свойств при электроконтактном припекании и устранения явления краевого эффекта был разработан электрод с трапецевидной формой сечения (рис. 1) [6].

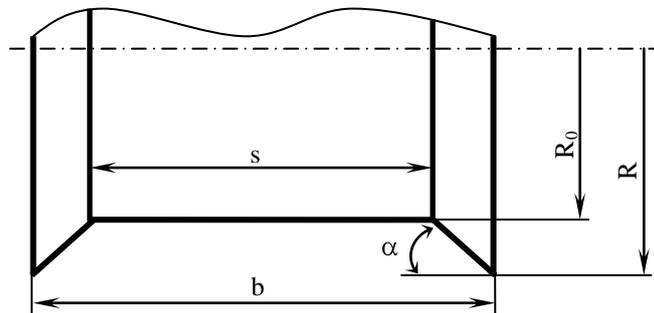


Рис. 1. Трапецевидный электрод

При постоянной ширине электрода ($b = 10$ мм) путем выбора его глубины $R_0 - R$ и угла наклона кромок α была достигнута удовлетворительная равномерность распределения температур (рис. 2, а) и давлений в покрытии (рис. 2, б), ширина дискеты покрытия соответствует ширине электрода b . Это обеспечило равномерную пористость покрытия (рис. 2, в) и адгезионную прочность (рис. 2, г) по ширине дискеты.

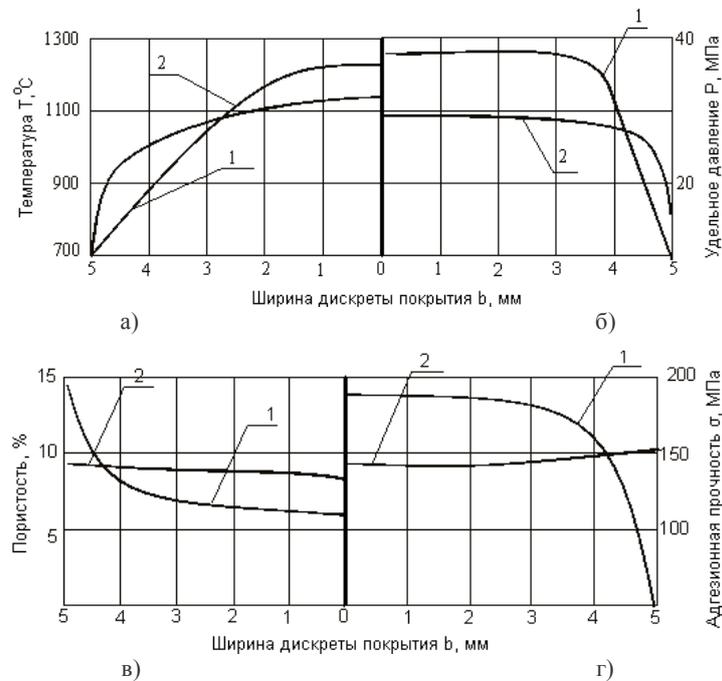


Рис. 2. Параметры напряженно-деформированного состояния покрытия:

- а – распределение температуры по ширине дискеты покрытия; б – распределение удельного давления по ширине дискеты покрытия; в – распределение пористости покрытия по ширине дискеты покрытия; г – распределение адгезионной прочности по ширине дискеты покрытия;
- 1 – цилиндрический электрод; 2 – трапецевидный электрод

Фасонный электрод неизбежно создает прерывчатость слоя покрытия, нанося на вал покрытие в виде спирали. Макрогеометрия сечения покрытия приведена на рисунке 3.

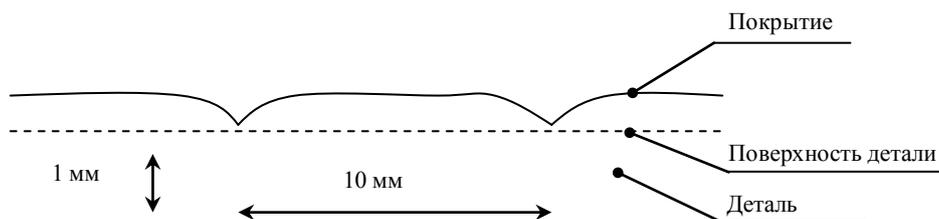


Рис. 3. Макрогеометрия поверхности покрытия

Это обстоятельство позволяет реализовать принцип нанесения дискретных покрытий повышенной термомеханической стойкости [7, 8]. 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.

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 [9].

Схема электроконтактного припекания порошкового покрытия фасонным роликовым электродом приведена на рисунке 4. При упрочнении плоской поверхности точечным электродом с фасонной торцевой поверхностью образуется покрытие с классической дискретной структурой островкового типа [7 – 9].

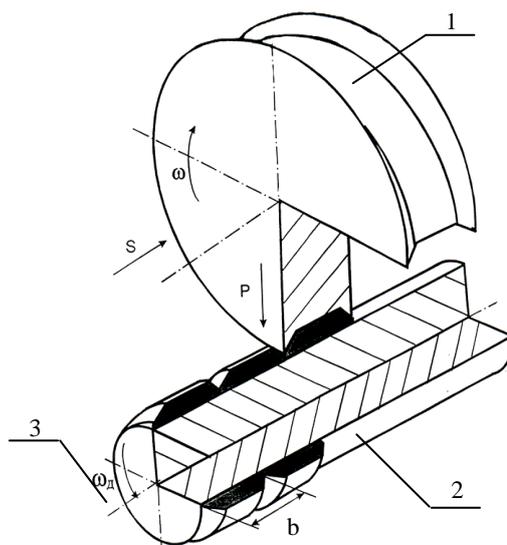


Рис. 4. Схема электроконтактного припекания порошкового покрытия:

1 – фасонный электрод; 2 – деталь; 3 – покрытие;

P – давление на электроде; S – подача электрода;

ω , ω_d – соответственно угловые скорости электрода и детали; b – ширина дискреты

Определение геометрических параметров дискретных покрытий по напряженно-деформированному состоянию. Выбор геометрических параметров фасонных электродов проводился эмпирически из условий равномерной пористости и адгезионной прочности покрытия. Методика расчета напряжений заключалась в построении конечно-элементной модели композиции основа – дискретное покрытие; задавались необходимые физико-механические свойства материалов основы и покрытия, а также граничные условия в виде силового нагружения и закрепления. Для упрощения расчетов использовали модель с упорядоченной схемой расположения дискрет на основе расчетной схемы, изображенной на рисунке 5.

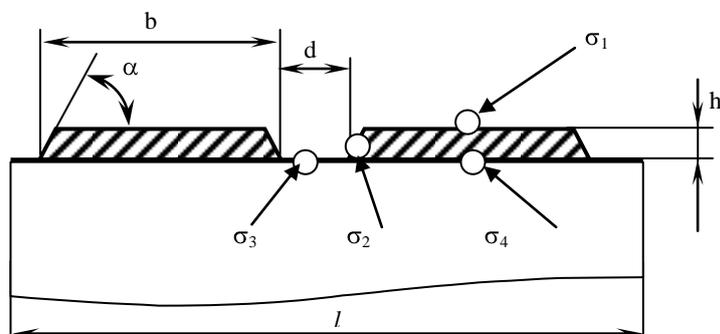


Рис. 5. Схематическое изображение композиции основа – покрытие с изменяемыми параметрами и зонами напряжений:

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

Численные расчеты при моделировании напряженно-деформированного состояния композиции основа – покрытие проводили со следующими физико-механическими свойствами основы: $E = 2$ ГПа, $\nu = 0,25$; покрытия: $E = 1,5$ ГПа, $\nu = 0,3$, где E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона. Осевая распределенная нагрузка составляет 200 МПа. 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]. Поскольку модель имеет ось симметрии, расчет проводили для половины расчетной схемы.

На рисунке 6 представлена конечно-элементная модель композиции основа – покрытие с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу от действия растягивающей силы в направлении главной оси основы. Количество узлов и элементов модели с электроконтактным дискретным покрытием составляет 2865 и 2750 соответственно.

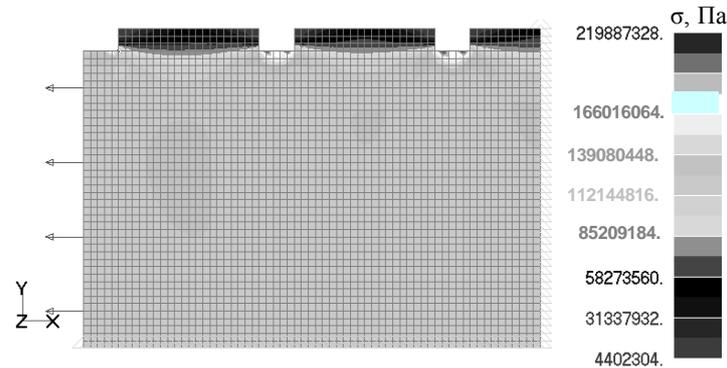


Рис. 6. Напряженно-деформируемое состояние композиции основа – покрытие от действия силового нагружения вдоль оси X с параметрами покрытия: $d = 2,5$ мм, $b = 10$ мм, $h = 1,5$ мм

Анализ полученных данных, исходя из численных расчетов, показал, что оптимальным расстоянием между дискретам является максимально допустимое расстояние для конкретного вида деталей. С уменьшением расстояния между дискретам соответственно растет концентрация напряжений σ_3 (рис. 7).

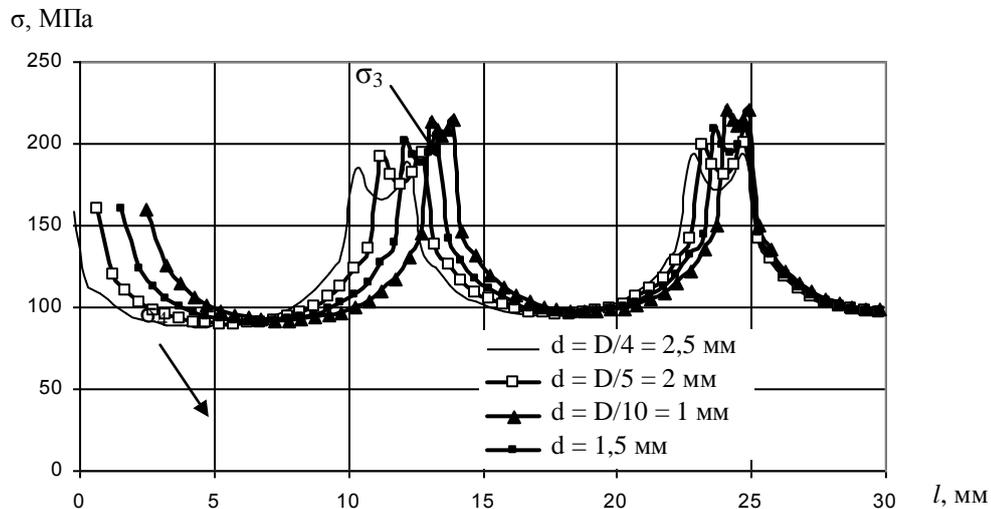


Рис. 7. Характер распределения эквивалентных напряжений σ в основе под покрытием толщиной $h = 1,5$ мм в зависимости от расстояния между дискретам d

Сравнительный график по напряжениям в зоне между дискретам для покрытий различной толщины $h = 0,5$ и $h = 1,5$ представлен на рисунке 8. Для разной толщины покрытий характер снижения напряжений с увеличением междискретного расстояния соблюдается. При различных углах α при прочих равных условиях уровень напряжений был сопоставим. Руководствуясь полученными графиками эквивалентных напряжений в покрытии (рис. 9), можно сделать вывод, что в очень тонком покрытии возникают существенные скачки напряжений σ_2 на его краях в зоне адгезионного контакта покрытия с основой. При таком виде нагружения покрытие с меньшей толщиной явно проигрывает по напряженному состоянию покрытию с большей толщиной. Еще одним преимуществом толстого покрытия является то, что на его краях напряжения возрастают плавно, по сравнению со скачкообразными пиками в тонком покрытии. Пики напряжений на краях тонкого 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).

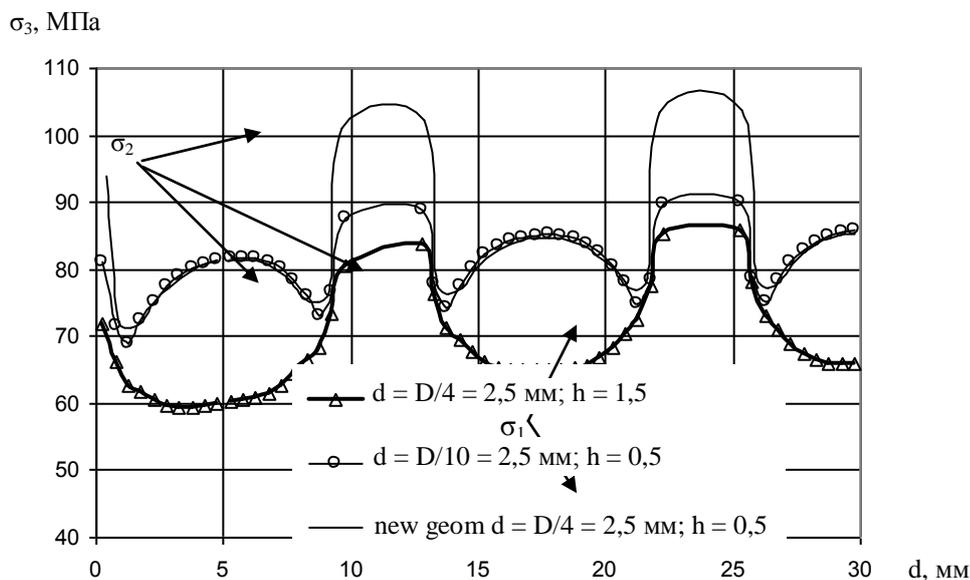


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений в покрытии толщиной $h = 0,5$ и $h = 1,5$ с разным углом α

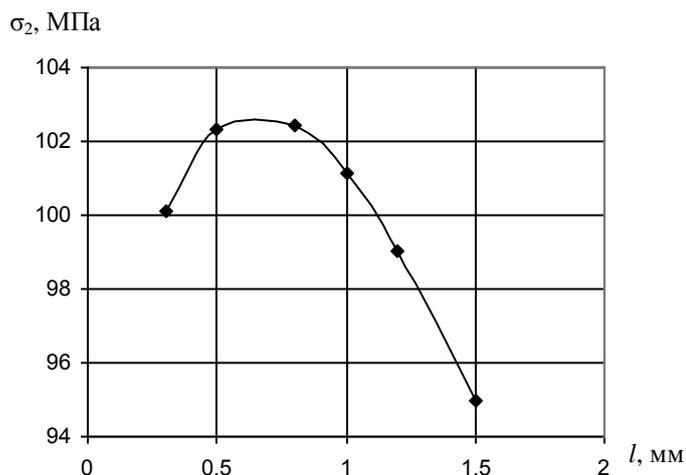


Рис. 9. Эквивалентные напряжения в зоне адгезионного растрескивания при разной толщине покрытия

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

Влияние угла α на распределение эквивалентных напряжений σ_2 в зоне адгезионного разрушения иллюстрирует рисунок 9.

Влияние толщины покрытия h на напряжение σ_3 – на рисунке 10. Анализ зависимости (рис. 10) показывает, что чем толще покрытие, тем значительней становятся напряжения в основе расположенной между дискретами. На рисунке 11 приведено распределение касательных напряжений τ_{xy} по длине основания при расстоянии между дискретами $d = 2$ мм.

В большинстве случаев детали с покрытием, полученным электроконтактным припеканием, работают в условиях действия нормальной нагрузки. Поэтому расчетная схема не претерпела существенных изменений (рис. 12). Количество узлов и элементов расчетной модели при этом осталось неизменным. Угол наклона кромки покрытия изменялся в пределах от 35 до 90° .

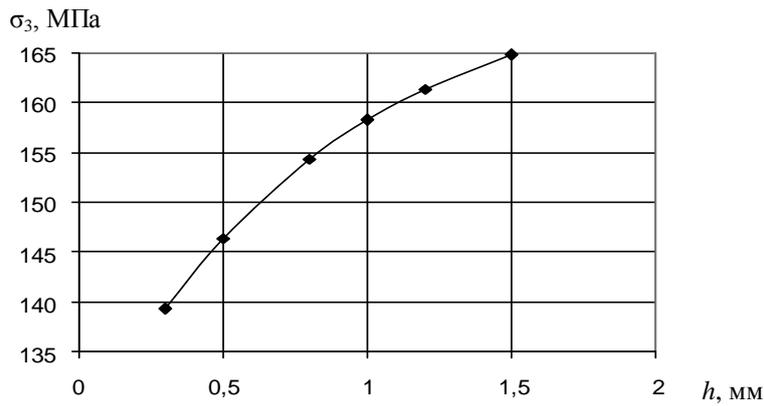


Рис. 10. Напряжения в основе между фрагментами покрытия

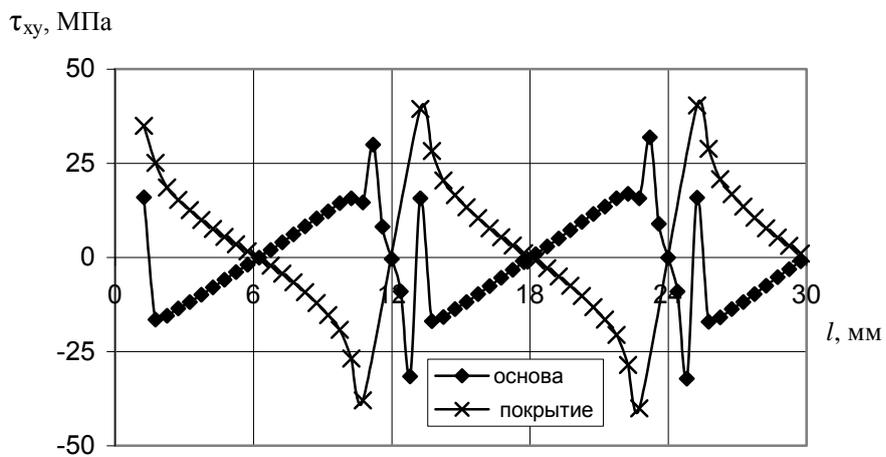


Рис. 11. Распределение касательных напряжений τ_{xy} по длине основания при расстоянии между дискретами $d = 2$ мм

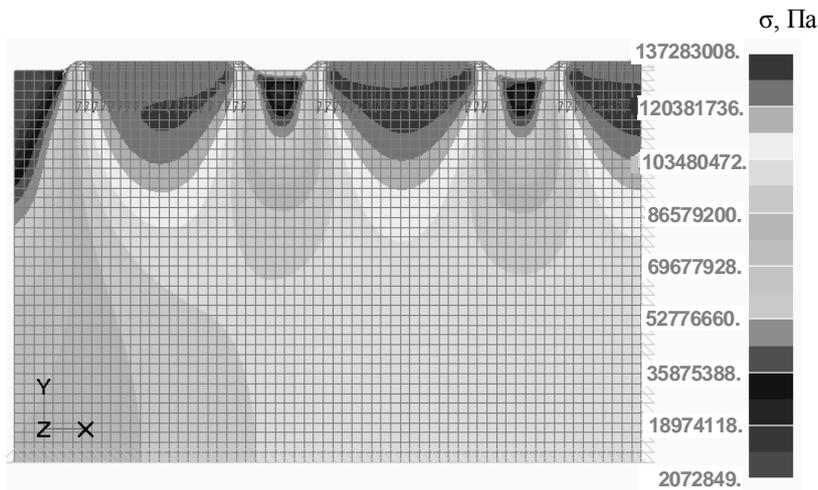


Рис. 12. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в покрытии толщиной $h = 0,5$ мм и углом наклона кромки $\alpha = 35^\circ$ от действия нормальной нагрузки на дискретных участках

Изменение напряжений в междискретной зоне в зависимости от расстояния d приведено на рисунке 13. Сравнение напряжений σ_3 в зоне между дискретами для покрытий различной толщины $h = 0,5$ и $h = 1,5$ мм 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 иллюстрирует рисунок 14. Пересечение на графике кривых 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 кромки покрытия α составляет около 50° .

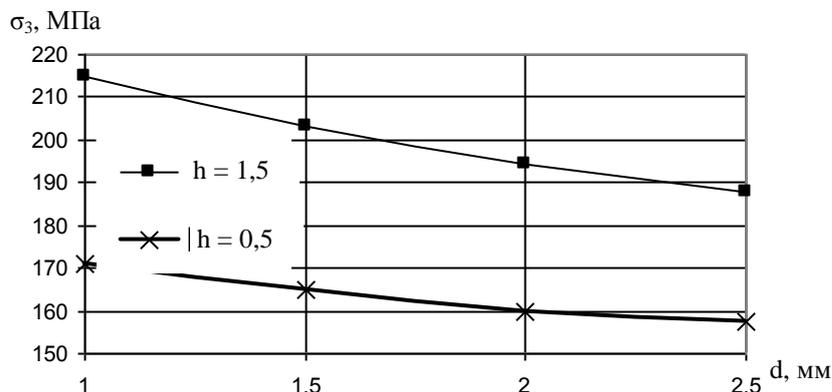


Рис. 13. Зависимость напряжений σ_3 в основе между покрытием от разного междискретного расстояния d

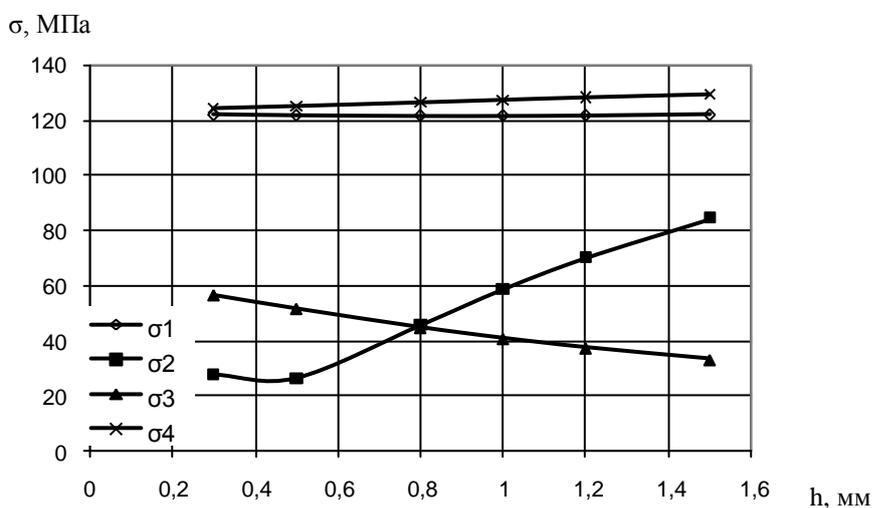


Рис. 14. Зависимость эквивалентных напряжений для основы и покрытия в зависимости от его толщины при $d = 2$ мм

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. 15).

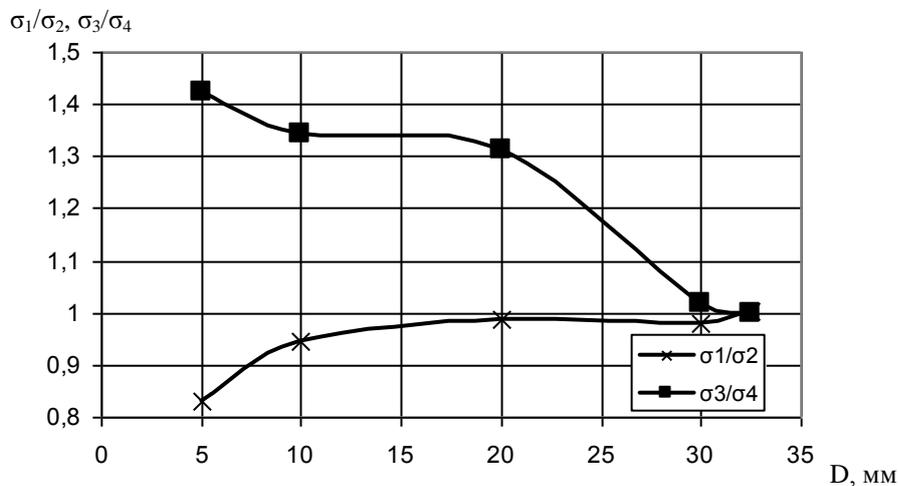


Рис. 15. Соотношение эквивалентных напряжений в покрытии и в основе от размера дискретного участка D , мм

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.

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.

Заключение. 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канарчук, В.С. Электроконтактне зміцнення як метод інженерії поверхні деталей транспортних засобів при їх виготовленні і відновленні Вісник / В.С. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата // Зб. наук. праць транспортного університету та транспортної акад. України. Вип. № 4. – Київ: РВВ НТУ, 2001. – С. 3 – 6.
2. Лопата, Л.А. Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием с силовым активированным сдвигом: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Л.А. Лопата. – Минск, 1987. – 27 с.
3. Красота, М.В. Технологія електроконтактного наварювання порошків з отриманням рівномірних властивостей по перерізу покриття: автореф. ... дис. канд. техн. наук / М.В. Красота. – Київ, 2002. – 20 с.
4. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
5. Шимкович, Д.Г. Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows / Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
6. Электрод для электроконтактного припекания порошків: пат. України 37465А, МКИ В22F 1/00 / Л.А. Лопата, Ф.Й. Златопольський, М.В. Красота; заявл. 14.01.99; опубл. 15.05.2001.
7. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / Б.А. Ляшенко [и др.]. – Киев: ИПП АН УССР, 1984. – 57 с.
8. Ляшенко, Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – № 4. – С. 17 – 25.
9. Способ защиты от коррозии труб теплообменников: а. с. СССР 1256434, С23С 4/00 / С.Ю. Шаривкер, Б.А. Ляшенко, О.В. Цыгулев и др.; опубл. 07.09.86 // Открытия. Изобретения. – 1986. – № 33.

Поступила 26.05.2009

ELECTROCONTACT HEATING DISCRETE COVERINGS

L. LOPATA, V. LYASHENKO, V. KALINICHENKO, A. DUDAN

Reception of wearproof discrete coverings by electrocontact heating is considered. It is shown that drawing of discrete coverings allows to eliminate the phenomenon of regional effect at electrocontact heating of powder materials. Uniform consolidation and heating of a burnt powder layer is thus provided. The received coverings with homogeneous porosity and adhesive durability provide a minimum level of an is intense-deformed condition of a covering under the influence of operational loadings. Designing of a discrete covering with an optimum parity of geometrical parametres allows to provide firmness of designs which work in the conditions of high contact loadings and a friction. Results of researches can be used by working out of technological processes of formation of electrocontact heating coverings at a design stage for the purpose of increase of its reliability and wear resistance.