

В. А. Лебедев, к.т.н., профессор; **И. Д. Кукаркин**, аспирант,
Донской государственный технический университет, Россия.
E-mail: va.lebedev@yandex.ru, ilya.kukarkin@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА НА КАЧЕСТВО ВИБРАЦИОННЫХ МЕХАНОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В работе рассмотрен вопрос обеспечения качества деталей путем нанесения защитных покрытий вибрационным механохимическим способом. Выполнен обзор и анализ работ, в рамках которых исследовалось влияние теплового эффекта на качество механохимических покрытий. Представлена модель расчета адгезионной прочности с учетом теплового эффекта.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, механохимическое покрытие, тепловой эффект, качество покрытия.*

V. A. Lebedev, I. D. Kukarkin

INFLUENCE OF THERMAL EFFECT ON THE QUALITY OF VIBRATING MECHANOCHEMICAL COATINGS

The issue of the article is the quality assurance through the procedure of protective coatings by a vibration mechanochemical method. The article provides information on scientific works in which the authors investigated the influence of the thermal effect on the quality of mechanochemical coatings. A model for calculating the adhesion strength taking into account the thermal effect is presented.

Keywords: *Vibration treatment, mechanochemical coating, thermal effect, coating quality.*

1. Введение

Отличительной особенностью ВиМХП от других способов нанесения покрытий является то, что их формирование происходит в условиях вибрационного ударно импульсного воздействия частиц рабочей среды. В результате динамического воздействия обеспечивается активация химических и физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое, происходит изменение его геометрических и физико-механических характеристик. Основными факторами, определяющими механизм формирования покрытия на поверхности металлов, являются: природа контактирующих материалов и их физико-химические свойства; степень участия металлической основы в образовании покрытия; условия формирования покрытий, обусловленные амплитудно-частотными параметрами виброволнового воздействия, видом и гранулометрическими характеристиками рабочей среды, уровнем создаваемых в зоне контакта динамическими нагрузками. Исходя из этих факторов, предложена классификация ВиМХП, представленная на рис. 1.

Группа 1 – покрытия сформированы на поверхности металла без взаимного проникновения материала покрытия и основного металла. Связь покрытия с металлом происходит на основе механического сцепления. Закономерностью образования такого рода покрытий является воздействие рабочей среды при максимальных режимах обработки. В качестве рабочих сред используют металлические шары различного диаметра.

Группа 2 – покрытия сформированы в результате взаимного структурного взаимодействия материала покрытия и металла детали, обеспечивающего механохимическую связь между ними. Закономерностью формирования данного рода покрытий является совместное воздействие двух видов энергии: механической и химической, одновременно отвечающих за процесс формирования покрытия. Режимы работы оборудо-

вания средние. В качестве рабочих сред используют различные материалы: фарфоровые, стеклянные, керамические, металлические шары.

Группа 3 – покрытия, для которых сам металл является исходным материалом: в результате химического взаимодействия металла с химическими растворами на поверхности формируется соответствующее покрытие. В данном случае механическая составляющая способствует активации процесса. Режимы работы оборудования мягкие, материал рабочих сред – полиэтилен, пластик, стекло.

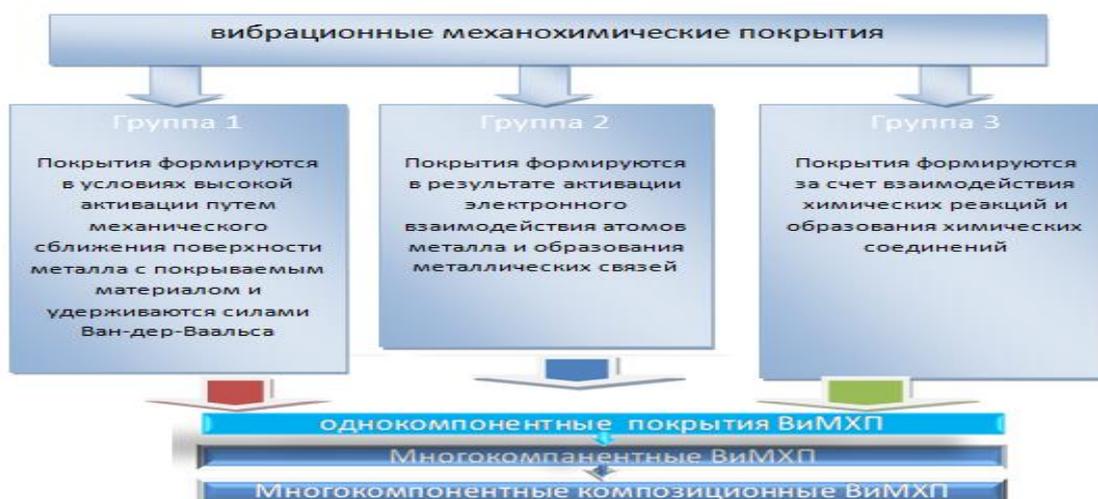


Рисунок 1. Классификация вибрационных механохимических покрытий

Для всех ВиМХП, не зависимо от сложности физико-химических процессов, главным активирующим фактором их протекания является механическая энергия, подводимая в локальную зону поверхности подвергаемой покрытию. В рабочую камеру помещаются обрабатываемые изделия, наносимый материал в виде порошка и рабочая среда: абразивные, металлические, стеклянные, органические и другие материалы, после чего к рабочей камере подводится вибрационное воздействие. Дополнительно могут подводиться тепловая, электромагнитная и другие виды энергии, интенсифицирующие процесс или улучшающие качество обработки. Создаются условия для протекания процессов механической обработки в виде упругопластического деформирования и химических реакции адсорбции, диффузии, адгезии. В процессе обработки детали занимают различное положение в рабочей камере, что обеспечивает равномерную обработку всех участков поверхности.

Процесс нанесения покрытия на обрабатываемую поверхность вибрационной механохимической обработкой (ВиМХО) можно разделить на несколько этапов:

1) активация обрабатываемой поверхности, в ходе которой происходит испарение влаги и выгорание абсорбированных органических соединений, а затем начало образования ювенильных участков;

2) образование первичного слоя, характеризующееся образованием прочных химических связей между основой и частицами среды покрытия под действием механической энергии гранул активирующей среды;

3) наращивание толщины покрытия вследствие соединения частиц среды покрытия с нанесенным слоем сопровождающееся пластическим отеснением, уплотнением и сглаживанием покрытия. При определенной температуре на этой стадии могут

развиваться диффузионные процессы, увеличивающие его толщину и прочность сцепления с основой.

В настоящее время установлены основные закономерности получения ВиМХП, показатели качества которых зависят от ряда технологических факторов: режимы обработки; состояние поверхности обрабатываемых деталей; состав, количество и способ подачи материала покрытий. Существенное влияние на процесс формирования покрытий и их качество оказывают температурные условия, в которых реализуется обработка.

Целью данной работы является изучение влияния теплового эффекта на качество механохимических покрытий.

2. Основная часть

Так, по данным [2], зависимость изменения толщины алюминиевого покрытия от температуры в рабочей камере имеют следующий вид (рис. 2):

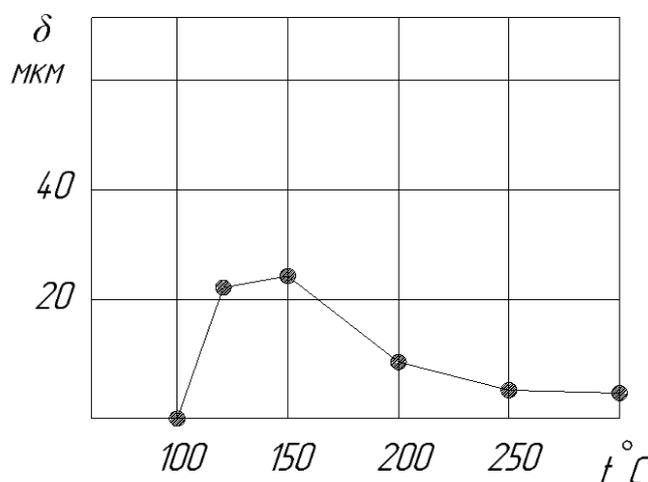


Рисунок 2. Влияние температуры обработки на толщину алюминиевых (■) ВиМХП

Из рисунка 2 следует, минимальная температура, при которой наблюдается эффект нанесения алюминиевого покрытия – 100 °C. При этом отмечается, что светлое алюминиевое покрытие образуется на обрабатываемой поверхности при повышении температуры до 120-150 °C. Температура 230-250 °C не меняет условий образования покрытий, однако поверхность имеет более темный вид. Повышение температуры до 300 °C приводит к получению покрытий серого цвета, которые на воздухе сильно темнеют. Наилучший результат обеспечивается в диапазоне температур 120 – 150 °C.

В работе [3] представлена зависимость влияния температуры на толщину цинковых покрытий в процессе ВиМХО и нанесения традиционным методом (рис. 3).

Цинковое ВиМХП, нанесенное при температуре в рабочей камере 20-150 °C имеет среднюю толщину 3 мкм, при плохой сплошности и высокой пористости. Начиная с температуры 200 °C вследствие образования слоя Fe-Zn сквозная пористость отсутствует, происходит значительный рост толщины покрытия, связанный с диффузионными процессами. Снижение внешней границы температурного режима диффузионного насыщения в цинковых порошковых смесях связано с ударно-импульсным воздействием частиц активирующей среды.

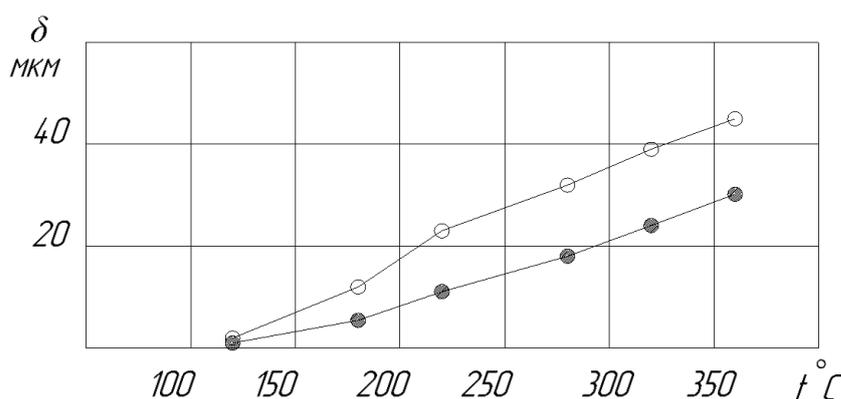


Рисунок 3. Зависимость средних значений толщины цинковых покрытий, полученных методами ВиМХО (□) и традиционным методом цинкования (■) при разных температурах.

При температуре ниже 100°C диффузионный процесс не наблюдается. Начиная от 120°C процесс диффузии протекает медленно, покрытие имеет точечный характер. При 120°C покрытие составляет порядка нескольких мкм. При 180°C - 200°C образуется гладкая, светло-серого цвета покрытие толщиной 10-15 мкм. При температуре 220-250°C толщина покрытия увеличивается до 25 мкм, однако поверхность становится более шероховатой и пористой. При более высокой температуре образуются наплывы, хотя толщина покрытия увеличивается. Таким образом, установлено, что оптимальный температурный диапазон лежит в пределах от 180-250°C.

Сравнительные исследования, представленные на рисунке 3, показали, что при традиционном цинковании диффузионный процесс протекает слабее, покрытие получается неравномерным: в 1,5–2 раза меньше по толщине, чем в процессе ВиМХО. Кроме того, при температуре ниже 100°C диффузионный процесс не наблюдается из-за отсутствия условий для выгорания органических веществ и испарения влаги из обрабатываемой поверхности и частиц порошка.

По данным [2, 3], проиллюстрированных на рисунке 4, сквозная пористость алюминиевого и цинка-алюминиевого ВиМХП зависит от их толщины. Покрытие толщиной менее 5 мкм содержит 10-15 пор на 1 см² своей поверхности, покрытие же, имеющее толщину 15-20 мкм, лишь 2-3 такие поры. На оцинкованной поверхности пористость проявляется лишь у покрытий, полученных при температуре ниже 200 °C. При повышенной температуре из-за образования промежуточного слоя Fe-Zn сквозная пористость отсутствует.

Любое покрытие, наносимое на поверхность материала, можно оценить прочностью ее связи с поверхностью материала-подложки. Таким показателем является адгезия.

Усталостные испытания плоских образцов с радиусом 1,5 мм, покрытых цинком методом ВиМХО при температурах 180-250°C, путём циклического изгиба до появления трещин и отслаиваний показали высокую адгезионную прочность покрытия с основным металлом [3], которая практически совпадает с количеством циклов до разрушения материала образца.

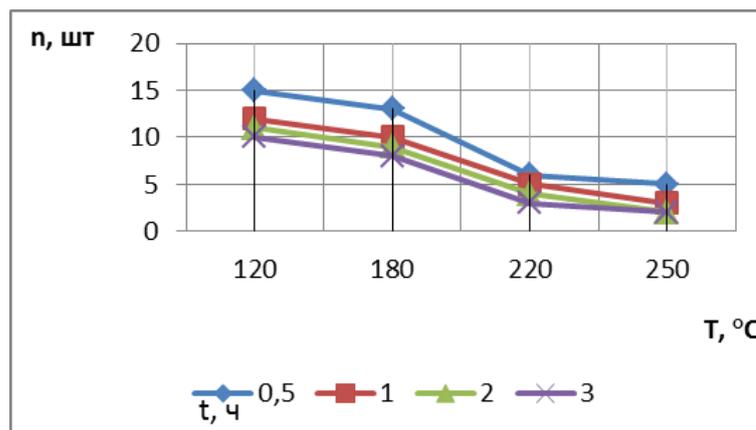


Рисунок 4. Зависимость пористости цинкового ВиМХП от температуры нанесения

Исследования шероховатости цинкового покрытия в процессе ВиМХО, приведённые в работе [3], показали, что изменения температурного режима процесса не оказывает на неё существенного влияния (рисунок 5).

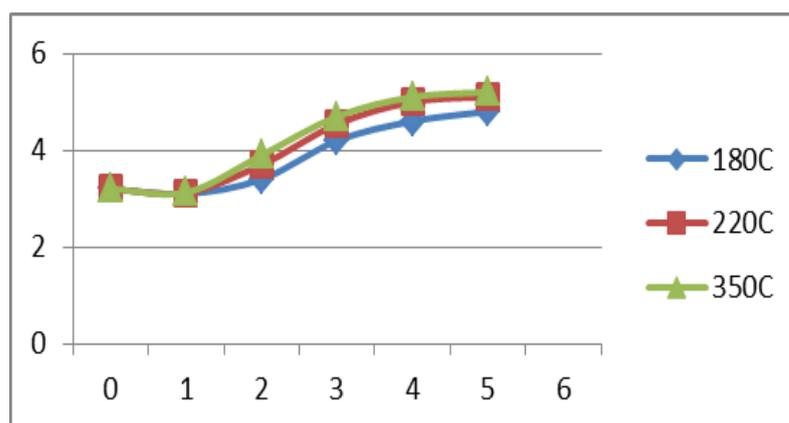


Рисунок 5. Изменение шероховатости цинкового ВиМХП при различной температуре нанесения

3. Выводы

Приведённые результаты исследований позволяют констатировать, что тепловой эффект оказывает существенное влияние на качество покрытий и их эксплуатационные свойства. Доказано, что от температуры в рабочей камере зависит процесс диффузии, влияющий на скорость процесса и, как следствие, на общее время обработки.

Процесс формирования ВиМХП наиболее наглядно получил свое описание в расчетно-аналитической модели технологической системы вибрационной механохимической обработки, обеспечивающей получение покрытия на поверхности материала требуемой по условиям эксплуатации прочности, критерием которой является адгезия (1), в которой первое слагаемое учитывает вклад в неё теплового эффекта, определяющего повышения связанной энергии за счет роста энтропии; второе слагаемое – энергии упругопластических искажений кристаллической решетки в результате механического воздействия инденторов рабочей среды; третье слагаемое – изменение внутренней

энергии поверхностного слоя, модифицированного в результате химического взаимодействия контактирующих сред.

$$E_a = RhT \ln \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) + 10^{-6} V_m \left(\frac{\sigma_{\Sigma}^2}{2E} + K_a \sigma_{\Sigma} \frac{d}{D} \right) - \Delta G^0, \quad (1)$$

где: E_a – средняя энергия единицы связи, обеспечивающей адгезию модифицированного путем химико-механического синтеза локального микрообъема на границе раздела контактирующих сред;

R – постоянная Больцмана;

h – толщина ВиМХП;

T – температура процесса ВиМХО;

τ – время пребывания системы в состоянии механохимического синтеза;

τ_0 – период тепловых колебаний атомов.

V_m – молярный объем;

σ_{Σ} – эффективное напряжение;

E – модуль упругости;

K_a – коэффициента аккумуляирования механической энергии, который показывает долю запасаемой энергии относительно всей затраченной работы ($K_a = 0,2...0,3$);

d – диаметр пластического отпечатка;

D – диаметр индентора рабочей среды;

ΔG^0 – изменение свободной энергии Гиббса.

Следует учитывать, что изменение температуры процесса оказывает влияние на изменение всех слагаемых модели (1) за счет: изменения кинетической энергии движения молекул и как следствие характеристик материала детали и скорости химических реакций, определяющих в итоге адгезионную прочность покрытия, его качественные характеристики, а также производительность процесса нанесения ВиМХП.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иванов, В.В. Процессы и методология создания поверхностных слоев высоко-ресурсных изделий путем вибрационного формирования покрытий комбинированным химико-механическим воздействием. [Текст]: дис. ... д.т.н: 05.02.07. – Ростов-н/Д, 2017.

2. Анкудимов, Ю. П. Разработка комбинированного процесса вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей (в интервале температур 20-350 °С). [Текст]: дис. ... к.т.н: 05.02.08. – Ростов-н/Д, 1983.

3. Калмыкова Н.А. Разработка и исследование комбинированного процесса вибрационной механо-химико-термической обработки деталей (на примере образования цинкового покрытия). [Текст]: дис. ... к.т.н: 05.02.08. – Ростов-н/Д, 2005.

4. Энергетическое условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности [Текст] / Лебедев В.А., Иванов В.В., Штынь С.Ю., Давыдова И.В. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 8. – С. 34-39

Поступила в редколлегию 20.01.2022 г.