

К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок

КИНЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТА МЕЖДУ ПОРОШКОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ И ОСНОВОЙ

Рассмотрены закономерности формирования контакта между порошковым покрытием и подложкой при горячей обработке давлением, в том числе при центробежном индукционном методе нанесения покрытий. Получено уравнение кинетики формирования контакта в процессе припекания порошкового покрытия к подложке. Использование соотношений теории ползучести пористых материалов (в данном случае теории течения) позволило получить уравнение, связывающее кинетику формирования контакта с кинетикой роста сцепления между покрытием и подложкой.

Ключевые слова: кинетика, контакт, формирование, порошковое покрытие, горячая обработка давлением, центробежный индукционный метод, адгезия, теория течения.

Введение. Работоспособность деталей с покрытиями зависит от адгезионной прочности, которая, в свою очередь, пропорциональна реальной площади контакта между поверхностью детали и покрытием.

В ряде случаев адгезионная прочность оказывается недостаточной для обеспечения требуемой работоспособности композита. Повышению адгезионной прочности способствует увеличение интенсивности термосилового взаимодействия частиц порошка и подложки как в процессе формирования покрытий, так и при проведении последующей термо- и термомеханической обработки. Следует, однако, отметить, что объёмная термообработка покрытий в ряде случаев является нежелательной, поскольку при этом могут ухудшаться их физико-механические свойства. Применение термомеханической обработки предварительно сформированных покрытий (например, нанесённых газотермическим напылением) позволяет повысить прочность сцепления покрытия с основой при максимальном сохранении исходной структуры и свойств порошка [1].

В статье рассмотрены закономерности формирования контакта между порошковым покрытием и подложкой при горячей обработке давлением, в том числе при центробежном индукционном припекании.

Кинетика формирования контакта между порошковыми покрытиями и основой. Уравнение кинетики формирования контакта между покрытием и основой при горячем прессовании было получено М.С. Ковальченко и В.А. Мартыновым в работе [2] путем рассмотрения припекания под давлением сферических частиц

Белявин Климентий Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Машины и технология обработки металлов давлением» им. С.И. Губкина БНТУ (Минск).

Адрес для корреспонденции: пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь; e-mail: dz-m@tut.by

Сосновский Игорь Александрович, ст. науч. сотрудник Объединённого института машиностроения НАН Беларуси (Минск).

Адрес для корреспонденции: ул. Академическая, 12, 220072, г. Минск, Беларусь; e-mail: sos3@tut.by

Гафо Юрий Натанович, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник Объединённого института машиностроения НАН Беларуси (Минск).

Адрес для корреспонденции: ул. Академическая, 12, 220072, г. Минск, Беларусь; e-mail: sos3@tut.by

Белоцерковский Марат Артёмович, д-р техн. наук, доц., зав. лабораторией «Газотермические методы упрочнения деталей машин» Объединённого института машиностроения НАН Беларуси (Минск).

Адрес для корреспонденции: ул. Академическая, 12, 220072, г. Минск, Беларусь; e-mail: mbelotser@gmail.com.by

Курилёнок Артём Александрович, инженер-механик Объединённого института машиностроения НАН Беларуси (Минск).

Адрес для корреспонденции: ул. Академическая, 12, 220072, г. Минск, Беларусь; e-mail: AKTO13@mail.ru

порошкового слоя одинакового радиуса, равномерно распределенных по ровной поверхности подложки. Однако это уравнение пригодно только для начальной стадии формирования контакта и не описывает связь между процессами уплотнения и роста площади контакта.

Рассмотрим процесс деформирования сферической частицы радиусом R , прижимаемой к плоскости силой F .

При упругой деформации частицы радиус площадки контакта определяется из выражения (задача Герца [3])

$$r = \sqrt[3]{\frac{3(1-\nu^2)RF}{2E}} \quad (1)$$

или

$$r = \frac{3(1-\nu^2)\pi RP_k}{2E}, \quad (2)$$

где

$$P_k = \frac{F}{\pi r^2}, \quad (3)$$

P_k – среднее нормальное давление на площадке контакта; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Так как формула (2) получена в предположении, что деформации малы, то, воспользовавшись гидродинамической аналогией [4] и заменяя при выводе этой формулы смещения на скорости смещений, а упругие модули на их гидродинамические аналоги, можно получить

$$\dot{r} = \frac{3(1-\nu^2)R\pi P_k}{2\tilde{E}}, \quad (4)$$

где \tilde{E} – коэффициент вязкости при растяжении, являющийся вязким аналогом модуля Юнга; $\tilde{\nu}$ – коэффициент поперечного течения, являющийся вязким аналогом коэффициента Пуассона.

Если частица не содержит пор, то в соответствии с нашим предположением о несжимаемости твердой фазы $\tilde{\nu} = 0,5$. Для определения \tilde{E} рассмотрим деформацию пористого тела при одноосном сжатии.

Как известно из закона Гука, связь между упругими постоянными μ , E и ν определяется формулой [3]

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (5)$$

Соответственно, на основании гидродинамической аналогии связь между их вязкими аналогами имеет вид

$$\eta = \frac{\tilde{E}}{2(1+\tilde{\nu})}, \quad (6)$$

где η – коэффициент сдвиговой вязкости.

Отсюда при $\tilde{\nu} = 0,5$

$$\tilde{E} = 3\eta_k, \quad (7)$$

где η_k – коэффициент сдвиговой вязкости твердой фазы.

При использовании феноменологической теории ползучести в варианте теории течения

$$\eta_k = B(t) \dot{\gamma}_i^{m-1}, \quad (8)$$

где $\dot{\gamma}_i$ – интенсивность скоростей деформации сдвига, а

$$B(t) = 2^{-m} 3^{\frac{3-m}{2}} A_0 t^e. \quad (9)$$

При этом связь между интенсивностью касательных напряжений τ_i и интенсивностью скоростей деформации сдвига $\dot{\gamma}_i$ имеет вид

$$\tau_i = B(t) \dot{\gamma}_i^m. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (8), получим

$$\eta_k = B^m(t) \tau_i^{1-\frac{1}{m}}. \quad (11)$$

Интенсивность касательных напряжений определяются известной формулой

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (12)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – главные напряжения.

Учитывая, что при одноосной деформации $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, получим

$$\tau_i = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}} = \frac{P_k}{\sqrt{3}}. \quad (13)$$

Таким образом, из формул (7), (11) и (13) следует, что коэффициент вязкости при растяжении для твердой фазы \tilde{E} определяется соотношением

$$\tilde{E} = \sqrt{3} B^m(t) P_k^{1-\frac{1}{m}}, \quad (14)$$

С учетом (14) выражение (4) при $\tilde{\nu} = 0,5$ принимает вид

$$\dot{r} = \frac{3\sqrt{3}}{8} \pi R \left[\frac{P_k}{B(t)} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (15)$$

Если предположить, как в [2], что с поверхностью подложки контактируют равномерно распределенные по ней частицы одинакового радиуса, то усилие прижатия частицы к подложке связано с давлением в процессе припекания P соотношением

$$F = \frac{PS}{z}, \quad (16)$$

где S – площадь поверхности подложки; z – количество контактирующих с ней частиц.

Тогда, подставляя (16) в (3), получим формулу, связывающую давление в процессе припекания со средним нормальным давлением на площадке контакта:

$$P_k = \frac{PS}{\pi r^2 z}. \quad (17)$$

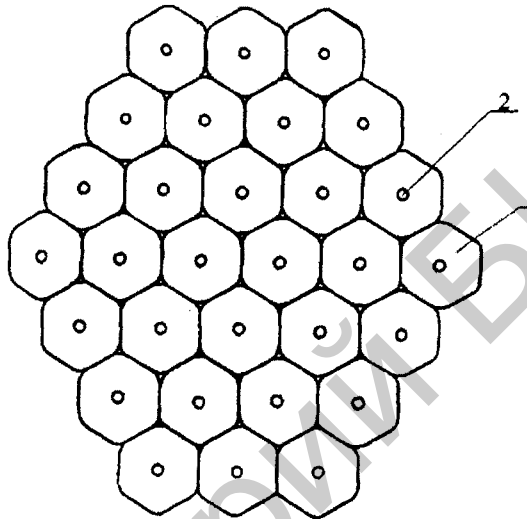
Если теперь подставить (14), (16), (17) в выражение (4) и проинтегрировать его, учитывая, что $\tilde{\nu} = 0,5$, то можно получить формулу для определения радиуса контактной площадки

$$r = \left(\frac{2}{m} + 1 \right) \left[\frac{3\sqrt{3}}{8} \pi R \left(\frac{S}{\pi z} \right)^{\frac{1}{m}} \int_0^t \left(\frac{P}{B} \right)^{\frac{1}{m}} dt \right]^{\frac{m}{m+2}}. \quad (18)$$

Площадь контактной площадки S_k определяется из выражения

$$S_k = \pi r^2 = \pi \left(\frac{2}{m} + 1 \right)^2 \left[\frac{3\sqrt{3}}{8} \pi R \left(\frac{S}{\pi z} \right)^{\frac{1}{m}} \int_0^t \left(\frac{P}{B} \right)^{\frac{1}{m}} dt \right]^{\frac{2m}{m+2}}. \quad (19)$$

Слой частиц, равномерно распределенных по поверхности подложки, можно рассматривать как плотную упаковку одинаковых правильных шестиугольных призм, в каждую из которых вписана сфера, имеющая круговую площадку контакта с подложкой [5] (рисунок 1).



Пояснения: 1 – частицы порошка; 2 – площадки контакта.

Рисунок 1 – Модель расположения частиц порошка на поверхности подложки (вид со стороны подложки)

Площадь основания призм S_6 связана с площадью поверхности подложки и радиусом частиц соотношениями

$$S_6 = \frac{S}{z} = 2\sqrt{3}R^2. \quad (20)$$

Следовательно, относительная площадь контакта порошкового слоя с подложкой $S_{\text{отн}}$ определяются из выражения

$$S_{\text{отн}} = \frac{S_k}{S_6} = \pi \left(\frac{2}{m} + 1 \right)^2 \left[\frac{3\sqrt{3}}{8} \pi R \left(\frac{2\sqrt{3}R^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{m}} \int_0^t \left(\frac{P}{B} \right)^{\frac{1}{m}} dt \right]^{\frac{m}{m+2}}. \quad (21)$$

Уравнения (18), (19) и (21) при $P = \text{const}$ довольно близки к уравнениям кинетики формирования контакта, полученным М.С. Ковальченко и В.А. Мартыновым для случая прилипания частицы к подложке [2] и Я.Е. Гегузиным для случая прилипания частиц друг к другу [6]. Однако они пригодны только для начальной стадии роста контактов, поскольку, как показывает анализ соотношения (21), $S_{\text{отн}} \rightarrow \infty$ при $P \rightarrow \infty$ и при $t \rightarrow \infty$, в то время как должно быть: $S_{\text{отн}} \rightarrow 1$.

Так как нам известно, что на начальной стадии процесса прилипания кинетика формирования контакта описывается уравнением (21), а в дальнейшем скорость увеличения площади контакта затухает [1], и $S_{\text{отн}} \rightarrow 1$ при $t \rightarrow \infty$, то кинетику роста

контакта на протяжении всего процесса припекания порошкового покрытия можно приближенно аппроксимировать зависимостью экспоненциального типа (как, например, это предложено в работе [7])

$$S_{\text{отн}} = \left\{ 1 - \exp \left[-\pi \left(\frac{2}{m} + 1 \right)^2 \frac{3\sqrt{3}}{8} \pi R \left(\frac{2\sqrt{3}R^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{m}} \int_0^t \left(\frac{P}{B} \right)^{\frac{1}{m}} dt \right] \right\}^{\frac{m}{m+2}} \quad (22)$$

Уравнение (22) на начальной стадии процесса припекания сходится к уравнению (21), что можно показать, если разложить его в ряд по степеням интегрального выражения под знаком экспоненты и пренебречь всеми членами, начиная со второго порядка, как слишком малыми. Это уравнение близко по характеру зависимости к выведенному В.В. Скороходом [4] уравнению кинетики роста межчастичного контакта при спекании частиц металлического порошка под действием сил поверхностного натяжения.

Значение величины давления центробежных сил на поверхности детали $P = P_0$ определяется уравнениями (18), (19) или (21). Подставляя значения контактного давления в формулу (22), можно получить уравнение кинетики изменения площади относительно контакта.

Если площадь контакта не изменяется во времени, то прочность сцепления $\sigma_{\text{сц}}$ связана с прочностью соединения материалов покрытия и подложки в зоне контакта σ_c соотношением

$$\sigma_{\text{сц}} = \sigma_c S_{\text{отн}}. \quad (23)$$

Однако, поскольку и $S_{\text{отн}}$ и σ_c в процессе припекания увеличиваются, для нашего случая данное соотношение не пригодно.

Предположим, что площадь контакта увеличивается ступенчато в моменты $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$. Тогда прочность сцепления в момент $t > \tau_k$ определим из выражения

$$\sigma_{\text{сц}}(t) = \Delta S_{\text{отн}}(\tau_k) \sigma_c(t - \tau_1) + \Delta S_{\text{отн}}(\tau_2) \sigma_c(t - \tau_2) + \dots + \Delta S_{\text{отн}}(\tau_k) \sigma_c(t - \tau_k), \quad (24)$$

т.е. каждая из элементарных площадей контакта, сформировавшихся в моменты τ_k ($k = 1, 2, 3, \dots, k$), вносит свой вклад в величину прочности сцепления покрытия с подложкой, наблюдаемую в момент $t > \tau_k$. Этот вклад определяется соответствующим слагаемым этой суммы. В случае не ступенчатого, а плавного увеличения площади контакта суммирование можно заменить интегрированием:

$$\sigma_{\text{сц}}(t) = \int_0^t \sigma_c(t - \tau) dS_{\text{отн}}(\tau), \quad (25)$$

Проинтегрировав правую часть уравнения (24) по частям, получим формулу для расчета кинетики роста прочности сцепления

$$\sigma_{\text{сц}}(t) = \int_0^t \sigma_c(t - \tau) S_{\text{отн}}(\tau) dt, \quad (26)$$

где $S_{\text{отн}}(t)$ определяется из уравнения (22), а скорость роста прочности соединения материалов покрытия и подложки в зоне контакта $\dot{\sigma}_c(t)$ может быть найдена, например, по методике, предложенной Э.С. Каракозовым [8].

Выводы. Таким образом, на основе рассмотрения модели формирования единичного контакта было получено уравнение (22) кинетики формирования контакта в процессе припекания порошкового покрытия к подложке. Использование соотношений теории ползучести пористых материалов (в данном случае теории течения) позволило получить уравнение (26), связывающее кинетику формирования

контакта с кинетикой роста сцепления между покрытием и подложкой. Как следует из соотношения (26), кинетика роста адгезионной прочности и кинетика роста площади контакта связаны между собой нелинейной зависимостью, причем адгезионная прочность в значительной степени зависит от скорости ее роста. В свою очередь, соединение материалов покрытия и подложки в зоне контакта обусловлено контактными явлениями на границе раздела. В связи с этим весьма важным представляется развитие экспериментальных методов оценки параметров адгезионной связи компонентов, вступающих во взаимодействие. Сочетание теоретического и экспериментального подходов при анализе процессов формирования адгезионной связи между покрытием и подложкой открывает новые возможности на пути совершенствования технологических процессов получения защитных покрытий и повышения их физико-механических и эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гафо, Ю.Н. Теоретические основы выбора технологических параметров центробежного индукционного припекания / Ю.Н. Гафо, А.А. Радченко, И.А. Сосновский // Перспективные технологии / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : Изд-во ВГТУ, 2011. – Гл. 16. – С. 363–396.
2. Ковальченко, М.С. Кинетика образования соединения порошкового слоя со стальной подложкой при горячем прессовании / М.С. Ковальченко, В.А. Мартынов // Порошковая металлургия. – 1979. – № 8. – С. 49–53.
3. Демидов, А.П. Теория упругости / А.П. Демидов. – М. : Высш. шк., 1979. – 432 с.
4. Скороход, В.В. Реологическая теория спекания / В.В. Скороход. – Киев : Наукова думка, 1972. – 151 с.
5. Шлыков, Ю.П. Контактное термическое сопротивление / Ю.П. Шлыков, Е.А. Ганин, С.Н. Царевский. – М. : Энергия, 1977. – 328 с.
6. Гегузин, Я.Е. Физика спекания / Я.Е. Гегузин. – М. : Наука, 1984. – 312 с.
7. Кочергин, А.П. Сварка давлением / А.П. Кочергин. – М. : Машиностроение, 1972. – 216 с.
8. Каракозов, Э.С. Соединение металлов в твердой фазе / Э.С. Каракозов. – М. : Металлургия, 1976. – 264 с.

Поступила в редакцию 11.04.13.

Regularity of formation of contact between a powdered coating and a substrate at a hot pressure-treat, including, at a coating deposition by centrifugal induction method is observed. Kinetics equation of contact formation in process of powder coating sintering up on substrate is gained. Use of relationships of the porous materials creep theory (in this case flow theory) allow to get the equation connecting kinetics of contact formation with kinetics of adhesion growth between a coating and substrate.

Keywords: kinetic, contact, formation, powdered coating, hot pressure-treat, centrifugal induction method, adhesion, flow theory.

