

УДК 621.793

¹ М. А. Белоцерковский, д-р техн. наук, доцент, ¹И. А. Сосновский,²К. Е. Белявин, д-р техн. наук, проф., ¹А. А. Курилёнок, канд. техн. наук¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,

Тел.: +375 17 284-28-63, факс: +375 17 284-08-90, E-mail: mbelotser@gmail.com;

² Белорусский национальный технический университет, Минск, РБ,

Тел.: +375 17 293-95-18, факс: 296-67-85, E-mail: dz-m@tut.by

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕЖДУ НАНОСИМЫМ ПОКРЫТИЕМ И ОСНОВОЙ

Рассмотрены закономерности формирования контактной прочности между наносимым покрытием и подложкой при горячей обработке давлением, в том числе, при центробежной индукционной наплавке покрытий. Получено уравнение кинетики формирования контакта в процессе наплавки наносимого покрытия на подложку. Также получено уравнение, связывающее кинетику формирования контакта с кинетикой роста сцепления между покрытием и подложкой с использованием соотношений теории ползучести пористых материалов (в данном случае теории течения).

Ключевые слова: контактная прочность, покрытия, основа, наплавка, кинетика формирования контакта, кинетика роста сцепления.

M. A. Belotserkovsky, I. A. Sosnovsky, K. E. Belyavin, A. A. Kurilyonok

THEORETICAL ASPECTS OF THE PROCESS OF FORMING THE CONTACT STRENGTH BETWEEN THE APPLIED COATING AND SUBSTRATE

The regularities of the formation of contact strength between the coating and the substrate during hot pressure treatment, including centrifugal induction surfacing coatings. The equation of kinetics of contact formation in the process of surfacing of the coating on the substrate is obtained. An equation relating the kinetics of contact formation to the kinetics of adhesion growth between the coating and the substrate using the relations of the theory of creep of porous materials (in this case, the theory of flow) is also obtained.

Keywords: contact strength, coatings, base, surfacing, contact formation kinetics, adhesion growth kinetics.

1. Введение

Работоспособность деталей с покрытиями зависит от адгезионной прочности, которая, в свою очередь, пропорциональна реальной площади контакта между поверхностью детали и покрытием [1-3].

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 объемная термообработка покрытий в ряде случаев является нежелательной, поскольку при этом могут ухудшаться его физико-механические свойства. Применение термомеханической обработки предварительно сформованных покрытий (например, нанесенных газотермическим напылением) позволяет повысить прочность сцепления покрытия с основой при максимальном сохранении исходной структуры и свойств порошка [4].

В настоящей статье рассмотрены закономерности формирования контакта между порошковым покрытием и подложкой при горячей обработке давлением, в том числе, при формировании покрытий центробежным индукционным методом.

2. Кинетика формирования контакта между порошковыми покрытиями и основой

Уравнение кинетики формирования контакта между покрытием и основой при горячем прессовании было получено в работе [5] путем рассмотрения формирования под давлением сферических частиц 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 [6]):

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

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 [7] и заменяя при выводе этой формулы смещения на скорости смещений, а упругие модули на их гидродинамические аналоги, можно получить:

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

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 [6]:

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

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 $\tilde{\nu} = 0,5$

$$\tilde{E} = 3\eta_{\kappa} \quad (7)$$

где η_{κ} – коэффициент сдвиговой вязкости твердой фазы.

При использовании феноменологической теории ползучести в варианте теории течения

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

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:

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

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:

$$\tau_i = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

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

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

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

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

Если предположить, как в [5], что с поверхностью подложки контактируют равномерно распределенные по ней частицы одинакового радиуса, то усилие прижатия частицы к подложке связано с давлением в процессе наплавки 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 наплавки 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 [8] (рисунок 1).

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

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

и, следовательно, относительная площадь контакта порошкового слоя с подложкой $S_{отн}$ определяется из выражения:

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

Уравнения (18), (19) и (21) при $P = const$ довольно близки к уравнениям кинетики формирования контакта, полученным для случая припекания частицы к подложке [5] и для случая припекания частицы друг к другу [9]. Однако, они пригодны только для начальной стадии роста контактов, поскольку, как показывает анализ соотношения (21), $S_{отн} \rightarrow \infty$ при $P \rightarrow \infty$ и при $t \rightarrow \infty$, в то время как должно быть: $S_{отн} \rightarrow 1$.

Так как нам известно, что на начальной стадии процесса наплавки кинетика формирования контакта описывается уравнением (21), а в дальнейшем скорость увеличения площади контакта затухает [1], и $S_{отн} \rightarrow 1$ при $t \rightarrow \infty$, то кинетику роста контакта на протяжении всего процесса формирования порошкового покрытия можно приближенно аппроксимировать зависимостью экспоненциального типа (как, например, это предлагается в работе [10]):

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

Уравнение (22) на начальной стадии процесса формирования покрытия 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 уравнению кинетики роста межчастичного контакта при спекании частиц металлического порошка под действием сил поверхностного натяжения, выведенному в работе [7].

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 $\sigma_{сц}$ связана с прочностью соединения материалов покрытия и подложки в зоне контакта σ_c соотношением:

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

Однако, поскольку и $S_{отн}$ и σ_c в процессе наплавки увеличиваются, для нашего случая оно не пригодно.

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

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

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:

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

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

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

где $S_{отн}(t)$ 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, описанной в работе [11].

3. Заключение

Таким образом, на основе рассмотрения модели формирования единичного контакта было получено уравнение (22) кинетики формирования контакта в процессе наплавки порошкового покрытия на подложку. 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 подхода 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.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белявин, К. Е. Индукционное упрочнение быстроизнашивающихся деталей узлов трения порошковыми покрытиями / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей // Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. Т. 1: под ред. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – Гл. 15. – С. 272 – 290.
2. Сосновский, И. А. Индукционная наплавка покрытий из металломатричных композитов с использованием системы параметрической стабилизации технологических режимов / И. А. Сосновский, М. А. Белоцерковский, А. А. Куриленок, О.О. Кузнечик // Актуальные вопросы машиноведения; сборник научных трудов Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Вып. 6. – Минск, 2017. – С. 201-206.
3. Белявин, К. Е. К вопросу формирования контакта между порошковым покрытием и основой / К. Е. Белявин, М. А. Белоцерковский, И. А. Сосновский // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка – Powder Metallurgy: Surface Engineering, New Powder Composite materials. Welding: сборник докладов 11-го Междунар. симп. (Минск, 10-12 апр. 2019 г.). В 2 ч. Ч. 2 / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2019. – С. 21–29.
4. Гафо, Ю. Н. Теоретические основы выбора технологических параметров центробежного индукционного припекания / Ю. Н. Гафо, А. А. Радченко, И. А. Сосновский // Перспективные технологии: под редакцией В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – Гл.16. – С. 363–396.
5. Ковальченко, М. С. Кинетика образования соединения порошкового слоя со стальной подложкой при горячем прессовании / М. С. Ковальченко, В. А. Мартынов. – Порошковая металлургия, № 8, 1979. – С. 49–53.
6. Демидов, А. П. Теория упругости / А. П. Демидов. – М.: Высшая школа, 1979. – 432 с.
7. Скороход, В. В. Реологическая теория спекания / В. В. Скороход. – Киев: Наукова думка, 1972. – 151 с.
8. Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
9. Гегузин, Я. Е. Физика спекания / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
10. Кочергин, А. П. Сварка давлением / А. П. Кочергин. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
11. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.

Поступила в редколлегию 10.04.2019 г.