

1. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию / Тененбаум М. М. — М. : Машиностроение, 1976. — 271 с.
2. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Мушик Э., Мюллер П. : [пер. с нем.]. — М. : Мир, 1990. — 208 с.
3. Воробьев Н. Н. Теория игр для экономистов-кибернетиков / Воробьев Н. Н. — М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 272 с.
4. Черноруцкий И. Г. Методы принятия решений / Черноруцкий И. Г. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 416 с. : ил.
5. Трухаев Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределённости / Трухаев Р. И. — М. : Наука, 1981. — 258 с.
6. Романюк В. В. Мінімаксний підхід у реалізації стохастичного параметра з невідомим імовірнісним розподілом на інтервалі ненульової міри / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2010. — № 3. — С. 65 — 71.
7. Романюк В. В. Використання мінімаксного принципу у прогнозованому контролі корпусного ядерного реактора для оптимізації процедури мінімізації помилки / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2010. — № 5. — С. 161 — 165.
8. Romanuke V. V. Adjusting the neuron transfer function with symmetric kernel matrix game / V. V. Romanuke // V International Conference on Optoelectronic Information Technologies “Photonics — ODS 2010”, September 28 — 30, 2010, Vinnytsya: abstracts. — Vinnytsya : VNTU, 2010. — P. 61.
9. Ашманов С. А. Линейное программирование : [учебное пособие для студ. вузов] / С. А. Ашманов. — М. : Наука, 1981. — 340 с.
10. Банди Б. Основы линейного программирования / Банди Б. ; [пер. с англ.]. — М. : Радио и связь, 1989. — 176 с.

Надійшла 15.5.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Рудницький В.Б.

УДК 687. 021

С.В. ПЕТЕГЕРИЧ, І.А. МАНДЗЮК, Г.Б. ПАРАСКА

Хмельницький національний університет

В.П. МІСЯЦЬ, М.П. БЕРЕЗНЕНКО

Київський національний університет технологій та дизайну

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОЛІМЕРНИХ ПОКРИТТІВ ГАЗОДИНАМІЧНИМ ПОТОКОМ

Запропонована математична модель енергетичних процесів при формуванні полімерних покриттів газодинамічним методом. Описано фізичну суть енергетичних процесів та запропоновано напрями для оптимізації процесів формування полімерних покриттів.

The mathematical model of energy processes in the formation of polymer coatings of gas-dynamic method. We describe the physical nature of energy processes and suggests ways to optimize the processes of formation of polymer coatings.

Ключові слова: полімерне покриття, газодинамічний потік.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Викладені основи закономірностей механізму формування поверхневих покриттів, отриманих газодинамічним методом. Суть газодинамічного методу синтезу покриттів полягає в тому, що покриття наносяться в результаті зіткнення високошвидкісних гетерогенних потоків з основою. Зіткнення частинок порошку, які мають високу кінетичну енергію, з основою призводить до їх взаємної зсувної деформації, активізації зв'язаних поверхонь, фізичної взаємодії за рахунок високого напірного тиску і значного підвищення температури в зоні удару. Це забезпечує високий рівень адгезійних і когезійних властивостей покриття. У місцях удару часток реалізуються процеси високошвидкісної пружної і пластичної деформації, адіабатичне перетворення механічної енергії в теплоту, її дисипація, дифузія, а також можливі фазові і структурні зміни [1–3].

Постановка завдання

Однією з найбільш важливих характеристик покриттів є їх адгезія і когезія. Аналіз експериментальних досліджень, а також ряду публікацій [1–3] дозволив встановити, що при формуванні покриттів утворюються хімічні і механічні зв'язки. Математична модель цього процесу може бути з достатньою точністю представлена рівнянням хімічної кінетики у вигляді [1]:

$$\frac{dN}{dt} = (N_0 - N) \cdot v \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_k}\right), \quad (1)$$

де T_k – температура в зоні контакту, N_0 – загальне число атомів в зоні контакту, N – число атомів, що вступили в хімічний зв'язок, v – частота власних коливань атомів ($v \approx 10^{13} \text{ c}^{-1}$), E_a – енергія активації процесу, k – постійна Больцмана.

Рішення рівняння (1) має вигляд [1]:

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \exp\left[v \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT_k}\right)\right]. \quad (2)$$

Викладення основного матеріалу

Рівняння у формі (2) незручно застосовувати в інженерній практиці, оскільки невідоме точне значення E_a і ряд інших параметрів процесу формування покриття. Тому оцінку температури T_k і тиск P_k в зоні удару доцільніше проводити, аналізуючи енергетичні процеси, супутні взаємодії частинки з основою.

Слід зазначити, що динаміка удару твердої частинки об основу принципово відрізняється від динаміки удару рідкої частинки. Аналіз удару рідкої частинки об поверхню показав [1], що при ударі рідкої частинки гідродинаміка процесу виділяє два роди тиску – напірний або динамічний тиск у вигляді: $P_{дин} = r \cdot V^2/2$ і ударний, імпульсний тиск обумовлений виникненням гідравлічного удару в об'ємі рідкої краплі у вигляді:

$$P_{имп} = \left(\frac{m}{2}\right) \cdot r \cdot a \cdot V_0,$$

де m – коефіцієнт динамічної в'язкості; a – швидкість звуку.

Ударний тиск $P_{имп}$ є результатом дії пружних хвиль стиснення (ударних хвиль), що виникають в об'ємі краплі. Очевидно, що при взаємодії твердих частинок з перешкодою $P_{имп}$ відсутній, оскільки гідроудар не реалізується і в зоні контакту при ударі діє тільки напірний, динамічний тиск. Напірний тиск триваліший, час його дії відповідає часу удару $t_{уд}$. При швидкостях частинок, що досягають значень 50...100 м/с, динамічний тиск для частинок різної щільності може досягати рівнів близько 10^6 Па, що значно перевершує граничні значення механічних властивостей більшості полімерів. Такий екстремальний рівень тиску забезпечує міцне з'єднання як частинок з основою, так і частинок в об'ємі покриття.

В загальному вигляді рівняння балансу енергії в зоні удару можна представити у вигляді:

$$E_{кін.час} = E_{деф.час} + E_{деф.осн.} + E_{нагр.час} + E_{нагр.осн.} \quad (3)$$

Розкриємо фізичну суть і математичний опис кожного з членів в (3).

Енергія частинки. Кінетична енергія частинки у момент удару визначається масою і швидкістю частинки і представляється у вигляді::

$$E_{кін.час} = \frac{m_{час} \cdot V_{час}^2}{2}. \quad (4)$$

Енергія деформації частинки – енергія, витрачена на деформацію частинки за час удару, тобто енергія на зміну форми частинки від сферичної до циліндричної. Очевидно, процес деформації частинки супроводжується стисненням частинки і її розтіканням по поверхні, оскільки можна вважати, що розтікання частинки відбувається вільно, без зовнішньої перешкоди. Таким чином, визначальним механічним процесом в цьому випадку є процес розтікання, а не стиснення. Це означає, що енергія деформації частинки витратиться на подолання сил опору текучості, при деформації частинки від $d_{час}$ до $h_{час}$ (рис. 1).

Виходячи зі сказаного, енергію деформації частинки можна записати у вигляді:

$$E_{деф.час} = S_{T_{час}} \cdot \Delta F_{час} \cdot (d_{час} - h), \quad (5)$$

де $S_{T_{час}}$ – межа текучості матеріалу частинки; $\Delta F_{час}$ – зміна площі поверхні частинки.

$$\Delta F_{час} = F_{сфер.} - F_{біч.цил.},$$

де $F_{сфер.}$ – площа сфери частинки; $F_{біч.цил.}$ – площа бічної поверхні циліндра, що утворився після деформування частинки.

$$F_{сфер.} = \pi d_{час}^2;$$

$$F_{біч.цил.} = \pi d \cdot h.$$

Тоді

$$\Delta F_{час} = \pi d^2 - \pi d \cdot h = \pi d(d - h) = \pi d^2(1 - e),$$

де $e = h/d$.

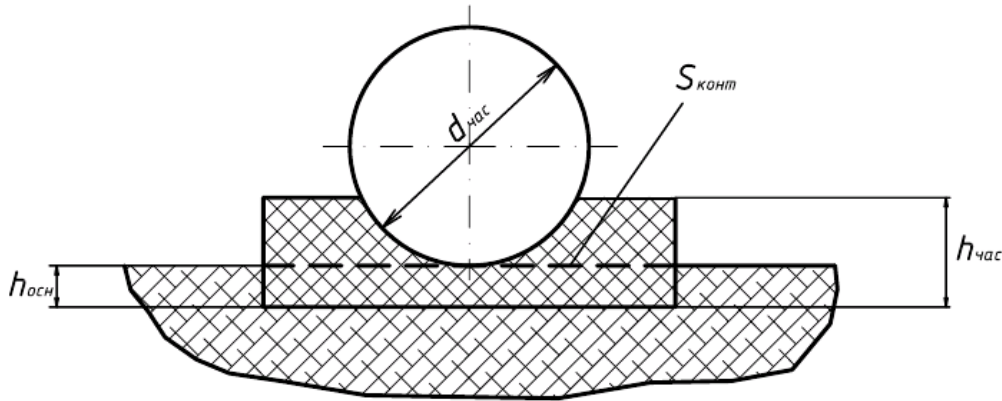


Рис. 1. Схема деформації частинки полімеру при ударі об основу

Тоді (5) прийме вигляд:

$$E_{\text{деф.час}} = p d_{\text{час}}^3 \cdot S_{\text{Тчас}} (1-e)^2. \quad (6)$$

Енергія деформації основи. Енергія, що витрачається на деформацію основи, визначається головним чином силами стиснення матеріалу основи і може бути представлена у вигляді:

$$E_{\text{деф.осн.}} = s_{\text{ст.осн.}} \cdot S_{\text{к}} \cdot h_{\text{осн.}}, \quad (7)$$

де $s_{\text{ст.осн.}}$ – межа міцності на стиснення, $S_{\text{к}}$ – площа контакту основи і деформованих частинок.

Можна припустити, що глибина деформації основи $h_{\text{осн}}$ за час удару $t_{\text{уд}}$, частинки об основу визначатиметься кінетичною енергією частинки і механічними властивостями матеріалів частинки і основи. Зокрема, деформація частинки $d_{\text{час}} - h_{\text{час}}$ повинна співвідноситися з деформацією основи як відношення межі міцності на стиснення $s_{\text{ст.осн.}}$ матеріалу основи і межі текучості матеріалу частинки $s_{\text{Тчас}}$, тобто

$$(d_{\text{час}} - h_{\text{час}})/h_{\text{осн}} = s_{\text{ст.осн.}}/s_{\text{Тчас}},$$

але

$$h_{\text{час}}/d_{\text{час}} = e.$$

Тоді

$$d_{\text{час}} (1-e)/h_{\text{осн}} = s_{\text{ст.осн.}}/s_{\text{Тчас}}.$$

Звідки

$$h_{\text{осн}} = \frac{s_{\text{ст.осн.}} (1-e) d_{\text{час}}}{s_{\text{Тчас}}}. \quad (8)$$

Таким чином

$$E_{\text{деф.осн.}} = s_{\text{ст.осн.}} \cdot S_{\text{к}} (s_{\text{Тчас.}}/s_{\text{ст.осн.}}) d_{\text{час}} (1-e),$$

або

$$E_{\text{деф.осн.}} = S_{\text{к}} \cdot d_{\text{час}} (1-e) s_{\text{Тчас.}}, \quad (9)$$

де $S_{\text{к}}$ визначається з умови збереження об'ємів частинки до і після деформації у вигляді:

$$\frac{p d_{\text{час}}^3}{6} = S_{\text{к}} \cdot h_{\text{час}},$$

або

$$S_{\text{к}} = \frac{p d_{\text{час}}^2}{6e}. \quad (10)$$

Тоді (9) приймає вигляд:

$$E_{\text{деф.осн.}} = \frac{p d_{\text{час}}^3}{6} \left(\frac{1-e}{e} \right) s_{\text{Тчас.}}. \quad (11)$$

Енергія нагріву частинки і основи. Очевидно, $E_{\text{нагр.час}}$ і $E_{\text{нагр.осн}}$ витрачені на нагрівання частинки і основи, можна представити у вигляді:

$$E_{\text{нагр.час}} = m_{\text{т.час}} \cdot c_{\text{час}} (\bar{T}_{\text{к.час}} - T_{0\text{час}}); \quad (12)$$

$$E_{назр.осн} = m_{осн} \cdot c_{осн} (\bar{T}_{к_{осн}} - T_{0_{осн}}), \quad (13)$$

де $m_{т_{час}}$ – частка маси прогрівання частинки за час удару $t_{y\delta}$; $\bar{T}_{к_{час}}$ – середньомасова температура прогрітої ділянки частинки.

З теорії нестационарної теплопровідності відомо, що довжина d_T , на яку розповсюдиться температурна хвиля за час t , визначається у вигляді:

$$d_T = \sqrt{a \cdot t},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу.

Тоді, очевидно, для частинки

$$d_{T_{час}} = \sqrt{a_{час} \cdot t_{y\delta}}. \quad (14)$$

У такому разі маса прогрітої частини частинки і основи визначатиметься як

$$m_{т_{час}} = r_{час} \cdot \frac{\rho d_{час}^2}{6e} \sqrt{a_{час} \cdot t_{y\delta}}; \quad (15)$$

$$m_{осн} = r_{осн} \cdot \frac{\rho d_{час}^2}{6e} \sqrt{a_{осн} \cdot t_{y\delta}}. \quad (16)$$

Таким чином, для оцінки $m_{т_{час}}$ і $m_{осн}$ необхідно розрахувати час удару $t_{y\delta}$.

Час удару частинки об основу – час розтікання (деформації) рідкої частинки при ударі об тверду поверхню зі швидкістю $V_{0_{час}}$, оцінюється за формулою:

$$t_{y\delta} = (d - h)V_{0_{час}},$$

або

$$t_{y\delta} = \frac{d_{час}}{V_{0_{час}}}(1 - e). \quad (17)$$

У разі удару твердої частинки формула (17) повинна бути модифікована, оскільки швидкість деформації твердої частинки не буде рівна швидкості $V_{0_{час}}$. Для твердої частинки

$$t_{y\delta} = \frac{d_{час}}{V_{деф_{час}}}(1 - e).$$

Логічно припустити, що швидкість деформації твердої частинки $V_{деф_{час}}$ відрізнятиметься від $V_{0_{час}}$ рідкої частинки на величину, представлену відношенням поверхневого тиску $P_{нов}$ в рідкій частинці, обумовленого поверхневим натягненням, до межі текучості матеріалу твердої частинки $S_{T_{час}}$, тобто

$$V_{деф_{час}} = \frac{V_{0_{час}} \cdot P_{нов}}{S_{T_{час}}}. \quad (18)$$

У свою чергу, згідно з [5]

$$P_{нов} = \frac{4S_{нов}}{d_{час}},$$

де $S_{нов}$ – питома енергія поверхневого натягнення.

Для більшості матеріалів $S_{нов} \approx 0,5S_T$ [5], тоді (18) приймає вигляд:

$$V_{деф_{час}} = \frac{2V_{0_{час}}}{d_{час}}. \quad (19)$$

У такому разі формула (16) приймає вигляд:

$$t_{y\delta} = \frac{d_{час}^2 \cdot S_{T_{час}}}{2V_{0_{час}}}(1 - e). \quad (20)$$

Підставивши (20) у формули (15) і (16), відповідно, отримаємо прогріті маси частинок і основи за час $t_{y\delta}$. Після підстановки всіх складових рівняння балансу енергії в зоні удару (3) прийме вигляд:

$$\frac{m_{\text{час}} \cdot V_0^2}{2\rho} = d_{\text{час}}^3 (1-e)^2 S_{T_{\text{час}}} + \frac{d_{\text{час}}^3}{6} \left(\frac{1-e}{e} \right) S_{T_{\text{час}}} + \frac{d_{\text{час}}^2}{6e} \left[r_{\text{час}} \cdot \sqrt{a_{\text{час}} \cdot t_{\text{уд}}} \cdot c_{\text{час}} \left(\bar{T}_{\kappa_{\text{час}}} - T_{0_{\text{час}}} \right) + r_{\text{осн}} \cdot \sqrt{a_{\text{осн}} \cdot t_{\text{уд}}} \cdot c_{\text{осн}} \left(\bar{T}_{\kappa_{\text{осн}}} - T_{0_{\text{осн}}} \right) \right]. \quad (21)$$

Висновки. При відомих з експерименту геометрії частинки, роду матеріалів частинки і основи, а також швидкості удару частинки і ступеня її деформації рівняння (21) дозволяє оцінити середньомасові температури в зоні удару $\bar{T}_{\kappa} = \bar{T}_{\kappa_{\text{час}}} = \bar{T}_{\kappa_{\text{осн}}}$.

Література

1. Кудинов В.В. Плазменные покрытия / Кудинов В.В. – М. : Наука, 1977. – 183 с.
2. Харламов Ю.Н. Применение детонации в газах для нанесения покрытий / Ю.Н. Харламов, В.В. Кудинов // Физика горения и взрыва (СО АН СССР), 1975. – С. 88.
3. Никитин П.В. Взаимодействие двухфазных потоков с преградой 1. Исследование теплообмена в ЛА. / Никитин П.В., Кочерин Ю.А., Дикун Ю.В. – М. : МАИ, 1982. – С. 16.
4. Костиков В.И. О движущей силе растекания жидкой фазы по твердой / В.И. Костиков, Б. Митин // Высокотемпературные материалы. – М. : Metallurgia, 1986. – С. 114.
5. Яворский Б.М. Справочник по физике / Яворский Б.М. – М. : Наука, 1974. С. – 259.

Надійшла 5.5.2012 р.

Статтю представляє: д.т.н. Параска Г.Б.

УДК 621.783.24-027.236

Ю.Г. КАЧАН, В.Л. КОВАЛЕНКО, Ю.Б. СПЕКТОРОВА

Запорожская государственная инженерная академия

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАМЕРНЫХ ПЕЧЕЙ С ВЫКАТНЫМ ПОДОМ

В статье дана количественная оценка энергетической эффективности камерных нагревательных газовых печей на основе результатов математического моделирования и определены направления дальнейших исследований.

In the article the quantitative estimation of energetic efficiency of chamber heating gas furnaces on the basis of mathematical model results and the directions of further investigations are defined.

Ключевые слова: камерная газовая печь, энергоэффективность, математическая модель, тепловая энергия.

Вступление

В настоящее время в промышленности Украины широко используются нагревательные печи, которые работают на природном газе. Современные нагревательные печи представляют собой разнообразное по конструкции, сложные тепловые агрегаты, которые содержат к тому же много вспомогательного оборудования. Сами печи включают в себя рабочее пространство и устройства для генерации теплоты (горелки). В состав вспомогательного оборудования входят устройства для утилизации теплоты и очистки уходящих дымовых газов, вентиляторы, дымососы, дымовые трубы, контрольно-измерительные приборы и системы управления печью. Указанный класс технологических агрегатов является самым распространенным, поскольку их применяют в черной и цветной металлургии, в машиностроении и т.д. Но как показано в [1] такие печи имеют ряд определенных проблем, обусловленных в основном недостатками конструкций, что приводит к большим потерям тепловой энергии и как следствие – к снижению энергетической эффективности установки.

Постановка задачи

Для решения задач энергоэффективности нагревательных газовых печей необходимо знать относительное распределение температурного поля в камере и иметь возможность определять зоны с различной плотностью тепловой энергии. Эту информацию можно получить с помощью математической модели [2], которая содержит в явном виде, как энергетические характеристики, так и конструктивные параметры объекта.

Для математической модели исходными данными являются: режимы термообработки в камерной печи с выкатным подом – отжиг, отпуск и закалка; размеры заготовок нагреваемого металла – длина, ширина, и толщина; масса и качество последнего; вид топлива – природный газ с теплотой сгорания. Распределение температуры рассчитывается с помощью численного метода и при использовании известной