

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ НА ТКАНИНИ

Представлено фізичну модель процесу нанесення часток полімеру на поверхню тканини струменем нагрітого повітря і математичну модель процесу ударної взаємодії часток з поверхнею основи.

*The physical model of process of causing of particles of polymer is presented on the surface of fabric by the stream of the heated air and mathematical model of process of shock co-operation of particles with the surface of basis.*

Ключові слова: моделювання, полімерне покриття.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технологічний процес нанесення термопластичного полімерного матеріалу на поверхню тканини складається з двох основних операцій: нанесення часток полімеру на поверхню тканини струменем нагрітого повітря і формування суцільного шару полімерного покриття за допомогою розігрітих вальців.

Процеси вальцювання полімерів досліджені досить повно, тоді як процес нанесення порошків полімеру досить складний і не достатньо досліджений [1].

### Постановка завдання

Представимо процес нанесення часток порошкового полімеру фізичною моделлю. Частки полімеру рухаються прямолінійно в струмені повітря, яке нагріте до температури  $T_{нов}$ . Струміння має швидкість  $v$  і направлений на площину матеріалу під кутом  $\alpha$ . Під час удару часток полімеру об поверхню матеріалу відбувається їх спільне пружно – пластичне деформування. Пластична складова деформації є залишковою і призводить до збільшення площі контакту часток з матеріалом. Між частками полімеру і поверхнею матеріалу виникають сили адгезійної взаємодії. Пружна складова деформації після удару відновлюється і викликає зворотний імпульс часток, що призводить до зменшення сили їх адгезійної взаємодії з матеріалом і, за певних умов, навіть до їх відриву. При певному значенні кута  $\alpha$  можливе проковзування часток полімеру по поверхні матеріалу. Приймемо наступні положення для спрощення моделі:

- вектори швидкості часток полімеру однакові за направленням і величиною, яка є постійною і дорівнює швидкості струменю повітря;
- температура часток полімеру в момент контакту з площиною матеріалу рівна температурі повітряного потоку ( $T_{пол} = T_{нов}$ );
- частки полімеру мають однакову масу  $m$  і форму кулі;
- співвідношення пружної і пластичної складових деформації системи частинка полімеру – матеріал під час удару визначається коефіцієнтом відновлення  $K$ , який залежить від властивостей полімеру і матеріалу, температури  $T_{пол}$  і швидкості  $v$ .

### Викладення основного матеріалу

Розглянемо косий пружний удар матеріальної точки масою  $m$  об нерухому поверхню з урахуванням сухого тертя. В цьому випадку імпульс ударної реакції поверхні:

$$\bar{S} = \bar{S}_n + \bar{S}_t,$$

де  $\bar{S}_n, \bar{S}_t$  – нормальна і дотична складові імпульсу.

Коефіцієнт відновлення:

$$K = \frac{S_{n2}}{S_{n1}}, \quad (1)$$

де  $S_{n1}, S_{n2}$  – нормальна складова імпульсу ударної реакції у фазах деформації і відновлення відповідно, причому

$$S_n = S_{n1} + S_{n2}. \quad (2)$$

Складова імпульсу, що враховує сухе тертя:

$$S_t = -f \cdot S_n \cdot \text{sign}(v_t), \quad (3)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання,  $\text{sign}(v_t)$  – функція, що враховує знак дотичної складової швидкості  $v_t$  точки.

Швидкості точки до і після удару (рис. 1) відповідно становлять:

$$\bar{v} = \bar{v}_n + \bar{v}_t; \quad \bar{u} = \bar{u}_n + \bar{u}_t.$$

Розглянемо різні можливі рухи точки при ударі і визначимо умови, при яких ці рухи реалізуються.

1. Матеріальна точка ковзає протягом усього часу удару  $t$ . Фаза деформування починається при

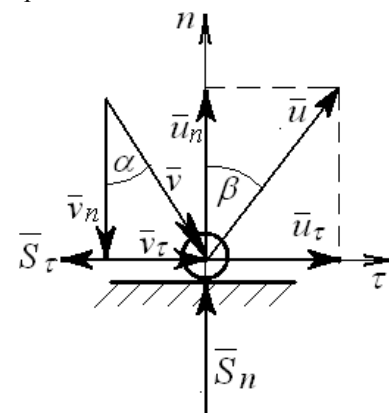


Рис. 1. Схема ударної взаємодії частинки полімеру і основи

$t = 0$  і закінчується при  $t = t_1$ .

Складові швидкості точки на початку удару  $v_n, v_t$ , у кінці фази деформації  $v_n^*, v_t^*$ . Фаза відновлення починається при  $t = t_1$ , і закінчується при  $t = t$ . Складові швидкості точки на початку фази відновлення  $v_n^*, v_t^*$  у кінці удару  $u_n, u_t$ .

Згідно з теоремою про зміну кількості руху точки при ударі,

$$m(\bar{u} - \bar{v}) = \bar{S} = \bar{S}_n + \bar{S}_t. \quad (4)$$

У проєкціях на осі  $n$  і  $t$  рівняння (4) для фази деформації має вигляд

$$m(v_n^* - v_n) = \bar{S}_{n1} + \bar{S}_t; \quad m(v_t^* - v_t) = \bar{S}_{t1}. \quad (5)$$

У кінці фази деформації  $v_n^* = 0$ . З (3) отримуємо:

$$S_{t1} = -f \cdot S_{n1}, \quad (6)$$

де  $S_{t1} < 0, f > 0, S_{n1} > 0$  (рис. 20.25). Крім того,  $v_n = -v \cdot \cos a, v_t = v \cdot \sin a > 0, \text{sign}(v_t) = 1$ .

З (5) маємо:

$$S_{n1} = -m \cdot v_n = m \cdot v \cdot \cos a. \quad (7)$$

З (6) і (7) отримуємо:

$$S_{t1} = -f \cdot mv \cdot \cos a < 0. \quad (8)$$

З (5) і (8) знаходимо:

$$v_t^* = v_t + \frac{S_{t1}}{m} = v(\sin a - f \cos a). \quad (9)$$

Для фази відновлення відповідно маємо:

$$m(u_n - v_n^*) = S_{n2}; \quad m(u_t - v_t^*) = S_{t2}, \quad (10)$$

$$S_{t2} = -f \cdot S_{n2}. \quad (11)$$

де  $S_{n2} > 0, S_{t2} < 0$ .

Згідно (1),

$$S_{n2} = K \cdot S_{n1}. \quad (12)$$

З (7) і (12) визначаємо:  $S_{n2} = Kmv \cdot \cos a$ , а з (2) отримуємо повну нормальну складову імпульсу ударної реакції:

$$S_n = mv \cdot \cos a (1 + K), \quad (13)$$

Підставивши  $S_{n2}$  в (11), знаходимо:

$$S_{t2} = -fKmv \cdot \cos a < 0. \quad (14)$$

Дотична складова імпульсу ударної реакції  $S_t = S_{t1} + S_{t2}$ . З урахуванням (8) і (14) отримуємо:

$$S_t = -mv \cdot \cos a (1 + K) \cdot f. \quad (15)$$

Згідно (8) і (10), нормальна складова швидкості точки після удару:

$$u_n = \frac{S_{n2}}{m} = \frac{KS_{n1}}{m} = -Kv_n, \quad (16)$$

тобто для матеріальної точки за наявності тертя для обчислення коефіцієнта відновлення можна використовувати кінематичну модель Ньютона:

$$u_n = Kv \cdot \cos a. \quad (17)$$

Згідно (10), дотична складова швидкості після удару:

$$u_t = v_t^* + \frac{S_{t2}}{m} = v[\sin a - f \cos a (1 + K)]. \quad (18)$$

Тепер визначимо умови, при яких можливе ковзання точки протягом усього часу удару, тобто коли  $v_t^* > 0, u_t > 0$ . З (9) і (18) маємо  $v(\sin a - f \cos a) > 0$  і  $v[\sin a - f \cos a (1 + K)] > 0$ , звідки отримуємо  $\text{tga} > f$  і  $\text{tga} > f(1 + K)$ . Таким чином, загальна умова ковзання при ударі має вигляд:

$$\text{tga} > f(1 + K).$$

Модулі швидкості точки після удару і повного імпульсу ударної сили відповідно рівні

$$u = \sqrt{u_t^2 + u_n^2} = v \sqrt{[\sin a - f(1 + K) \cos a]^2 + (K \cos a)^2};$$

$$S = \sqrt{S_t^2 + S_n^2} = mv(1 + K) \cos a \sqrt{1 + f^2}.$$

Якщо в цих формулах покласти  $f = 0$ , то

$$u = v\sqrt{\sin^2 a - K^2 \cos^2 a}; S = mv(1+K)\cos a,$$

тобто отримуємо рішення для випадку удару матеріальної точки об нерухому поверхню без урахування тертя.

2. Ковзання матеріальної точки закінчується у фазі деформації. В цьому випадку фаза деформації розділяється на два етапи:  $0-t'$  – ковзання точки,  $t'-t_1$  – рух точки без ковзання (рух по нормалі). У момент часу  $t=t'$  дотична становить швидкості точки стане рівною нулю (тобто  $v'_t = 0$ ) і ковзання точки припиниться.

Перший етап фази деформації починається при  $t=0$  ( $v_n, v_t$ ) і закінчується при  $t=t'$  ( $v'_n = 0, v'_t = 0$ ). Необхідні рівняння мають вигляд:

$$m(v'_n - v_n) = S_{n1}^{(I)}; m(v'_t - v_t) = S_{t1}^{(I)},$$

де  $S_{n1}^{(I)}, S_{t1}^{(I)}$  – нормальна і дотична складові імпульсу ударної реакції за час від 0 до  $t'$ ,  $S_{t1}^{(I)} = -fS_{n1}^{(I)}$ .

Звідки

$$S_{t1}^{(I)} = -mv'_t = -mv \sin a < 0; S_{n1}^{(I)} = -\frac{S_{t1}^{(I)}}{f} = \frac{mv \sin a}{f} > 0; v'_n = -\frac{S_{n1}^{(I)}}{m} + v_n = v\left(\frac{\sin a}{f} - \cos a\right). \quad (19)$$

Другий етап фази деформації починається при  $t=t'$  ( $v'_n, v'_t$ ) і закінчується при  $t=t_1$  ( $v''_n = 0, v''_t = 0$ ).

Рівняння удару будуть наступними:

$$m(v''_n - v'_n) = S_{n1}^{(II)}; m(v''_t - v'_t) = S_{t1}^{(II)},$$

де  $S_{n1}^{(II)}, S_{t1}^{(II)}$  – нормальна і дотична складові імпульсу ударної реакції на другому етапі фази деформації.

$$3 \text{ рівнянь виходить: } S_{t1}^{(II)} = 0; S_{n1}^{(II)} = -mv'_n = mv\left(\cos a - \frac{\sin a}{f}\right).$$

Складові імпульсу ударної реакції у фазі деформації:

$$S_{t1} = S_{t1}^{(I)} + S_{t1}^{(II)} = -mv \sin a; S_{n1} = S_{n1}^{(I)} + S_{n1}^{(II)} = mv \cos a.$$

Для фази відновлення, яка починається при  $t=t_1$  і закінчується при  $t=t$ , складові швидкості будуть відповідно  $v_n^* = 0, v_t^* = 0, u_t = 0, u_n$ . Рівняння удару мають вигляд:

$$m(u_n - v_n^*) = S_{n2}; m(u_t - v_t^*) = S_{t2}; S_{n2} = KS_{n1}.$$

Звідси отримуємо:  $S_{t2} = 0; S_{n2} = mu_n = KS_{n1}$ . Тоді

$$u_n = \frac{KS_{n1}}{m} = Kv \cos a = -Kv_n; S_n = S_{n1} + S_{n2} = (1+K)mv \cos a; S_t = S_{t1} + S_{t2} = -mv \sin a.$$

Щоб ковзання точки при ударі закінчилося у фазі деформації, потрібне виконання кінематичної умови:

$$v'_n < 0. \quad (20)$$

З (19) і (20) отримуємо:

$$\operatorname{tg} a < f \quad (21)$$

За відсутності ковзання у кінці фази деформації і у кінці удару мають бути дотримані динамічні умови відсутності ковзання:  $|S_{t1}| < f \cdot S_{n1}, |S_t| < f \cdot S_n$ . Легко перевірити, що ці умови підтверджують вимогу (21).

3. Ковзання матеріальної точки закінчується у фазі відновлення. Отримаємо спочатку рішення для фази деформації ( $t=0..t_1$ ). Ковзання в цій фазі присутнє, тобто  $v_t > 0$  і  $v_t^* > 0$ , а нормальні складові швидкості точки будуть  $v_n, v_n^* > 0$ . Необхідні рівняння мають вигляд:

$$m(v_n^* - v_n) = S_{n1}; m(v_t^* - v_t) = S_{t1}; S_{t1} = -fS_{n1}.$$

Звідси

$$S_{n1} = -mv_n = mv \cos a; S_{t1} = -fS_{n1} = -fmv \cos a; v_t^* = \frac{S_{t1}}{m} + v_t = v(\sin a - f \cos a).$$

Фазу відновлення розібіємо на два етапи. На першому етапі ( $t=t_1..t''$ ) складові швидкості будуть відповідно  $v_n^* = 0, v_t^* > 0, v_n'' = 0, v_t'' = 0$ , а рівняння удару мають вигляд:

$$m(v_n'' - v_n^*) = S_{n2}^{(I)}; m(v_t'' - v_t^*) = S_{t2}^{(I)}; S_{t2}^{(I)} = -fS_{n2}^{(I)}.$$

Звідси отримуємо:

$$S_{t2}^{(I)} = -mv(\sin a - f \cos a); S_{n2}^{(I)} = -\frac{S_{t2}^{(I)}}{f} = mv\left(\frac{\sin a}{f} - \cos a\right); v_n'' = -\frac{S_{n2}^{(I)}}{m} + v_n^* = v\left(\frac{\sin a}{f} - \cos a\right).$$

де  $S_{t2}^{(I)}, S_{n2}^{(I)}$  – дотична і нормальна складові імпульсу ударної реакції;  $v_n'' \geq 0$ .

На другому етапі фази відновлення ( $t = t'' \dots t$ ) складові швидкості точки будуть,  $v_n'' = 0, v_t'' = 0, u_n = 0, u_t = 0$ , а рівняння наберуть вигляду:

$$m(u_n - v_n'') = S_{n2}^{(II)}; m(u_t - v_t'') = S_{t2}^{(II)}; S_{n2} = S_{n2}^{(I)} + S_{n2}^{(II)} = KS_{n1}.$$

Звідси:

$$S_{t2}^{(II)} = 0; S_{n2}^{(II)} = KS_{n1} - S_{n2}^{(I)} = mv\left(K \cos a - \frac{\sin a}{f} + \cos a\right) = mv\left((1+K) \cos a - \frac{\sin a}{f}\right);$$

$$u_n = \frac{S_{n2}^{(II)}}{m} + v_n'' = Kv \cos a = -Kv_n.$$

Для дотичної і нормальною складових імпульсу ударної реакції маємо:

$$S_t = S_{t1} - S_{t2}^{(II)} = -mv \sin a; S_n = (1+K)S_{n1} = (1+K)mv \cos a.$$

Для реалізації даного випадку удару потрібне виконання умови  $v_n'' \geq 0$ , або  $v\left(\frac{\sin a}{f} - \cos a\right) \geq 0$ , звідки

$$tga \geq f. \tag{22}$$

При цьому також повинна виконуватися динамічна умова  $|S_t| \leq fS_n$ , або  $mv \sin a \leq f(1+K)mv \cos a$ , звідки слідує:

$$tga \leq f(1+K). \tag{23}$$

Об'єднавши нерівності (22) і (23), отримаємо:  $f \leq tga \leq f(1+K)$ , де  $0 \leq a \leq 90^\circ$ .

На рис. 2 побудовані залежності  $a = \arctg[f(1+K)]$  при  $K = 0,5$  і  $K = 0$ .

При  $K = 0$  крива  $a(f)$  є загальною нижньою межею для усіх випадків удару. Криві розділяють області I – III, в яких точка рухається при ударі по-різному. При  $f = 0,5$  зона I визначається кутом  $a = 26,6^\circ$ . При  $a < 26,6^\circ$  ковзання точки закінчується у фазі деформації. При  $f = 0,5$  і  $K = 0,5$  зона II визначається кутом  $a = 36,9^\circ$ . При  $26,6^\circ < a < 36,9^\circ$  при ударі матеріальної точки об шорстку поверхню ковзання точки закінчується у фазі відновлення.

Зона III визначається зміною  $a$  в межах  $36,9^\circ < a < 90^\circ$ . В цьому діапазоні зміни кута падіння матеріальної точки на шорстку поверхню ковзання точки при ударі не припиняється до кінця удару. При побудові кривих коефіцієнт тертя ковзання змінювався в межах  $0 < f < 1$ . Проте цей діапазон не часто практично реалізується. При великих значеннях  $f$  ця модель може відрізнитися від результатів експерименту.

Аналіз отриманих рішень у разі припинення ковзання у фазах деформації і відновлення показує, що остаточні значення швидкостей і імпульсів у них однакові, відмінності спостерігаються в проміжних значеннях.

Для цих випадків маємо при  $tga \leq f(1+K)$ :

$$u = Kv \cos a; S = mv\sqrt{\cos^2 a (1+K)^2 + \sin^2 a}.$$

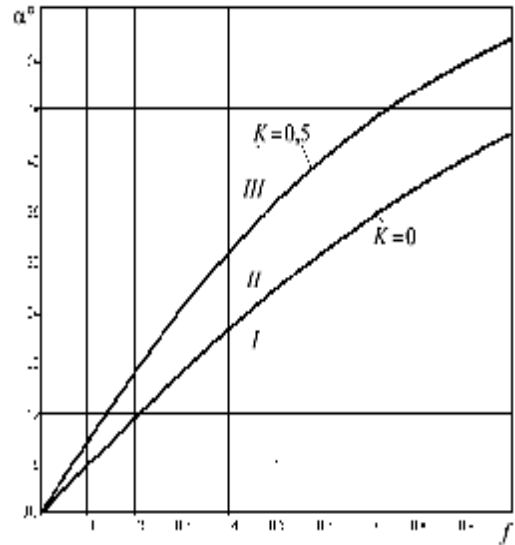


Рис. 2. Залежності  $a = \arctg[f(1+K)]$

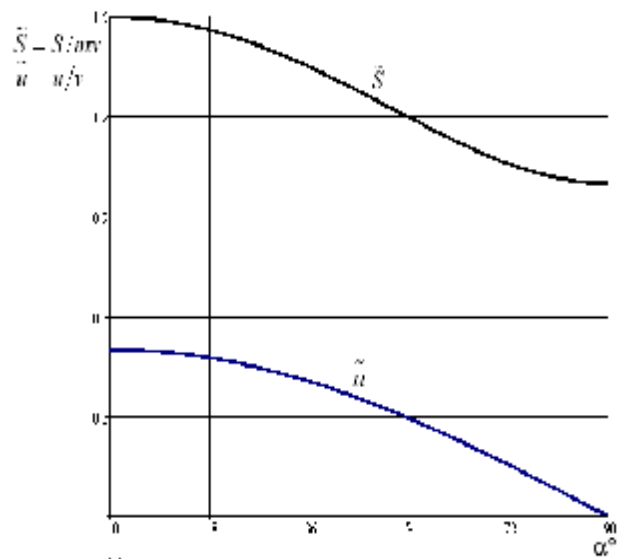


Рис. 3. Залежності безрозмірних швидкостей точки після удару і повного імпульсу ударної реакції від кута падіння  $a$  ( $K = 0,5; f = 0,5$ )

На рис. 3 побудовані залежності безрозмірних швидкостей точки після удару  $\dot{y} = u/v$  і повного імпульсу ударної реакції  $\dot{S} = S/mv$  від кута падіння  $a$  ( $K = 0,5$ ;  $f = 0,5$ ).

Оскільки  $\tan b = u_t/u_n$ , то  $\tan b = \frac{\tan a}{K} - f \left(1 + \frac{1}{K}\right)$  при  $\tan a > f(1+K)$ ;  $\tan b = 0$  при  $\tan a \leq f(1+K)$ .

Залежність  $\tan b(a)$  приведена на рис. 4 ( $K = 0,5$ ;  $f = 0,5$ ).

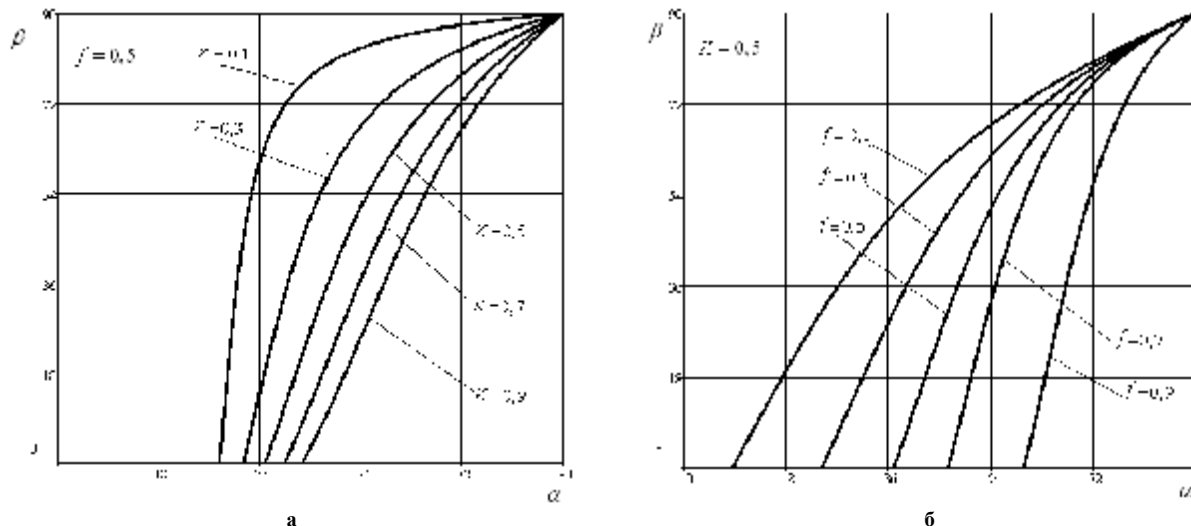


Рис. 4. Графіки залежності кута відбиття частинки  $b$  від кута удару  $a$  при різних значеннях коефіцієнтів відновлення  $K$  (а) і тертя  $f$  (б)

#### Висновки

Отримані фізична модель процесу нанесення часток полімеру на поверхню тканини струменем нагрітого повітря і математична модель процесу ударної взаємодії часток з поверхнею основи є основою для проектування систем нанесення полімеру на поверхню тканини струменем нагрітого повітря.

#### Література

1. Сорокин М.Ф. и др. Химия и технология пленкообразующих веществ. М. Химия. 1989. – 480 с.
2. Дронг В.И., Дубинин В.В., Ильин М.М. и др. Курс теоретической механики: Учебник для вузов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.: ил.

Надійшла 20.8.2011 р.

УДК 677.027

Л.Н. КОНДРАТЮК, Л.А. НЕСТЕРОВА, Г.С. САРИБЕКОВ  
Херсонский национальный технический университет

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОЛИЗА АКТИВНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ ПРИ КРАШЕНИИ ХЛОПЧАТОБУМАЖНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

У статті розглянуто інтенсифікацію процесу фарбування бавовняних текстильних матеріалів активними барвниками. Досліджено вплив фарбувального складу із застосуванням інтенсифікаторів на процес гідролізу активних барвників.

*In the article intensification of process of dyeing of cotton textile materials is considered by active dyes. Influence of a dyeing structure with using of intensification of substance on the process of hydrolysis of active dyes is investigated.*

Ключові слова: фарбування, активні барвники, гідроліз.

#### Введение

Основными достоинствами активных красителей, отличающими их от красителей других классов, являются яркость и высокая устойчивость окрасок в эксплуатации. По цветовому охвату они превосходят не только прямые, но и кубовые красители.

Проблема применения активных красителей включает в себя три основных направления:

1) контроль и управление скоростью и степенью фиксации активных красителей при различных методах крашения и печатания;