

# Різання багатошарових пакувальних матеріалів

В.С. Гуць, д.т.н., О.О. Губеня, к.т.н., Національний університет харчових технологій, м. Київ

Значна частка пакувальних матеріалів для харчових продуктів — багатошарові. Наприклад, полімерні пакувальні плівки (рис. 1, а), гофрований картон (рис. 1, б) [1], деякі види ПЕТ-пляшок (рис. 1, в) та інші [2]. З виробничого досвіду, а також згідно з останніми науковими дослідженнями, відомо, що процес різання таких матеріалів має певні особливості порівняно з однорідними матеріалами. Виробники обладнання для різання матеріалів, а також механізмів

різання пакувального обладнання часто не враховують структуру матеріалу під час вибору умов та режимів різання.

Основна особливість різання багатошарових матеріалів — залежність зусилля різання та якості зрізу від:

- розміщення шарів матеріалу відносно руху леза;
- конструкції леза та опори, на якій знаходиться матеріал;
- способу фіксації матеріалу під час різання.

Розглянемо випадок різання багатошарового матеріалу. Зазвичай він складається з більш товстого основного формотвірного шару і тонкого, який використовується для зміцнення матеріалу, захисту основного шару від вологи і газового середовища тощо. Основний шар зазвичай виготовляється з матеріалу, міцність якого невисока. Тонкий шар має високі, порівняно з основним, міцність, пружність та пластичність. У пакувальних матеріалах усі шари з'єднані між собою зварюванням або склеюванням. Шар клею можна розглядати як окремий прошарок матеріалу.

Лезо залежно від форми, розмірів, швидкості руху деформує матеріал у глибину і ширину не меншу, ніж товщина леза. При цьому стискаються бокові поверхні леза і виникають сили тертя, які чинять опір його руху (рис. 2).

Якщо на виході леза із матеріалу розміщено його міцний тонкий шар, то загальний опір різання значно зростає. Пов'язано це із суттєвим збільшенням сили тертя поверхні леза з основним матеріалом, який завдяки міцному шару швидко стискається, затискаючи лезо із двох боків.

Якщо міцний тонкий шар розташовано на вході леза в матеріал, розрізавши його, лезо з легкістю розрізає товстий шар основного неміцного матеріалу. У цьому випадку зусилля різання значно менше, ніж у попередньому. Пояснити це можна тим, що сила бокового стискання леза менша, ніж в попередньому випадку. Основний шар матеріалу стискається в напрямку руху леза і значно менше стискається в боковому.

Зусилля стискання в нормальному і тангенціальному напрямках залежить від структурно-механічних властивостей основного матеріалу і тонкого шару плівки, швидкості, напрямку і форми леза (рис. 2).

Збільшення зусилля різання під час розміщення тонкого міцного шару на виході леза не є єдиним недоліком рубаючого способу різання. У разі збільшення опору руху різальна крайка леза викривлюється, лезо перестає рухатись у потрібному напрямку, починає коливатись, внаслідок чого матеріал значно деформується під фаскою леза, поверхня зрізу стає нерівною, крихкі

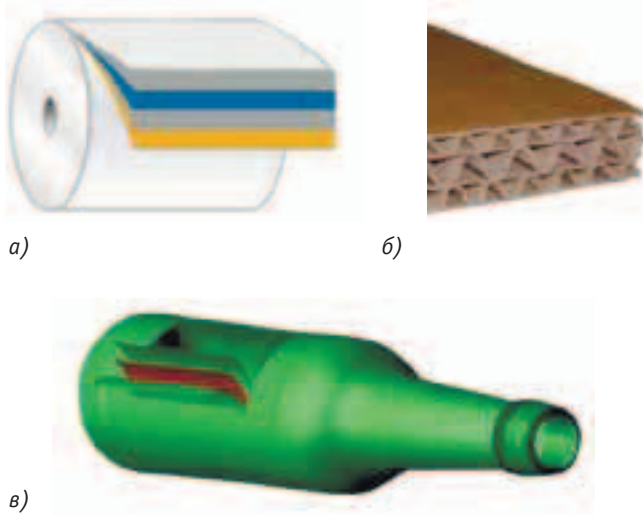


Рис. 1. Багатошарові пакувальні матеріали: полімерна плівка (а); гофрокартон (б); ПЕТ-пляшка (в)

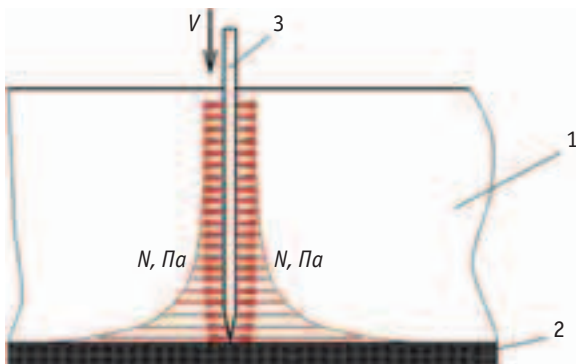
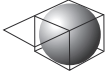


Рис. 2. Зміна тиску матеріалу на бокову поверхню леза на межі контакту шарів: 1 — основний шар; 2 — тонкий міцний шар; 3 — лезо



матеріали руйнуються хаотично. Отже, під час різання багатошарових матеріалів лезо спочатку має розрізати тонкий міцний шар, а потім — основний товстий шар матеріалу (рис. 3). При цьому будуть менші енерговитрати на різання і краща якість поверхні зрізу.

У більшості випадків для пакувальних матеріалів (рис. 3, а) використовується нормальний рубаючий спосіб різання або рубаючий під кутом з малим ковзанням. Ковзне різання застосовується рідше.

Розміщення леза при різанні під кутом (рис. 3, б) дає можливість знизити зусилля різання. Спочатку розрізається тонкий шар, а за ним — основна маса матеріалу. В іншому випадку тонкий шар постійно знаходиться на виході леза і, відповідно, збільшує зусилля тертя.

Під час різання дисковим ножом (рис. 3, в), коли вісь його обертання розміщена над матеріалом, спочатку розрізається тонкий міцний шар. У разі розміщення осі обертання нижче тонкого шару виникає додаткове тертя.

Аналогічно вибирається орієнтація матеріалу під час різання стрічковим зубчастим ножом (рис. 3, г).

При різанні дисковим або стрічковим ножами виникає додаткове ковзання матеріалу по їхнім боковим поверхням. Збільшення бокового тиску на ніж на межі контакту шарів негативно впливає на процес різання через те, що сила тертя збільшується багатократно порівняно з рубаючим різанням.

Під час проектування обладнання для різання матеріалів необхідно визначити потужність приводу. Відома проста методика визначення зусилля та потужності різання [2]. Вона базується на використанні експериментальної установки маятникового типу. За допомогою отриманих математичних моделей результати експерименту легко можна перенести на промислове обладнання.

Розглянемо особливості моделювання різання різних матеріалів.

Під час *різання матеріалу з однорідною структурою* (одношаровий матеріал) на лезо діють зусилля різання  $F_r$ , кінематичного тертя  $G$  та інерції  $P_i$ .

$$G = C + k_1 V = C + k_1 \frac{dy}{dt}; \quad (1)$$

$$P_i = ma = \frac{md^2 y(t)}{dt^2}, \quad (2)$$

де  $C$ ,  $k_1$  — коефіцієнти, які характеризують кінематичне тертя;

$y$ ,  $V$ ,  $a$  — відповідно переміщення, швидкість та прискорення руху леза в матеріалі;

$m$  — приведена до леза маса рухомої частини різального механізму.

Диференціальне рівняння руху леза:

$$F_r + G + P_i = 0 \Rightarrow \Rightarrow F_r + (C + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = 0. \quad (3)$$

Розв'язавши рівняння, отримуємо залежність зусилля різання від швидкості переміщення леза та властивостей матеріалу:

$$F_r = \frac{k_1 \frac{dy(t)}{dt} - e^{\frac{k_1 t}{m}} (C + V_0 k_1) + C}{e^{\frac{k_1 t}{m}} - 1}, \quad (4)$$

де  $V_0$  — початкова швидкість руху леза.

Аналіз рівняння (4) та отриманих результатів приведено в роботі [2].

Проте ця модель не може адекватно описувати процес різання багатошарових матеріалів.

Особливістю *різання багатошарових матеріалів* з міцним тонким поверхневим шаром є те, що на межі контакту шарів на лезо діє значне короткочасне (миттєве) зусилля  $F_M$ .

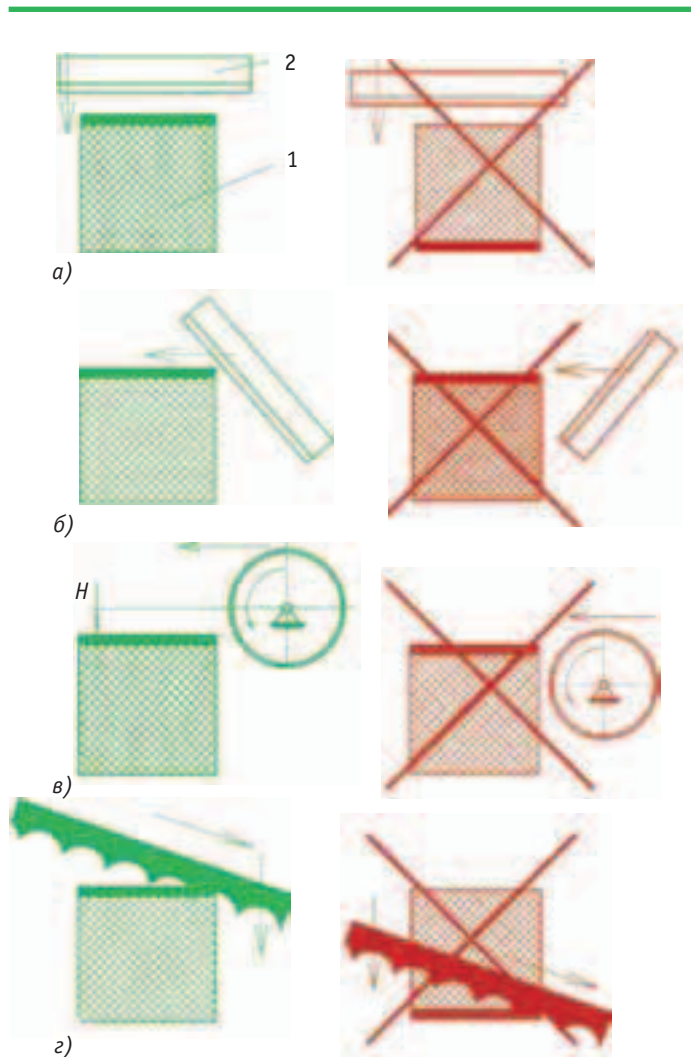


Рис. 3. Вибір орієнтації різального інструменту і багатошарового матеріалу за різних способів різання: різання нормальне рубаюче (а), різання рубаюче під кутом (б), різання ковзне дисковим ножом (в), різання стрічковим зубчастим ножом (г)

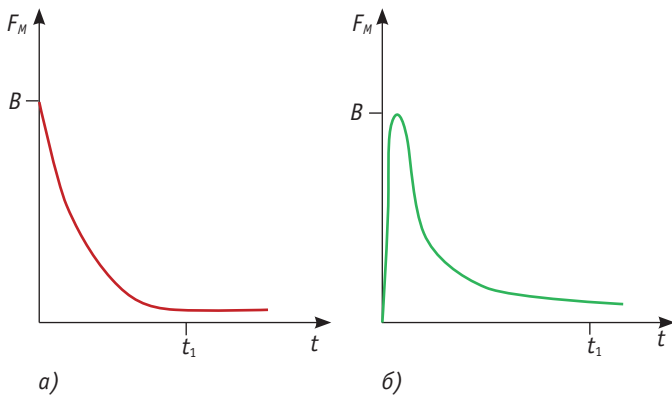


Рис. 4. Зміна миттєвого зусилля  $F_M$  за часом:  $F_M = Ve^{-bt}$  (а);  $F_M = Ae^{-B(\ln t)^2}$  (б)

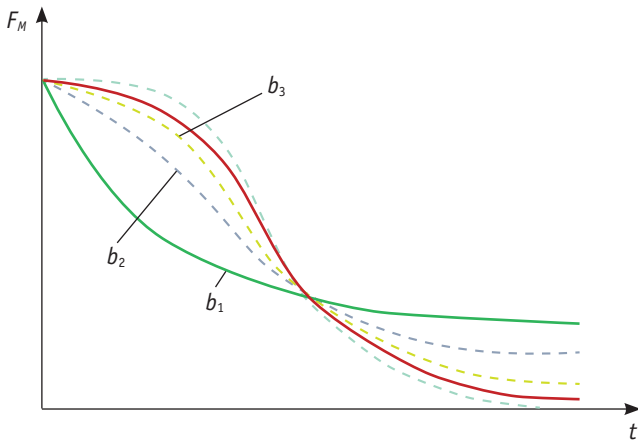


Рис. 5. Залежність миттєвого зусилля  $F_M$  від показника степені  $b$  ( $b_1 < b_2 < b_3$ )

Рівняння руху леза буде таким:

$$F_r + G + P_i + F_M = F_r + (C + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2y(t)}{dt^2} + F_M = 0. \quad (5)$$

За результатами експериментальних досліджень встановлено характер зміни  $F_M$ .

Так, для міцного поверхневого шару миттєве зусилля може змінюватись за законами  $F_M = Ve^{-bt}$  або  $F_M = Ae^{-B(\ln t)^2}$ . Графічно його можна навести у вигляді залежності, що швидко спадає (рис. 4). Тривалість дії такого зусилля ( $t_1 \rightarrow 0$ ) значно менша, ніж тривалість переміщення леза в матеріалі.

При  $F_M = Ve^{-bt}$  диференціальне рівняння руху леза:

$$F_r + (C + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2y(t)}{dt^2} + Ve^{-bt} = 0. \quad (6)$$

Розв'язавши рівняння, за початкових умов  $t = 0 \Rightarrow x(0) = 0, V(0) = V_0$  отримуємо переміщення (7), швидкість леза (8) та зусилля різання (9):

$$y(t) = \frac{m(1 - e^{-\frac{k_1 t}{m}})(V_0 k_1 + C + F_r)}{k_1^2} + \frac{\mu_1(B(1 - e^{bt}) + bt(C + F_p)) - mb(bt(C + F_r) + B(1 - e^{-\frac{k_1 t}{m}}))}{(mb - k_1)k_1 b}; \quad (7)$$

$$V(t) = \frac{e^{-\frac{k_1 t}{m}}(V_0 k_1 + C + F_r)}{k_1} + \frac{k_1(Bbe^{bt}) + b(C + F_p)) - mb(b(C + F_r) + \frac{Bk_1 e^{-\frac{k_1 t}{m}}}{m})}{(mb - k_1)k_1 b}; \quad (8)$$

$$F_r = (Vk_1 mb - Vk_1^2 + e^{-\frac{k_1 t}{m}}(-V_0 k_1 mb + V_0 k_1^2 - mbC + Bk_1) + k_1 C - k_1 B e^{-bt} - k_1 C + Cbm) \cdot (e^{\frac{k_1 t}{m}}(mb - k_1) + k_1 - mb)^{-1}. \quad (9)$$

На рис. 5 показано, як змінюється миттєве зусилля залежно від показника степені  $b$ , на який, у свою чергу, впливають міцність та структурно-механічні властивості поверхневого шару.

Крім визначення зусилля різання, запропоновану модель можна використовувати для визначення структурно-механічних характеристик матеріалу та його шарів.

Визначивши швидкість леза і зусилля різання, знаходимо потужність різання як добуток зусилля різання на швидкість руху леза:

$$N = F_{rm} \frac{dy(t)}{dt},$$

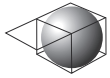
де  $F_{rm}$  — максимальне зусилля різання.

У випадку якщо миттєве зусилля  $F_M = Ae^{-B(\ln t)^2}$ , рівняння руху леза:

$$F_r + (C + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2y(t)}{dt^2} + Ae^{-B(\ln t)^2} = 0. \quad (10)$$

Рівняння (10) у разі використання сучасних комп'ютерних методів має громіздкий розв'язок, включає специфічні математичні функції, які незручні під час практичного використання. Можна рекомендувати для його розв'язання наближені або чисельні методи. Наприклад, отримати розв'язок у вигляді збіжного ряду.

Зміну середнього питомого зусилля різання багатшарових матеріалів *підтверджено експериментально*.



Залежність зусилля різання від швидкості руху леза і розташування шарів матеріалів представлена на рис. 6, 7.

Тонкий міцний шар розміщався на вході або виході леза з матеріалу. У разі різання шарів окремо зусилля різання їх незначне. Але за багат шарового різання, коли тонкий міцний шар розміщений на виході леза з матеріалу, середнє зусилля різання зростає.

Під час проведення експериментальних досліджень використано модельний матеріал — пористий пінопласт товщиною 10 мм з наклеєною тонуальною полімерною плівкою. У разі розміщення плівки на виході леза з матеріалу (рис. 6) зусилля різання у понад 50 разів більше, ніж при розміщенні плівки на вході леза.

Схожі результати отримано під час різання блістерної упаковки (рис. 7), яка складається із шару слабопластифікованого ПВХ товщиною 0,4 мм і тонкого міцного шару алюмінієвої фольги.

Отримані результати підтверджують зроблені висновки про вибір способу різання багат шарових матеріалів та раціональну орієнтацію їхніх шарів відносно руху леза.

### Висновки

Під час різання багат шарових матеріалів на межі контакту їхніх шарів зусилля різання збільшується за рахунок стискування матеріалом бокових поверхонь леза та зростання сил тертя, які при цьому виникають. Матеріал під час різання необхідно орієнтувати так, щоб спочатку розрізався тонкий міцний шар, а потім інші, менш міцні шари. Це забезпечить більш низькі енерговитрати, кращу якість зрізу та зносостійкість леза.

Розроблені математичні моделі дають можливість визначити зусилля та потужність різання однорідних і багат шарових матеріалів.

### Література

1. *Gospodinov D., Hadjiiski V., Stefanov S.* Modeling of corrugated paperboard by using the finite element method // University of Ruse «Angel Kanehev» Proceedings. Volume 49, Book 9.2, 2010, P. 114–118. [Bulgaria].
2. *Гуць В.С., Губеня О.О.* Моделювання процесу різання харчових продуктів // Товари і ринки. — 2007. — № 2. — С. 107–114.
3. *Стефанов С., Саздов Ч.* Състояние и тенденции при производството на PET бутилки // ХВП. — 2009. — № 6. [Bulgaria].
4. *Mitev R., Hadjiiski W., Stefanov S., Sazdov Ch.* Modeling and testing of resistance petaloid bottom of PET bottles for carbonated drinks. 10th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI 2010, 16–19 Septmber 2010, vol. 2, p. 1168–1173. [Serbia].
5. <http://www.vishalpacks.com/corrugated-packaging-products.htm>

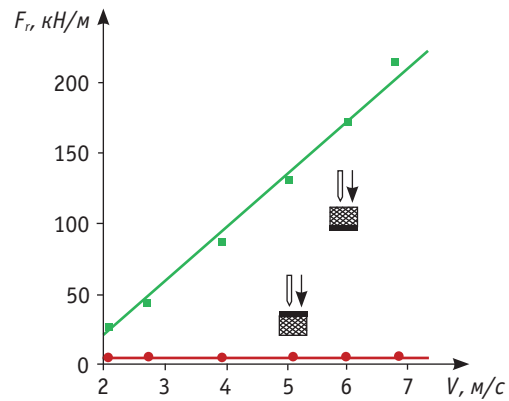


Рис. 6. Залежність зусилля різання пінопласту ( $h = 10$  мм) з наклеєною тонуальною плівкою від швидкості руху леза: плівка на вході леза (—); на виході (—)

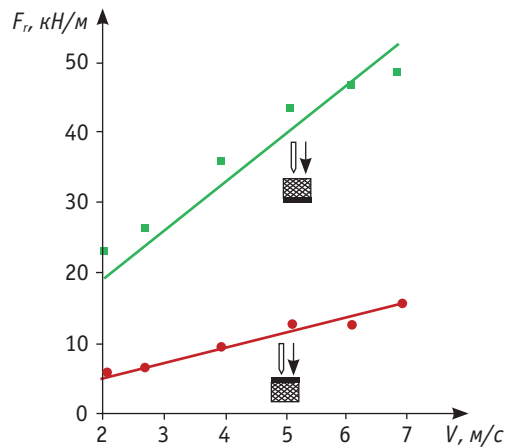


Рис. 7. Залежність зусилля різання блістерної упаковки від швидкості руху леза: шар фольги на вході леза (—); на виході (—)

### Резание многослойных упаковочных материалов

В.С. Гуць, д.т.н., А.А. Губеня, к.т.н.

Значительная доля упаковочных материалов являются многослойными. В данной статье проведен анализ особенностей их резания. Также разработаны математические модели, позволяющие определить скорость перемещения лезвия, усилия и мощность резания. В статье даны рекомендации касательно способа резания многослойных материалов.

**Ключевые слова:** резание; математическая модель резания; усилия резания; резание многослойных материалов.

### Cutting of packing laminates

V.S. Guts, Dr., O.O. Gubunya, Ph.D.

Many packaging materials are multilayered. The peculiarities of their cutting. Mathematical models for determining the speed of the blade, cutting force and power has been developed. Provided recommendations for cutting multilayer materials.

**Key words:** cutting; mathematical model of cutting; effort of cutting; cutting of packing laminates.