

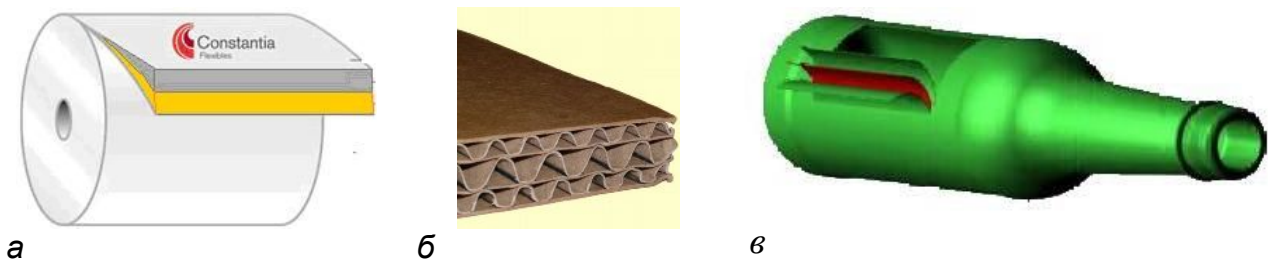
РІЗАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Гуць В.С., д.т.н., професор

Губеня О.О., к.т.н., доцент

Національний університет харчових технологій

Значна частина пакувальних матеріалів для харчових продуктів - багатошарові. Наприклад, пакувальні плівки (рис. 1а), гофрований картон [2] (рис. 1б), деякі види ПЕТ-пляшок (рис. 1в). Тонкий шар тонувальної плівки може наклеюватись на основні пакувальні матеріали (картон, пінопласт), зміцнюючи їх. З виробничого досвіду, а також згідно останніх наукових досліджень відомо, що процес різання таких матеріалів має певні особливості порівняно з однорідними матеріалами.



*Рис. 1. Багатошарові пакувальні матеріали
а – плівка; б – гофрокартон; в – ПЕТ-пляшка.*

Виробники різального обладнання, а також різальних механізмів пакувального обладнання часто не враховують структуру матеріалу при виборі умов та режимів різання.

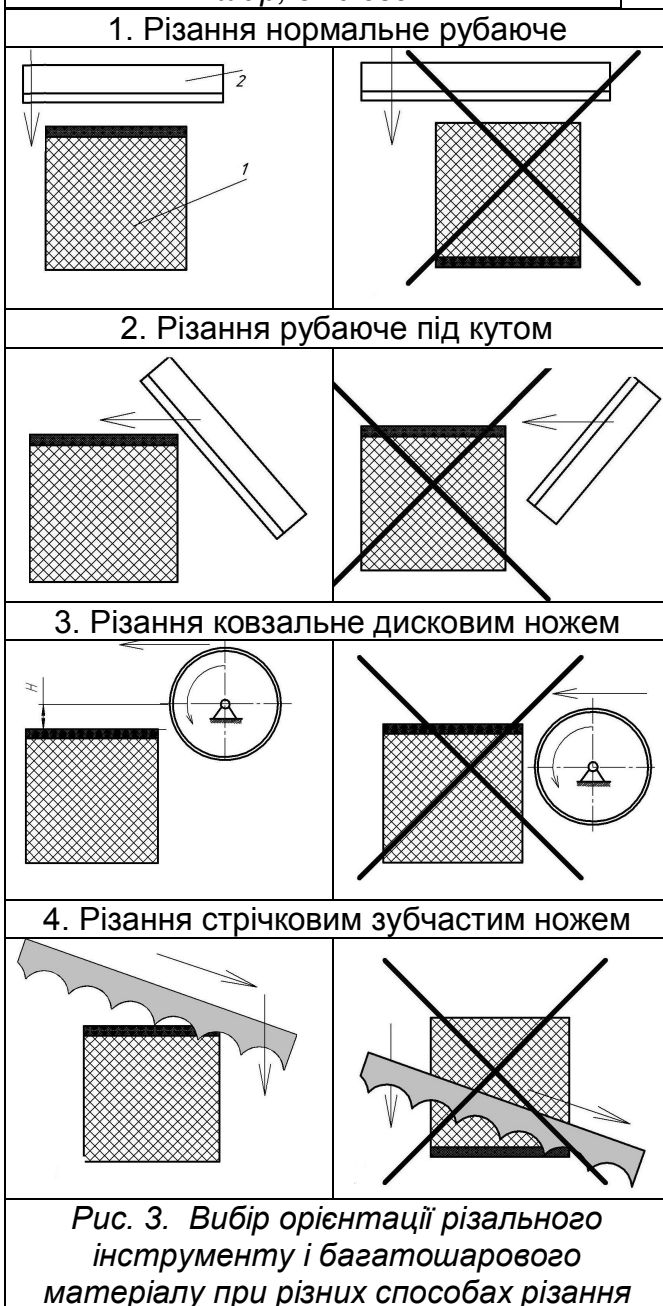
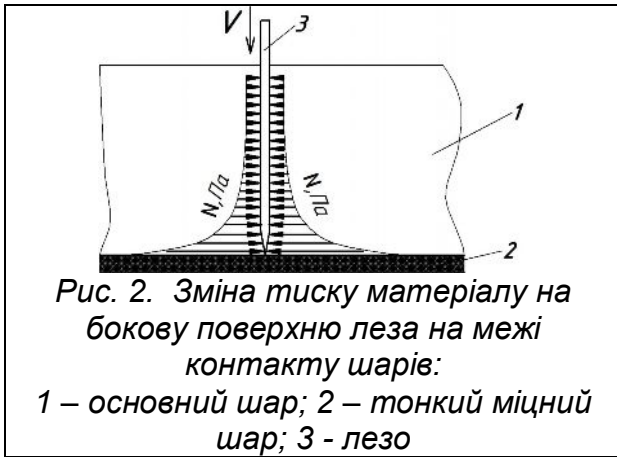
Основна особливість різання багатошарових матеріалів – залежність зусилля різання та якості процесу від:

- розміщення шарів матеріалу відносно руху леза
- конструкції леза та основи, на якій знаходиться матеріал
- способу фіксації матеріалу при різанні

Розглянемо перший випадок.

Зазвичай багатошарова плівка складається з більш товстого основного формоутворюючого шару, і тонкого, який використовується для зміцнення структури, захисту основного шару від вологи і газового середовища. Основний шар зазвичай виготовляється з більш дешевого матеріалу на паперовій, полімерній або іншій подібній основі, показники міцності якої невисокі. Тонкий шар зазвичай має інші властивості – високі порівняно з основою модуль пружності та міцність. Всі шари з'єднані між собою зварюванням або склеюванням. Тоді шар клею можна розглядати як окремий елемент матеріалу.

Лезо при русі деформує матеріал на глибину, рівну товщині леза. При цьому стискаються бокові поверхні леза, і виникають сили тертя, які чинять опір його руху (рис. 2).



Якщо на виході леза розміщено міцний шар іншого матеріалу, він не дозволяє деформуватись навколишнім шарам. Так як лезо все одно деформує матеріал на величину своєї товщини, то зусилля стискування ним леза на межі контакту шарів значно зростає. Відповідно зростає зусилля тертя і загальний опір руху леза.

Розрізавши товстий шар, лезо з легкістю розрізає тонкий міцний шар. Найбільше ж зусилля опору руху (рис. 2) буде на межі контакту шарів.

Збільшення зусилля різання при розміщенні оболонки або міцного шару на виході леза не є єдиним недоліком даного способу різання. При збільшенні опору руху різальна кромка леза викривлюється, лезо перестає рухатись в потрібному напрямку, внаслідок чого матеріал значно деформується під фаскою леза, поверхня зрізу стає нерівною, крихкі матеріали руйнуються хаотично.

Якщо оболонка або інший міцний шар розміщений на вході леза в матеріал, то лезо його легко розрізає. Нижче розміщений шар не буде чинити значного опору деформування матеріалу.

Отже, при різанні лезо спочатку має розрізати тонкий міцний шар, а потім – основний, товстий шар матеріалу (рис. 3). При цьому буде забезпечено нижчі енерговитрати на процес різання і високу його якість поверхні зрізу.

В більшості випадків для пакувальних матеріалів (рис. 3, випадок 1) використовується нормальний рубаючий спосіб різання

або рубаючий під кутом. Ковзальне різання застосовується рідше.

Розміщення леза при різанні під кутом (рис. 3, випадок 2) теж дозволяє знизити зусилля різання. Спочатку розрізається оболонка, а за нею основна маса матеріалу. В іншому випадку оболонка постійно знаходиться на виході леза і чинить значний опір деформуванню матеріалу, і відповідно, збільшує зусилля тертя.

При різанні дисковим ножом (рис. 3, випадок 3), коли вісь його обертання розміщена над матеріалом, спочатку розрізається тонкий міцний шар. При розміщенні осі обертання нижче тонкого шару – виникає додаткове тертя.

Аналогічно вибирається орієнтація матеріалу при різанні стрічковим зубчастим ножом (рис. 3, випадок 4).

При різанні дисковим або стрічковим ножами виникає додаткове ковзання матеріалу по їх боковим поверхням. Збільшення бокового тиску на ніж на межі контакту шарів ще більш негативно впливає на процес різання, так як сила тертя збільшується багатократно порівняно з рубаючим різанням.

При проектуванні різального обладнання необхідно визначити потужність його приводу. Відома проста методика визначення зусилля та потужності різання [1]. Вона базується на використанні експериментальної установки маятникового типу. За допомогою отриманих математичних моделей [1] результати експерименту легко переносяться на промислове різальне обладнання.

Розглянемо особливості моделювання різання різних матеріалів.

При **різанні матеріалу з однорідною структурою** на лезо діють зусилля різання F_r , динамічного тертя G та інерції P_i .

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

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

де C , k_1 – коефіцієнти, які характеризують тертя; y , V , a – переміщення, швидкість руху та прискорення леза в матеріалі.

Диференціальне рівняння руху леза:

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

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

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

Аналіз рівняння (4) та отриманих результатів показано в роботі [1].

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

Особливістю **різання багатошарових матеріалів** є те, що на межі контакту шарів на лезо діє значне короткочасне (миттєве) зусилля F_M , яке направлене перш за все на подолання сил тертя.

Рівняння руху леза буде таким:

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

Миттєве зусилля може змінюватись за законами $F_M = Be^{-bt}$ або $F_M = Ae^{-B(\ln t)^2}$. Графічно воно зображується як швидко спадаюча залежність (рис. 4). Тривалість його дії $0 - t_1$ значно менша, ніж тривалість переміщення леза в матеріалі.

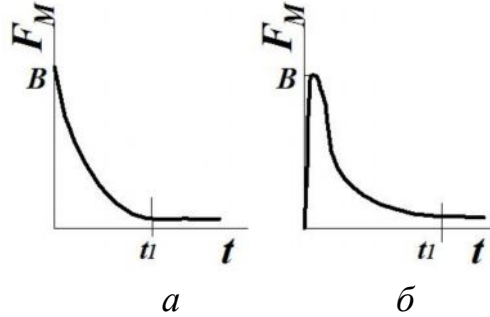


Рис. 4. Зміна миттєвого зусилля за часом:

а) $F_M = Be^{-bt}$; б) $F_M = Ae^{-B(\ln t)^2}$

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

$$F_r + (C + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + Be^{-bt} = 0 \quad (8)$$

Розв'язавши рівняння, при початкових умовах $t=0 \Rightarrow x(0)=0, V(0) = V_0$ отримуємо переміщення (9), швидкість леза (10) та зусилля різання (11).

$$y(t) = \frac{m(1 - e^{-\frac{k_1 t}{m}})(V_0 k_1 + C + F_r)}{k_1^2} + \frac{\mu_1 (B(1 - e^{(bt)}) + bt(C + F_p)) - mb(bt(C + F_r) + B(1 - e^{-\frac{k_1 t}{m}}))}{(mb - k_1)k_1 b} \quad (9)$$

$$V(t) = \frac{e^{-\frac{k_1 t}{m}}(V_0 k_1 + C + F_r)}{k_1} + \frac{k_1 (Bbe^{(-bt)} + b(C + F_p)) - mb(b(C + F_r) + \frac{Bk_1 e^{-\frac{k_1 t}{m}}}{m})}{(mb - k_1)k_1 b} \quad (10)$$

$$F_r = \frac{Vk_1 mb - Vk_1^2 + e^{-\frac{k_1 t}{m}}(-V_0 k_1 mb + V_0 k_1^2 - mbC + Bk_1) + k_1 C - k_1 B e^{(-bt)} - k_1 C + Cbm}{e^{-\frac{k_1 t}{m}}(mb - k_1) + k_1 - mb} \quad (11)$$

На рис. 5 показано, як змінюється миттєве зусилля в залежності від показника степені b , на який, в свою чергу, впливають міцність та структурно-механічні властивості оболонки.

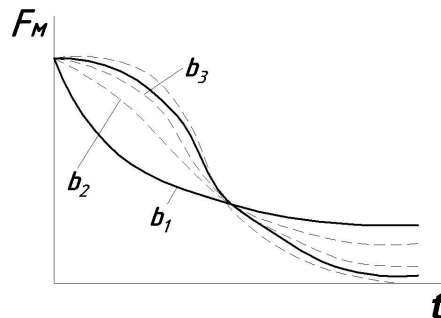


Рис. 5. Залежність миттєвого зусилля F_M від показника степені b .

Отже, крім визначення зусилля різання, результати моделювання можна застосувати для визначення структурно-механічних характеристик матеріалу та його шарів.

Визначивши швидкість леза і зусилля різання, визначаємо потужність різання як добуток зусилля різання на швидкість леза.

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

де F_{rm} - максимальне зусилля різання.

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

$$F_r + (C + k_1 \frac{dy(t)}{dt}) + m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + Ae^{-B(\ln t)^2} = 0 \quad (12)$$

Рівняння (12) при використанні сучасних комп'ютерних методів має громіздкий розв'язок, включає специфічні математичні функції, які незручні при практичному використанні. Можна рекомендувати до використання наближені або чисельні методи. Наприклад, отримати розв'язок у вигляді збіжного ряду.

Зміну середнього питомого зусилля різання багатошарових матеріалів **підтверджено експериментально**. Згідно рівняння (4) отримано зусилля різання деяких багатошарових матеріалів.

Тонкий міцний шар розміщався на вході або виході леза з матеріалу. При окремому різанні зусилля різання цього шару настільки мале, що не фіксувалось приладами. Але, при багатошаровому різанні, коли тонкий міцний шар розміщений на виході леза з матеріалу, середнє зусилля різання зростає.

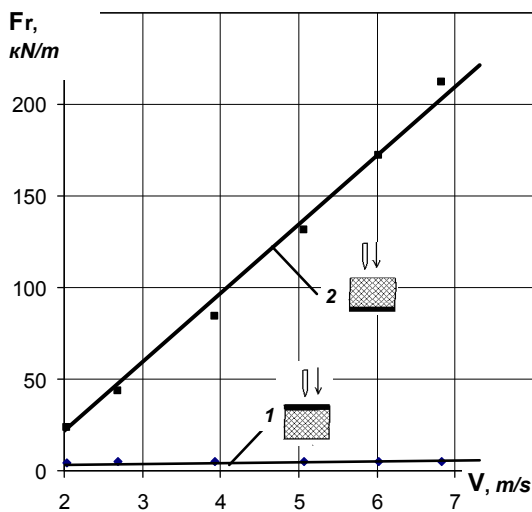


Рис. 6. Залежність зусилля різання пінопласту ($h=10\text{мм}$) з наклеєною тонучою плівкою:
1 – плівка на вході леза;
2 – на виході

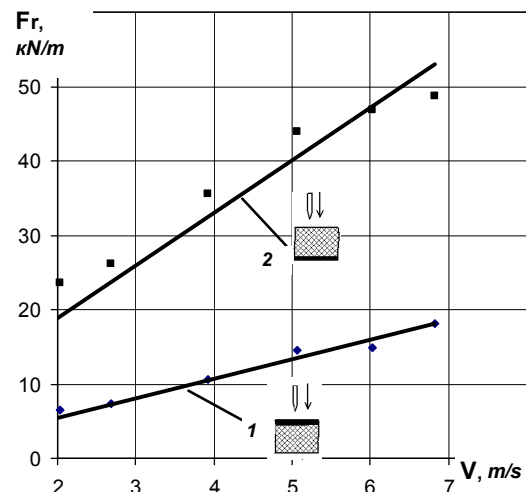


Рис. 7. Залежність зусилля різання запаяної блістерної упаковки:
1 – шар фольги на вході леза;
2 – на виході

Використано модельний матеріал – пористий пінопласт товщиною 10 мм, з наклеєною тонучою полімерною плівкою. При розміщенні плівки на виході

леза з матеріалу (рис. 6) зусилля різання в понад 50 раз більше, ніж при розміщенні плівки на вході лека.

Схожі результати отримано при різанні блістерної упаковки (рис. 7), яка складається з шару слабопластифікованого ПВХ товщиною 0.4 мм і тонкого міцного шару алюмінієвої фольги.

Отримані результати підтверджують зроблені висновки про вибір способу різання багатошарових матеріалів та раціональну орієнтацію шарів відносно руху лека.

Висновки.

1. При різанні багатошарових матеріалів на межі контакту шарів зусилля різання збільшується за рахунок стискування матеріалом бокових поверхонь лека та сил тертя, які при цьому виникають.
2. Матеріал при різанні необхідно орієнтувати так, щоб спочатку розрізався тонкий міцний шар, а потім інші, менш міцні шари. Це забезпечить низькі енерговитрати, високу якість різку та зносостійкість лека.
3. Розроблені математичні моделі (4, 10, 11) дозволяють визначити зусилля та потужність різання однорідних і багатошарових матеріалів.

Література.

1. Гуць В.С., Губеня О.О. Моделювання процесу різання харчових продуктів // Товари і ринки. – 2007. - № 2. - С.107-114.
2. 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]
3. С. Стефанов, Ч. Саздов Състояние и тенденции при производството на PET бутилки. // ХВП. № 6, 2009. [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 September 2010, vol.2, p.1168-1173. [Serbia]
5. <http://www.vishalpacks.com/corrugated-packaging-products.htm>

Анотація.

Багато пакувальних матеріалів є багатошаровими. Встановлено особливості їх різання. Розроблено математичні моделі, які дозволяють визначити швидкість лека, зусилля та потужність різання. Надано рекомендації щодо способу різання багатошарових матеріалів.

Summary.

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