

Висікання розгорток картонних паковань (аналіз явищ, що супроводжують процес)

Я.І. Чехман, д.т.н., С.В. Терницький, Українська академія друкарства, м. Львів

У спеціальній літературі [1–4] не розкрито фізична суть руйнування матеріалу у процесі висікання картону. Водночас такий аналіз може сприяти формулюванню вимог щодо інструменту з урахуванням властивостей і параметрів картону.

Розглянемо загальноприйнятий підхід [2, 4] до визначення зусиль висікання і ті особливі властивості картону, без урахування яких неможливе розкриття фактичної картини руйнування матеріалу.

Зробивши припущення, що матеріал картону однорідний, прикладене до висікальної лінійки із двобічним заточенням зусилля різання визначають такими складовими (рис. 1):

- проекція на вертикальну площину від лобового зусилля:

$$P_{л}^e = 2P_{л} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

де $P_{л}$ — функція характеристики матеріалу під час торцевого стиснення, величини врізання лінійки в картон (s_l) і кута загострення лінійки ($\sin \frac{\alpha}{2}$);

- проекція на вертикальну площину сил тертя, що виникають між гранями заточеної лінійки і картоном:

$$P_{мп}^e = 2P_{л} \cdot f \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (2)$$

де f — коефіцієнт тертя ковзання;

- вертикальне зусилля, що діє на радіусі заокруглення різальної крайки висікальної лінійки, умовно назване руйнівним (P_p), що є функцією певної характеристики картону (E), його товщини (δ) і радіуса заокруглення (r) різальної крайки інструменту.

Руйнування матеріалу відбувається в разі досягнення вертикальним зусиллям критичного значення шляхом руйнування міжмолекулярних зв'язків і молекулярної структури та частковим витискуванням дискретних частинок у близько розміщені периферійні зони різання.

Отже, сумарне лінійне зусилля висікання картону становитиме:

$$q_e = \frac{1}{l} \left(P_{л}^e + P_{мп}^e + P_p \right) = 2q_{л} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + 2q_{л} \cdot f \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + q_p, \quad (3)$$

де l — довжина висікальної лінійки.

Деформаційна характеристика картону в торцевому напрямку під час стиснення, унаслідок його різношарової будови за товщиною, може дати тільки наближену оцінку лобового зусилля на лінійку і, відповідно, сили тертя.

Щодо зусилля руйнування, то воно змінюватиметься пропорційно площі тиснення, яка залежатиме від радіуса заокруглення різальної крайки висікальної лінійки. Радіус заокруглення лінійки у процесі штанцювання внаслідок зношування збільшується, що призводить до суттєвого

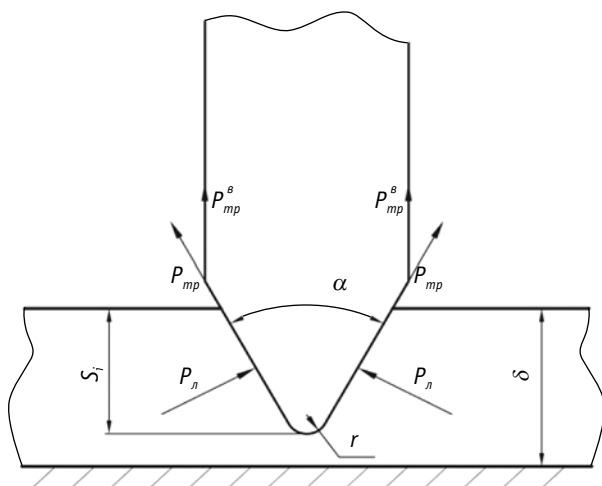


Рис. 1. Схема дії сил для визначення зусилля висікання

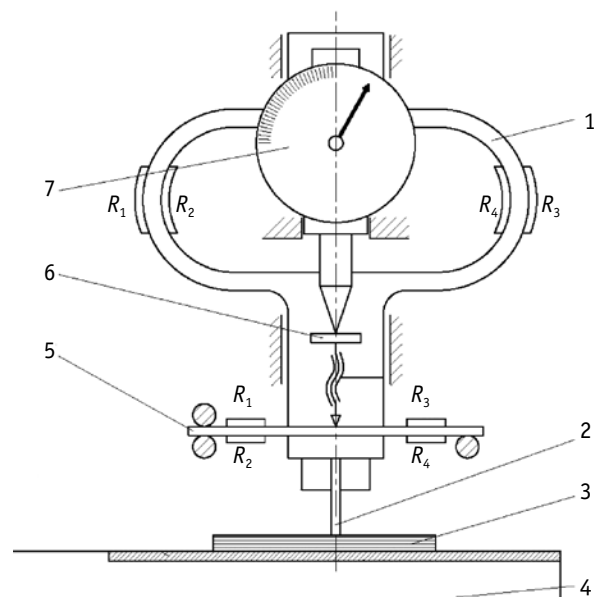
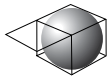


Рис. 2. Принципова схема приладу для визначення зусиль руйнування картону і переміщення повзуна



зростання сили, яке обмежує її придатність для подальшої експлуатації.

Для експериментального дослідження напруження, за якого відбувається руйнування картону, були використані вже відомі прилад і методика [5]. Принципова схема приладу представлена на рис. 2. Зусилля вимірювалось за допомогою тензорезисторів, наклеєних на динамометричну скобу 1, що з'єднана з висікальною лінійкою 2, котра врізається в зразок картону 3, установлений на опорну плиту 4. Переміщення скоби здійснювалось цикловим механізмом, який приводиться в рух від окремого електродвигуна. Аналогічно реєстрації зусилля у вигляді графіка проводилась реєстрація переміщення скоби (лінійки) шляхом вимірювання деформації двоопорної балки 5 гвинтом 6, що закріплений на скобі. Для тарування величини переміщення застосовувався індикатор годинникового типу 7. За початок відліку переміщення приймався початок зростання зусилля. Комп'ютерна обробка цих двох графіків дозволила отримати залежність зусилля від переміщення. Для даного експерименту як лінійка була використана сталевая пластина прямокутної форми із плоскою натисковою поверхнею 0,2x13 мм. Для з'ясування характеру руйнування картону та виявлення впливу на величину зусиль руйнування напрямку відриву волокон та його товщини для експерименту було відібрано картон хром-ерзац крейдований і некрейдований із градацією товщини 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 мм.

На рис. 3 представлено типовий первинний запис зміни зусилля q і переміщення s за часом при вдавлюванні пластини із плоскою торцевою поверхнею в картон хром-ерзац із крейдованим покриттям товщиною 0,6 мм, розміщений у напрямку волокон, а на рис. 4 — оброблений вторинний запис функціональної залежності тиску P від переміщення пластини в тілі картону $q = f(s)$.

На ділянці AB відбувається стиснення картону до його руйнування в точці B . Для картону різної товщини ступінь відносного стиснення до руйнування становить 0,8–0,9, тобто стиснення досягає 80–90 %. У такому вигляді його густина збільшується у 8–9 разів і стає близькою до густини сталі. На ділянці BC зруйнована структура картону видавлювалась у периферійні зони і частково зберігалась на опорній поверхні у вигляді пилу (можна було спостерігати після завершення процесу руйнування картону).

Аналіз отриманих експериментальних даних показує (рис. 5), що напруження руйнування для крейдованого і некрейдованого картону товщиною від 0,3 до 0,7 мм (через кожні 0,1 мм зміни його товщини) виявилось практично однаковим і змінювалось у межах 250–270 МПа. Напруження руйнування цих видів картону в разі розміщення лінійки поперек волокон для картону із крейдованим покриттям було вищим на 30 % і становило 340–350 МПа, а для картону без крейдованого покриття було вищим приблизно на 20 % і становило 305–310 МПа. Зусилля висікання на різних видах картону за поперечно-розташування інструментів відносно напрямку волокон картону більші, ніж зусилля, що виникають у разі їхнього поздовжнього розташування. Це збільшення коливається в межах 20–40 %. Така закономірність пояснюється більшою ущільненістю матеріалу, що припадає на інструмент у поперечному напрямку. Картон — матеріал, який складається головним чином з переплетених і скріплених між собою рослинних волокон, що містять целюлозу. Товщина волокон становить 0,02–0,05 мм, а довжина в 100–1000 разів перевищує товщину [4]. Макромолекули целюлози в рослинних клітинах розміщуються паралельно одна одній, утворюючи фібрили, що є структурними елементами волокна. Це видно із збільшених зображень поперечного зрізу картону (рис. 6).

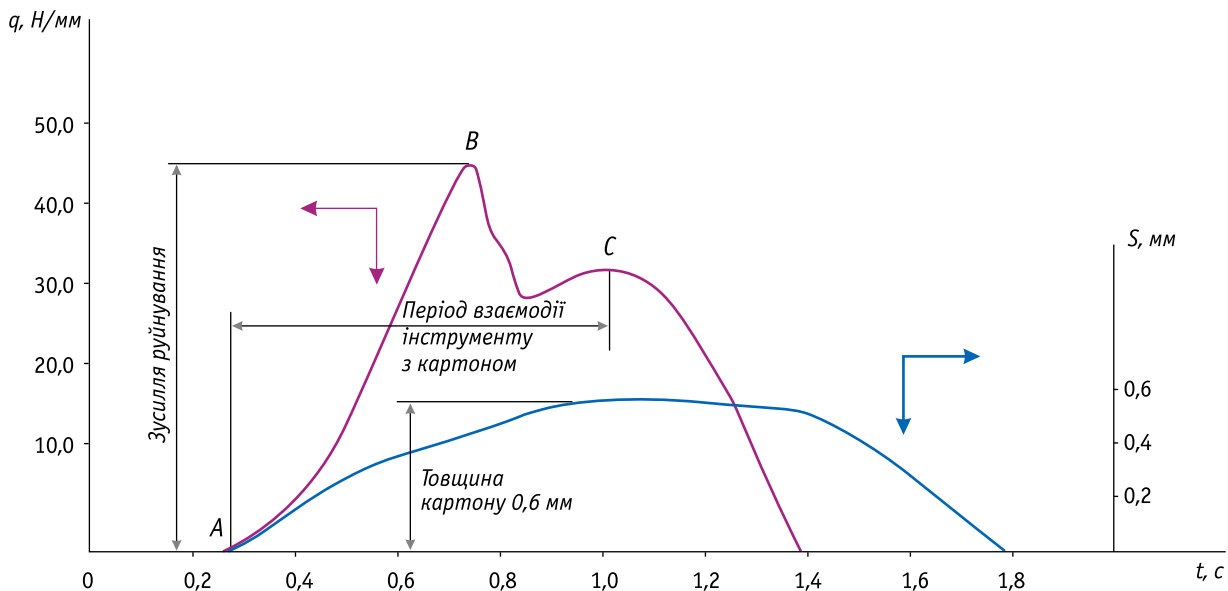


Рис. 3. Типовий первинний запис зміни зусилля (—) і переміщення (—) під час вдавлювання пластини із плоскою поверхнею

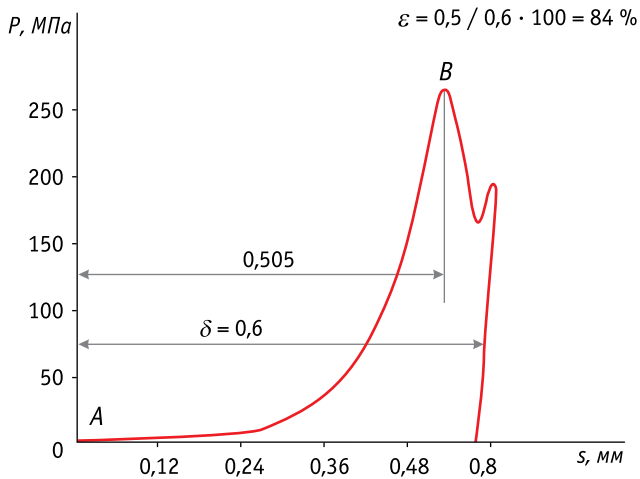


Рис. 4. Оброблений вторинний запис функціональної залежності тиску від переміщення

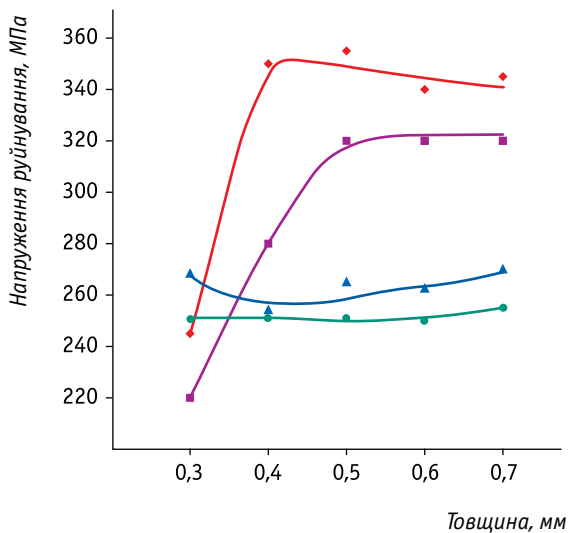


Рис. 5. Залежність напруження руйнування картону хром-ерзац лінійкою із плоскою натискною поверхнею від його товщини:

- крейдований: вздовж (—▲—), поперек (—♦—) волокон;
- некрейдований: вздовж (—◆—), поперек (—■—) волокон

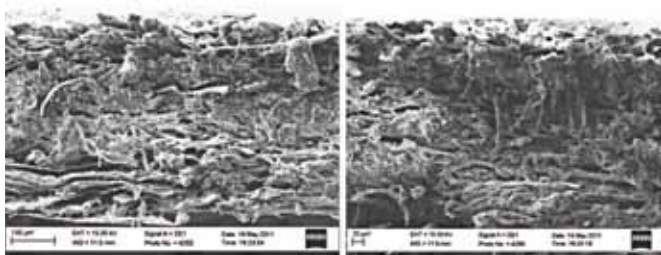


Рис. 6. Структура картонного аркуша у поздовжньому розрізі

Ступінь орієнтації макромолекул впливає на міцність целюлозних волокон у поперечному напрямку. Целюлоза — полімер, що складається із глюкозидних кілець, які з'єднуються між собою глюкозидним зв'язком, а між молекулами целюлози утворюється значно слабший водневий зв'язок. Таким чином, міцність картону загалом істотно менша за міцність самих волокон, із яких він виготовлений, оскільки слабким місцем у картоні є не середня міцність волокон, а міцність зв'язків між ними. Так, під час розрізування картонної заготовки вздовж волокон руйнуються міжмолекулярні зв'язки, які значно слабші за зв'язки всередині волокна целюлози, а розрізування поперек волокон потребує створення додаткового зусилля для руйнування волокна.

Зусилля висікання за допомогою лінійки із плоскою поверхнею не залежить від товщини картону, а лише від типу картону та напрямку волокон. Однак дослідження зусилля висікання звичайною висікальною лінійкою показало, що воно також зростає із збільшенням товщини картону [5]. На рис. 7 представлено функціональну залежність зусилля висікання від величини врізання в товщу картону для картону одного типу двох товщин. Різницю у величині зусилля під час висікання зразків картону різної товщини можна пояснити тим, що стиснення (ущільнення) матеріалу відбувається під не лише загостреною крайкою, але й бічними гранями лінійки. Виходячи із сказаного, зусилля стиснення залежатиме від товщини матеріалу і, звичайно, від кута загострення лінійки.

Разом з тим під час висікання звичайною висікальною лінійкою утворюється лобова сила, що діє перпендикулярно до граней лінійки. Ця лобова сила, за припущенням, розриває картонну заготовку, що зменшує загальне технологічно-необхідне зусилля висікання [6]. Залежно від товщини картону зростає значення лобової сили, що збільшує значення загального зусилля.

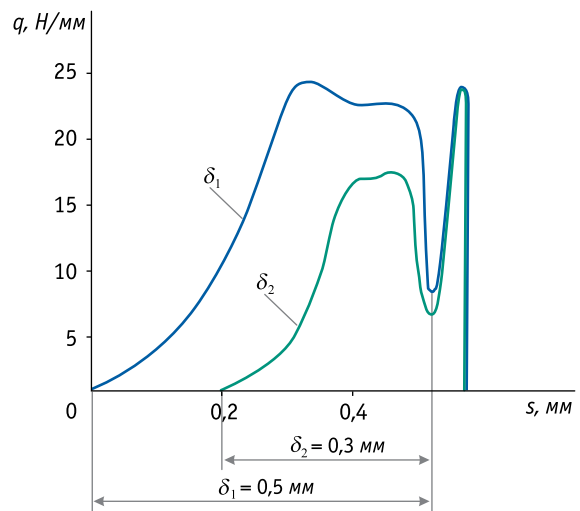
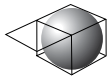


Рис. 7. Функціональна залежність лінійного зусилля висікання від величини врізання в товщу картону за різної товщини картону



Можна припустити, що вертикальна складова зусилля стиснення є вирішальною у величині загального зусилля висікання. Оцінка величини вертикального зусилля стиснення, яка сягає критичного значення до початку руйнування матеріалу, може бути визначена наступним шляхом. Фізичними характеристиками, що взаємопов'язують напруження та деформацію картону, є модуль умовної пружності E_y і показник степеня n , що знаходяться на підставі експериментально отриманої залежності ($\sigma = f(\varepsilon)$) [7], яка відображається формулою:

$$\sigma = E_y \left(\frac{\lambda_x}{\delta} \right)^n, \quad (4)$$

де λ_x — поточне значення деформації стиснення матеріалу; δ — товщина картону.

Для визначення зусилля висікання знаходимо фізичні характеристики картону під час стиснення — модуль умовної пружності E_y і показник степеня n . На підставі експериментальної діаграми стиснення картону, прологарифмувавши (4), отримуємо:

$$\lg \sigma = \lg E + n \cdot \lg \left(\frac{\lambda}{\delta} \right). \quad (5)$$

Проведемо заміни: $\lg \sigma = Y$, $\lg E = A$, $\lg \left(\frac{\lambda}{\delta} \right) = X$. Таким чином отримаємо лінійну залежність замість степеневі:

$$Y = A + n \cdot X. \quad (6)$$

На підставі експериментальної діаграми обробленого вторинного запису функціональної залежності тиску від переміщення, що приведені на рис. 4, для двох точок знаходимо значення X та Y . Отримуємо систему двох рівнянь із двома невідомими і визначаємо значення показника степеня n :

$$\begin{cases} Y_1 = A + n \cdot X_1 \\ Y_2 = A + n \cdot X_2 \end{cases} \Rightarrow n = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}.$$

Модуль умовної пружності картону:

$$E_y = \frac{\sigma}{\left(\frac{\lambda}{\delta} \right)^n}. \quad (7)$$

Оскільки картон — анізотропний матеріал, він має різні характеристики під час стиснення залежно від напрямку розташування волокон відносно лінійки. Для отримання достовірних характеристик E_y і n необхідно натискний елемент розташовувати відповідно вздовж або поперек волокон, а співвідношення сторін натискної площадки повинно становити 1 : 50–100. Різниця під час стиснення картону вздовж та поперек волокон наявна через процес зрізання міжволоконних зв'язків у разі стискування вздовж волокон, а за поперечного стиснення відбувається процес руйнування самих волокон (рис. 8).

На рис. 9 показана розрахункова схема визначення зусилля стиснення картону. Напруження стиснення картону у перерізі, що визначається координатою X :

$$\sigma_x = E \left(\frac{X}{\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right)^n, \quad (8)$$

де $\frac{X}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \lambda_x$ — поточне значення деформації стиснення картону.

Сумарне вертикальне навантаження (ураховуючи двобічне стиснення):

$$P = 2l \cdot \int_0^{0,9\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \sigma_x dX = 2l \cdot E \cdot \int_0^{0,9\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \left(\frac{X}{\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right)^n dX, \quad (9)$$

де l — довжина висікальної лінійки.

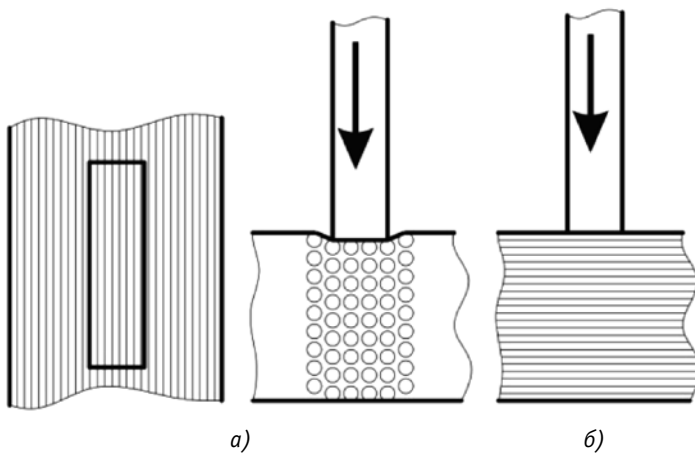


Рис. 8. Умовне зображення процесу стиснення картону вздовж (а) та поперек (б) волокон

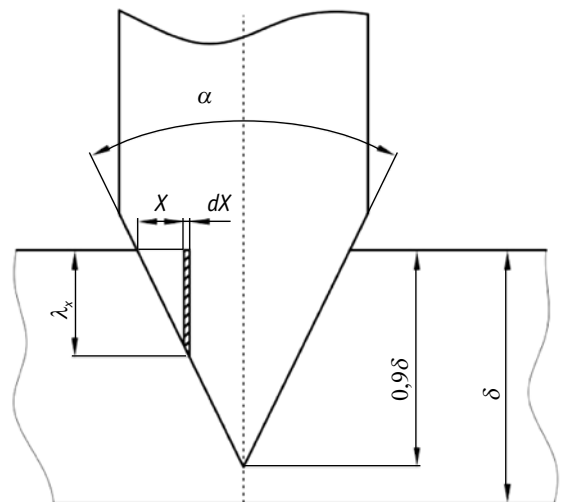


Рис. 9. Схема для визначення зусилля стиснення картону

Розв'язок рівняння (9) матиме вигляд:

$$P = 2l \cdot E \left(\frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right)^n \cdot \int_0^{0,9\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} X^n dX =$$

$$= 2l \cdot E \left(\frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right)^n \cdot \frac{\left(0,9\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{n+1}}{(n+1)};$$

$$P = 2l \cdot E \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cdot \delta (0,9)^{n+1}}{(n+1)}.$$

На основі отриманих експериментальних діаграм стиснення лінійкою із плоскою натискною поверхнею (13x0,2 мм) вздовж волокон були визначені фізичні показники для крейдованого картону хром-ерзац: для $\delta = 0,3$ мм модуль умовної пружності $E_y = 363,6$ МПа, показник степеня $n = 3,1$; для $\delta = 0,5$ мм $E_y = 300,3$ МПа, $n = 3,51$. Підставивши отримані значення в (10) для двох експериментальних діаграм, зображених на рис. 7, на довжину контакту $l = 1$ мм, отримуємо величину сумарного вертикального стиснення: $P_{0,3} = 12,2$ Н, $P_{0,5} = 20,2$ Н.

Отримане відношення вертикальної складової від стиснення картону до загального технологічно-необхідного зусилля висікання відповідно становить 72 і 83 %.

Однак реальна висікальна лінійка має радіус заокруглення крайки ріжучого леза, який у випадку нашого експериментального дослідження становив 9 мкм. Загальне зусилля висікання включатиме зусилля, що витрачається на руйнування картону за радіусом заокруглення R крайки ріжучого леза висікальної лінійки. Схема для розрахунку зусилля висікання представлена на рис. 10.

Стиснення картону боковими гранями висікальної лінійки проходить до досягнення максимального значення деформації стиснення картону $\lambda_{x_{max}}$:

$$\lambda_{x_{max}} = \frac{\left(\delta - R \left(1 - \cos \left(90 - \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

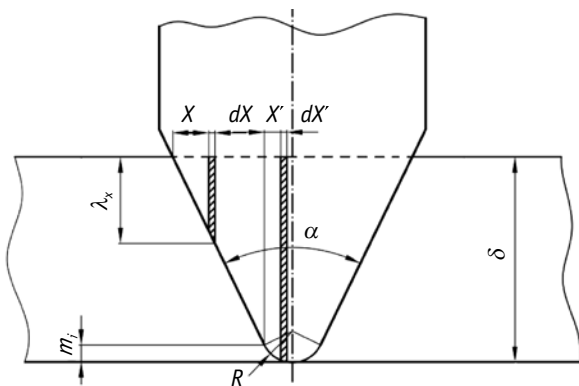


Рис. 10. Схема до визначення зусилля стиснення картону

Деформація картону за радіусом заокруглення проходить до досягнення поточним значенням деформації величини:

$$\lambda'_x = \lambda_{x_{max}} + m_i = \left(\delta - R \left(1 - \cos \left(90 - \frac{\alpha}{2} \right) \right) \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + m_i.$$

Із трикутника OAB (рис. 11) маємо:

$$m_i^2 + 2R \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot m_i - 2R \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot X' + X'^2 = 0.$$

Із рівняння (13), ігноруючи m_i^2 , як величину другого порядку малості:

$$m_i = \frac{2R \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot X' + X'^2}{2R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

Ураховуючи (14), запишемо аналітичну залежність для визначення величини сумарного вертикального зусилля висікання картону:

$$P = \frac{2l \cdot E_y}{\left(\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^n} \cdot \int_0^{\left(\delta - R \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right) \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} X^n dX +$$

$$+ \frac{2l \cdot E_y}{(\delta)^n} \int_0^{R \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} \left[\left(\delta - R \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right) \right) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2R \cdot X' \cdot \cos \frac{\alpha}{2} + X'^2}{2R \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \right] dX'.$$

З урахуванням експериментально знайдених характеристик картону (E_y, n) отримана аналітична формула для визначення технологічно необхідного зусилля висікання, що враховує кут заточування лінійки і радіус заокруглення крайки леза. Зокрема, встановлено, що вертикальна складова від стиснення картону висікальною лінійкою з кутом заточки $\alpha = 52^\circ$ і $R = 0,009$ мм становить $\sim 80\%$ від загального зусилля висікання.

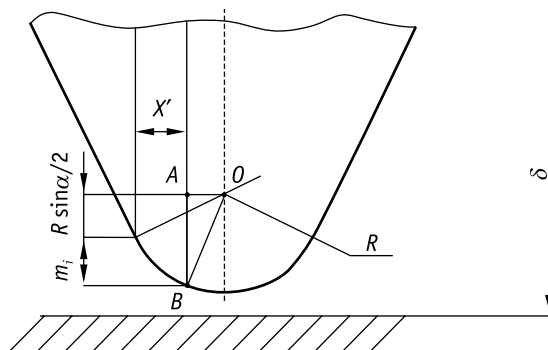


Рис. 11. Схема для визначення поточного значення стиснення картону лінійкою із заокругленою ріжучою крайкою



Література

1. *Банах Ю.О.* Експериментальне дослідження процесу штанцювання на пресах тигельного типу з підвищеною точністю базування його робочих органів // Поліграфія і видавнича справа. — № 34. — Львів: УАД, 1998 — С. 159–163.
2. *Банах Ю.О.* Технологічні навантаження в процесі штанцювання і шляхи їх зменшення // Поліграфія і видавнича справа. — № 32. — Львів: УАД, 1997 — С. 67–70.
3. *Грушко И.М.* Основы научных исследований / И. Грушко, В. Сиденко. — Харьков: «Вища школа», 1983. — 224 с.
4. *Регей I.I.* Теорія розрахунку засобів і процесу вирізування зовнішніх випуклих криволінійних контурів у розгортках картонного пакування [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://druk.kpi.ua/files/publications/8707-4_5-04.pdf
5. *Терницький С.В.* Дослідження зусиль висікання розгортки картонних пакувань // Упаковка. — 2011. — № 3. — С. 28–31.
6. *Хведчин Ю.И.* Резальные машины и комплексы POLAR: Учеб. пос. / Ю.И. Хведчин, Ю.А. Шостачук, М. Оучар. — К.: ПКТ «СТ-Друк», 2004. — 204 с.
7. Друкарське устаткування / Я.І. Чехман, В.Т. Сенкус, В.П. Дідич, В.О. Босак. — Львів: УАД, 2005. — 470 с. *Ж*

Высекание разверток картонных упаковок (анализ явлений, сопровождающих процесс) Я.И. Чехман, д.т.н., С.В. Терницький

В статье рассмотрен общепринятый подход к определению усилий высекания, оценен характер разрушения картона и выявлено влияние на величину усилия разрушения направления расположения волокон и его толщины. Авторами выведена аналитическая зависимость суммарных вертикальных усилий, возникающих в процессе высекания разверток картонных упаковок.

Ключевые слова: усилие технологическое; высекание; пресс высекающий; линейка высекающая; развертка упаковок; картон.

Diecutting the involute of cardboard package (analysis of the phenomn that accompany the process) Y.I. Chekman, Dr., S.V. Ternitsky

Considered generally accepted approach of identifying cutting efforts, evaluated the nature of the destruction of cardboard and found effects on the size of destruction efforts according to separation of fibers and its thickness. Displaying analytical dependence of the total vertical efforts that arise in the process of diecutting cardboard packages.

Key words: technological effort; carving; carving press; carving line; involute of packing; cardboard.

ЭЛИТНАЯ УПАКОВКА ДЛЯ ЛИКЕРО-ВОДОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ



ООО "ПП" СЕРВИС ПАК"

+38 057 736 0343

+38 050 302 5841

+38 057 754 7879

+38 050 400 7324

office@service-pack.com.ua www.service-pack.com.ua

