

УДК 676.81.052

Книш О.Б., к.т.н., Слобода Т.В.

Українська академія друкарства

МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ КАРТОНУ ПРИ НОЖИЧНОМУ РІЗАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГОСТРОГО НОЖА ТА НЕЗАГОСТРЕНОГО КОНТРНОЖА

За результатами проведеного аналізу наукових праць обґрунтовано доцільність та наведено методику досліджень механіки руйнування картону при ножичному різанні. Розглянуто схему взаємодії різальних інструментів та картону на підставі чого виведено залежності для аналітичного визначення лінійних зусиль залежно від виду картону, конструкції різальних інструментів та технологічних параметрів. Аналітично обґрунтовано зменшення технологічних зусиль завдяки виникненню руйнівних напружень зрізу, що на порядок менші від напружень стиску, які виникають при висіканні. Розроблено рекомендації щодо вибору зазору між ножами залежно від товщини картону за умови мінімізації лінійних зусиль та забезпечення необхідної якості виготовлення контуру картонної розгортки.

Механіка руйнування, лінійне зусилля, ножичне різання, ніж, картон, напруження

Постановка задачі. Виготовлення розгорток картонних паковань штанцюванням супроводжується виникненням значних технологічних зусиль. Для їх зменшення в Українській академії друкарства запропоновано виготовляти контури розгорток методом ножичного різання [1]. Метою статті є обґрунтування зменшення технологічних зусиль, для чого досліджено механіку руйнування картону при ножичному різанні.

Аналіз наукових досліджень. У літературних джерелах [2, 3, 4] наведено методику розрахунку зусиль при виготовленні розгорток картонних паковань методами ножового різання та вирізування. Автор [2] встановив порівняльні характеристики руйнування картону при ножовому та ножицевому способі розділення матеріалу, але характер зміни технологічних зусиль провів лише для висікання розгорток картонних паковань. У роботі [3] розраховано погонні зусилля виготовлення картонних паковань при вирізуванні контурів, однак не розкрита механіка руйнування матеріалу, що не дає змогу оцінити характер зміни критичних напружень. У роботі [4] встановлена залежність технологічних зусиль від переміщення висікального ножа при ножовому розділенні матеріалу, проте не виокремлено ділянку на якій напруження стиску переходять у напруження розтягу.

Виклад основного матеріалу роботи.

Враховуючи відсутність досліджень механіки руйнування картону при виготовленні картонних паковань методом ножичного різання у даній статті наведено методику та результати відповідних досліджень. Розглянемо схему взаємодії різальних інструментів та картону для випадку «гострий ніж» - «незагострений контрніж» (див. рис.1).

Момент виникнення руйнівного напруження при різанні визначається зусиллям F_p , яке прикладене до ножа і котре переборює ряд опорів різанню, що виникають у оброблюваному матеріалі. У більшості випадків при різанні неоднорідних анізотропних матеріалів зусилля F_p складається із суми зусилля необхідного для стиснення картону та його безпосереднього зрізу.

Розглянемо вказану взаємодію леза ножа із картоном у найбільш простому випадку - при його входженні в матеріал у перпендикулярному по відношенні до крайки напрямку.

При заглибленні леза ножа в картон товщиною h (див.рис.1) на величину $h_{ст}$ на його крайці виникає руйнівне напруження, що спричиняє процес різання. При цьому на ніж діють наступні сили:

F_B – вертикальна сила, що спричинює руйнування матеріалу під крайкою леза ножа;

F_L – лобова сила опору матеріалу напрямлена перпендикулярно до бокової грані ножа, яка виникає внаслідок розширення картону, що спричинене проникненням у нього клина леза.

Лобову силу F_L опору матеріалу розкладаємо на дві складові:

горизонтальну:

$$F_{LX} = F_L \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

та вертикальну:

$$F_{ЛY} = F_{Л} \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

де α – кут загострення леза ножа.

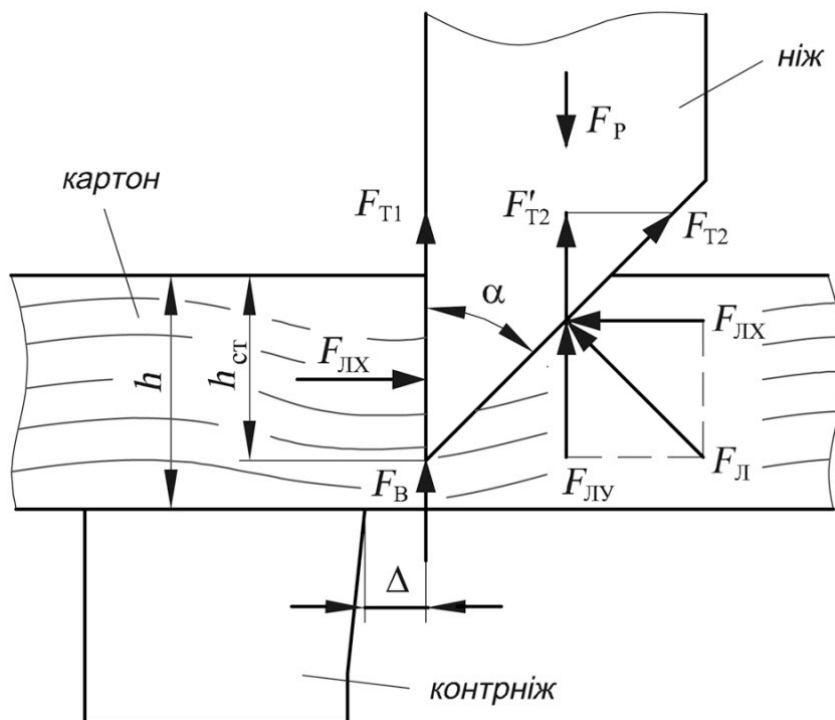


Рис. 1. Схема взаємодії леза ножа і картону для випадку «гострий ніж – незагострений контрніж»

Рух ножа у вертикальному напрямку спричинює виникнення на його гранях сил тертя F_{T1} і F_{T2} , які відповідно будуть рівними:

$$F_{T1} = F_{ЛX} \cdot f, \quad (3)$$

$$F_{T2} = F_{Л} \cdot f \quad (4)$$

де f – коефіцієнт тертя у парі «картон – ніж».

Вертикальна проекція сили F_{T2} дорівнює:

$$F'_{T2} = F_{T2} \cdot \cos \alpha = F_{Л} \cdot f \cdot \cos \alpha. \quad (5)$$

Під час різання сила F_P , прикладена до ножа, повинна перебороти суму усіх сил, котрі діють у вертикальному напрямку:

$$F_P \geq F_B + F_{ЛY} + F_{T1} + F'_{T2}. \quad (6)$$

Силу різання визначаємо із залежності [5]:

$$F_P = q \cdot l, \quad (7)$$

звідки

$$q = \frac{F_P}{l}, \quad (8)$$

де q - лінійні зусилля різання; l - довжина лінії різання.

Силу F_B визначаємо виходячи із допустимого напруження зрізу $[\tau_{зр}]$ та площі зрізу $A_{зр}$:

$$F_B = [\tau_{зр}] \cdot A_{зр}, \quad (9)$$

де $A_{зр} = \Delta \cdot l$ – площа зрізу, утворена крайками ножа і контрножа (тут Δ - зазор між ножами).

Величина допустимих напружень зрізу $[\tau_{зр}]$ є відомим параметром, котрий характерний для кожного матеріалу і визначається експериментально [2].

Для визначення складових $F_{ЛХ}$ та $F_{ЛУ}$ лобової сили розглянемо дію елементарних сил $dF_{ЛХ}$ і $dF_{ЛУ}$ (див.рис.2) на фаску леза ножа при його входженні у шар картону зі сторони елементарних вертикального та горизонтального стовпчиків, виокремлених із шару.

Згідно закону Гука залежність напружень від деформації можна записати як:

$$\sigma = E_y \cdot \varepsilon_{ст}^n \quad (10)$$

де: E_y - модуль Юнга, $\varepsilon_{ст}$ - відносне стиснення матеріалу, n - показник степеня залежності напружень від стиснення.

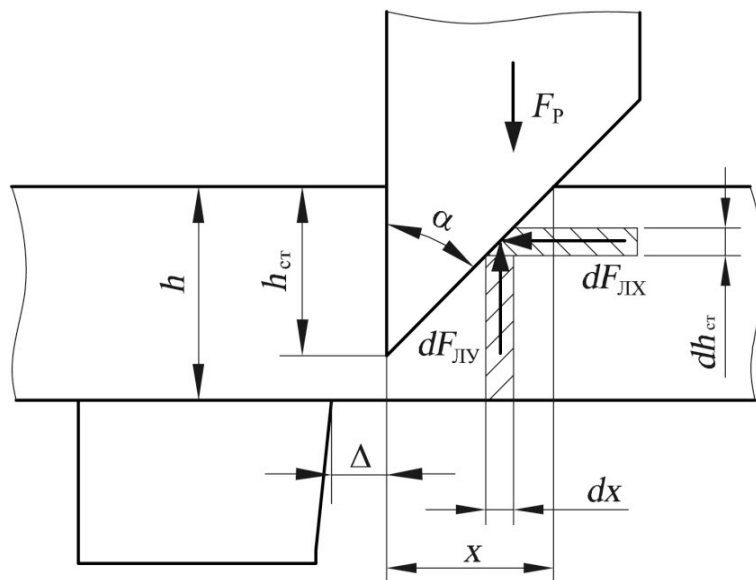


Рис. 2. Схема до визначення складових $F_{ЛХ}$ та $F_{ЛУ}$ лобової сили

Відносне стиснення $\varepsilon_{ст}$ довільного горизонтального стовпчика в межах фаски на відстані x від вершини леза буде рівним:

$$\varepsilon_{ст} = \frac{h_{ст}}{h} \quad (11)$$

Ширину елементарного стовпчика dx знаходимо як:

$$dx = dh_{ст} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (12)$$

Скориставшись відомою залежністю сили від напруження $F = \sigma \cdot A$, визначаємо елементарну силу стиснення $dF_{ЛУ}$, котра діє зі сторони стовпчика площею dA , довжиною $l=1$ та шириною dx , і яку можна записати у вигляді:

$$dF_{ЛУ} = E_y \cdot \varepsilon_{ст}^n \cdot dx = E_y \cdot \left(\frac{h_{ст}}{h} \right)^n dx = E_y \cdot \left(\frac{x}{\operatorname{tg} \alpha \cdot h} \right)^n dx,$$

або

$$F_{ЛУ} = \int_0^x E_y \cdot \left(\frac{x}{\operatorname{tg} \alpha \cdot h} \right)^n dx = \frac{E_y}{(\operatorname{tg} \alpha \cdot h)^n} \int_0^{h \operatorname{tg} \alpha} x^n dx$$

Інтегруючи по dx отримаємо:

$$F_{ЛУ} = \frac{E_y}{(\operatorname{tg} \alpha \cdot h)^n} \cdot \frac{x^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{h \operatorname{tg} \alpha} = \frac{E_y}{(\operatorname{tg} \alpha \cdot h)^n} \cdot \frac{(h \operatorname{tg} \alpha)^{n+1}}{n+1} \quad (13)$$

Якщо в горизонтальному напрямку відносна деформація рівна ε_1 , то відповідна елементарна сила буде рівною:

$$dF_{ЛХ} = \varepsilon_1^n \cdot E_y \cdot dh_{ст} \quad (14)$$

Також відносну деформацію ε_1 в горизонтальному напрямку можна виразити через відносну деформацію ε_{ct} у вертикальному напрямку відомою залежністю [2]:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{ct} \cdot \mu, \quad (15)$$

де $\mu=0,08\dots 0,3$ – коефіцієнт Пуансона для пружних анізотропних матеріалів слабо ущільнених при незначних напруженнях, які виникають під тиском фаски лева ножа [2].

Деформації у поперечному напрямку поглинаються за рахунок ущільнення матеріалу в шарі. Підставивши ε_{ct} із формули (11) у (15), отримаємо:

$$\varepsilon_1 = \mu \cdot \frac{h_{ct}}{h} \quad (16)$$

Тоді з урахування (16) елементарну силу, котра діє зі сторони горизонтального стовпчика обчислюємо за наступною формулою:

$$dF_{LX} = \varepsilon_1^n \cdot E_y \cdot dh_{ct} = \left(\mu \cdot \frac{h_{ct}}{h} \right)^n \cdot E_y \cdot dh_{ct},$$

відповідно сумарна горизонтальна складова F_{LX} буде рівною:

$$F_{LX} = \int_0^h \left(\mu \cdot \frac{h_{ct}}{h} \right)^n \cdot E_y \cdot dh_{ct} = E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \int_0^h h_{ct}^n dh_{ct}$$

Інтегруючи по dh_{ct} отримаємо:

$$F_{LX} = E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h_{ct}^{n+1}}{n+1} \Big|_0^h = E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h^{n+1}}{n+1} \quad (17)$$

Лобову силу F_L знаходимо за теоремою Піфагора:

$$F_L = \sqrt{F_{LX}^2 + F_{LY}^2} = \sqrt{\left(E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h^{n+1}}{n+1} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{(tg\alpha \cdot h)^n} \cdot \frac{(h \cdot tg\alpha)^{n+1}}{n+1} \right)^2} \quad (18)$$

Підставивши (17) у (3) та (18) у (5) отримаємо залежності для визначення сили тертя F_{T1} у вертикальному напрямку:

$$F_{T1} = E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h^{n+1}}{n+1} \cdot f, \quad (19)$$

і складової F'_{T2} сили тертя по скошеній грані ножа:

$$F'_{T2} = f \cdot \cos\alpha \cdot \sqrt{\left(E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h^{n+1}}{n+1} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{(tg\alpha \cdot h)^n} \cdot \frac{(h \cdot tg\alpha)^{n+1}}{n+1} \right)^2} \quad (20)$$

Визначивши усі сили, котрі діють на ніж у вертикальному напрямку та з урахуванням того, що розглядалась елементарна ділянка довжиною $l = 1$ визначаємо лінійні зусилля q підставляючи (9), (13), (19), (20) у (6) та (8):

$$q = \Delta \cdot [\tau_{зр}] + \frac{E_y}{(tg\alpha \cdot h)^n} \cdot \frac{(h \cdot tg\alpha)^{n+1}}{n+1} + f \cdot E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h^{n+1}}{n+1} + f \cdot \cos\alpha \cdot \sqrt{\left(E_y \cdot \left(\frac{\mu}{h} \right)^n \cdot \frac{h^{n+1}}{n+1} \right)^2 + \left(\frac{E_y}{(tg\alpha \cdot h)^n} \cdot \frac{(h \cdot tg\alpha)^{n+1}}{n+1} \right)^2} \quad (21)$$

Як видно із отриманої залежності (21) лінійні зусилля при ножичному різанні картону залежать від його фізико-механічних характеристик (параметри E_y , μ , n , $[\tau_{зр}]$); товщини h ; кута α загострення ножа; технологічного параметру Δ та коефіцієнту тертя f у парі картон-ніж.

Фізико-механічні характеристики картону визначаються експериментально і є відомими величинами [2]. Для аналітичних досліджень використано 5-ть типів картону:

– тип I – картон хром-ерзац макулатурний крейдований, марка МО, товщина $h=0,3$ мм, маса $1\text{м}^2 - 240$ г;

– тип II – картон хром-ерзац макулатурний не крейдований, марка Н, товщина $h=0,4$ мм, маса $1\text{м}^2 - 300$ г;

– тип III – картон макулатурний коробковий, марка НМ, товщина $h=0,5$ мм, маса $1\text{м}^2 - 370$ г;

– тип IV – картон хром-ерзац, макулатурний не крейдований марка Н, товщина $h=0,6$ мм, маса $1\text{м}^2 - 420$ г;

– тип V – картон хром-ерзац макулатурний крейдований, марка МО, товщина $h=0,7$ мм, маса $1\text{м}^2 - 520$ г.

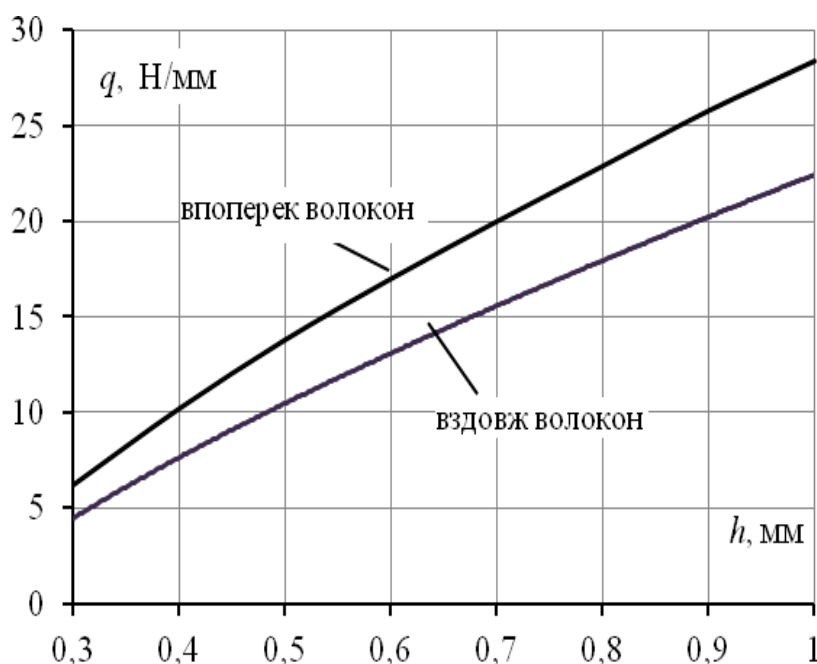


Рис. 3. Залежність лінійного зусилля при ножичному різанні від товщини картону

Дослідження залежності лінійних зусиль від товщини картону проводились на ПЕОМ із застосування програми Matcad, а відповідні результати розрахунків зображені на рис. 3. При розрахунках розглядався поперечний та поздовжній напрямок розташування волокон. Допустимі напруження зрізу $[\tau_{зр}]$ впоперек напрямку розташування волокон згідно із рекомендаціями [6] приймалися більшими на 20% для не крейдованого та 30% для крейдованого картону відповідно. Як видно із отриманих залежностей збільшення товщини картону спричинює зростання лінійних зусиль різання як для випадку поперечного так і поздовжнього розташування волокон, причому дана залежність має нелінійний характер. Порівняння отриманих даних із традиційним способом висікання [6] показує, що у нашому випадку лінійні зусилля зменшились приблизно у 2,5 рази. Очевидно, що такий факт спричинить не лише зменшення загальних технологічних навантажень у штанцювальному пресі, але й крутних моментів на валу привода машини.

На рис. 4 зображена залежність лінійних зусиль q від величини Δ зазору між крайками лез різальних інструментів для 5-ти видів картону різної товщини h . Як видно із рисунка лінійні зусилля зростають від 0 до максимуму по мірі збільшення зазору. Однак на практиці ножичне різання не можливо забезпечити при $\Delta=0$, оскільки величина зазору залежить від товщини оброблюваного матеріалу. Ще одним критерієм щодо встановлення рекомендацій до вибору величини зазору є якість зрізу волокон картону [2]. Проведені в УАД експериментальні

дослідження показали, що найкраща якість ножичного різання картону забезпечується при $\Delta \approx 0,3h$.

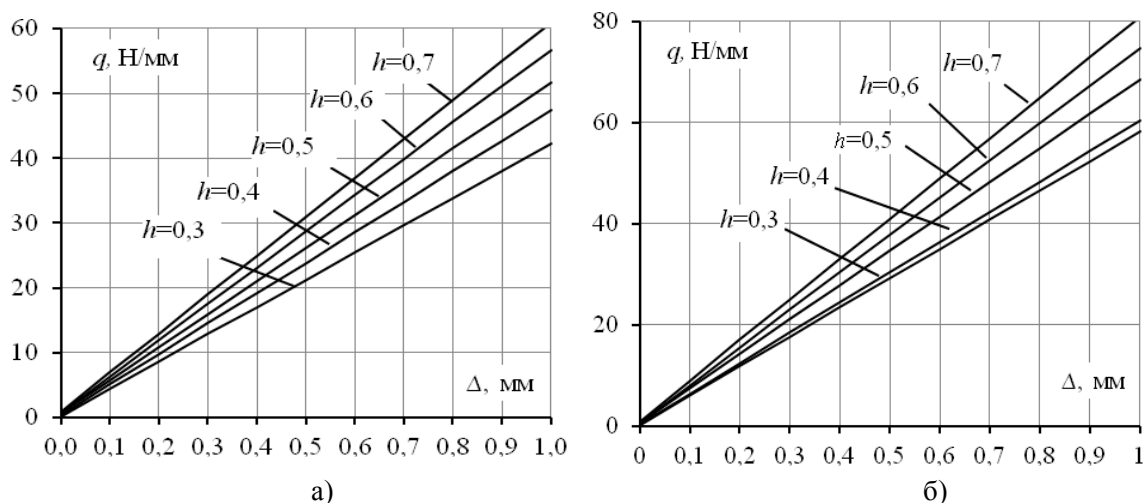


Рис. 4. Залежність лінійних зусиль від величини зазору між різальними інструментами: вздовж напрямку розташування волокон (а); впоперек напрямку розташування волокон (б)

Висновки:

- аналіз робіт із механіки руйнування картону показав, що такі дослідження для ножичного різання картону відсутні, а також відсутні аналітичні залежності для визначення лінійних зусиль для даного випадку;
- за результатами аналізу механіки руйнування картону виведено залежності для розрахунку зусиль, які виникають при ножичному різанні картону гострим ножом та незагостреним контрножем;
- виведено аналітичну залежність для визначення лінійних зусиль при ножичному різанні картону гострим ножом та незагостреним контрножем;
- результати досліджень залежності лінійних зусиль від товщини картону показали, що при ножичному різанні вони у 2,5 рази менші ніж при традиційному способі висікання контурів картонних розгорток;
- визначено та обґрунтовано залежність зазору між різальними інструментами від товщини картону, який повинен становити $\Delta \approx 0,3h$.

1. Пат. 98851 Україна, МПК В 31 В 1/16, В 26 F 1/38. Спосіб виготовлення розгорток картонного пакування та пристрій для його реалізації / Регей І.І / Книш О.Б. / Млинко О.І. / Слобода Т.В. – № 201011741; заявл. 04.10.2010 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. №12. – 4с.

2. Задра В. М. Комплексна оптимізація засобів для прорізування різнопрофільних отворів у паперово-картонних виробках [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.05.01 / В.М. Задра. – Львів, 2003. – 177 с.

3. Регей І. І. Наукові основи розроблення енергоощадної технології і засобів виготовлення розгорток картонного пакування [Текст]: дис. д-ра техн. наук: 05.05.01 / І.І. Регей. – Львів, 2007. – 269 с.

4. Терницький С. В. Аналіз явищ, що супроводжують процес висікання картонних розгорток / С.В. Терницький // Упаковка. – 2012. – №3. – С. 28 – 33.

5. Хведчин Ю.Й. Брошурувально-палітурне устаткування. Розрахунки виконавчих механізмів: навч. посіб. / Ю.Й. Хведчин, О.Б. Книш, А.Б. Коломієць – Львів: УАД, 2010. – 128 с.

6. Терницький С. В. Дослідження технологічно-необхідних зусиль висікання розгорток картонних пакувань / С.В. Терницький // Упаковка. – 2011. – №3. – С. 28 – 31.