

# Оцінка силового навантаження у пристроях фальцювання розгорток з картону

І.І. Регой, д.т.н., П.І. Бегень, Українська академія друкарства, м. Львів

У пропонуваному пристрої [1], призначеному для використання в малотиражному виробництві картонної тари і виконання заключної технологічної операції — фальцювання та склеювання картонних розгорток, середню частину розгортки фіксують вакуумними присмоктувачами, установленими у плиті, а її лівий та правий незафіксовані елементи загинають криволінійними напрямними, що обертаються навколо вертикальних осей. Конфігурація напрямних дозволяє рознести в часі фальцювання незафіксованих елементів розгорт-

ки для правильного замикання клеювального з'єднання.

Для отримання якісної об'ємної конструкції картонних виробів необхідно забезпечувати вільним елементам розгорток плавне кутове переміщення. У процесі їхнього згинання удари та поштовхи зі сторони криволінійних напрямних повинні бути відсутні. Таку вимогу можна реалізувати фальцюванням елементів відносно бігувальних ліній розгортки плавною зміною їхнього кутового прискорення за вибраним законом руху.

Фальцювання картонних розгорток у пристрої супроводжується появою навантажень, обумовлених специфікою його конструкції та особливостями виконання операції. На споживану потужність приводу першочергово впливають зусилля, спричинені силою тертя між картоном і криволінійною радіальною напрямною. Саме вони створюють крутний момент на вертикальних валах, на яких встановлені радіальні напрямні.

Для обчислення моменту на валу пристрою необхідно визначити силу тертя. Вона дорівнює добутку сили нормального тиску  $N$  та коефіцієнта тертя  $f$  між картоном і напрямною. Сила нормального тиску рівна за значенням та протилежна за знаком сумарній силі:

$$F_{\Sigma} = F_1 + F_2 + F_3, \quad (1)$$

де  $F_1$  — технологічний опір (рис. 1), спричинений деформуванням волокон бігувальної лінії, що збігається з віссю  $x$ , уздовж якої відбувається згин незафіксованого елемента 1 картонної розгортки ( $KP$ );

$F_2$  — сила інерції, викликана його згинном навколо бігувальної лінії з кутовим прискоренням  $\varepsilon$ ;

$F_3$  — сила опору повітря.

Залежність (1) не враховує вагу незафіксованого елемента розгортки, яка для споживчого пакування незначна. Технологічний опір від фальцювання картону:

$$F_1 = \frac{2M_{\lambda} \cdot l}{b}, \quad (2)$$

де  $M_{\lambda}$  — лінійний момент опору згину картону вздовж бігувальної лінії;

$l$  — її довжина;

$b$  — розмір незафіксованого елемента розгортки.

Значення лінійного моменту опору згину для різних типів картону встановлено експериментально на

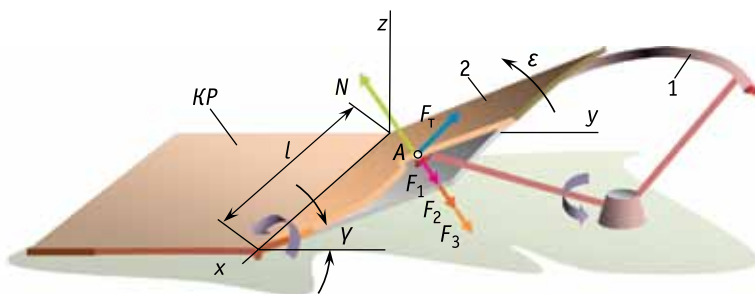


Рис. 1. Схема до розрахунку навантаження приводу під час фальцювання картонної розгортки криволінійною напрямною



спеціально розробленому пристрої. Апроксимацією отриманих даних у середовищі Microsoft Excel встановлено аналітичні залежності лінійного моменту опору від кута фальцювання незафіксованого елемента  $KP$ . Характер залежностей обрано поліноміальний. Значення коефіцієнтів поліному:

$$M_n = A_0 \cdot \gamma^2 + A_1 \cdot \gamma + A_2, \quad (3)$$

для розглядуваних у дослідженні різних за товщиною видів картону та бігування стосовно напрямків волокон наведено в таблиці.

За результатами апроксимування експериментальних даних і розрахунків за виразом (2) на рис. 2 наведено графічні залежності технологічного опору, спричиненого деформуванням волокон бігувальної лінії картонних розгортки, від кута фальцювання незафіксованих елементів.

Як видно з рис. 2, збільшення як кута фальцювання незафіксованих елементів розгортки, так і товщини картону супроводжується аналогічною зміною технологічного опору. Окрім того, на нього впливає і розташування волокон відносно бігувальної лінії. Так, для матеріалу завтовшки  $\Delta = 0,3$  мм технологічний опір згину елемента розгортки на повний кут вздовж волокон дорівнює 0,83 Н, а поперек  $F_1 = 1,44$  Н. Для картону завтовшки  $\Delta = 0,7$  мм відношення технологічного опору фальцювання поперек волокон у позиції  $\gamma = 180^\circ$  до значення на початку цієї операції становить  $n = 3$ .

Інерційні навантаження під час загинання елемента розгортки з певним кутовим прискоренням визначаються як добуток моменту інерції мас незафіксованого елемента на його кутове прискорення. Для обчислення моменту інерції мас прийнято елемент розгортки як плоску пластину, що здійснює хитний рух навколо осі  $x$ , та застосовано теорему Гюйгенса — Штейнера [2]:

$$J = \frac{m}{12}(b^2 + \Delta^2) + m \cdot d^2, \quad (4)$$

де  $m$  — маса незафіксованого елемента розгортки;  
 $b$  — його ширина;



**Таблиця.**  
**Поліноміальні коефіцієнти апроксимованих залежностей**

Коефіцієнт поліному	Товщина картону, мм					
	Уздвож волокон			Поперек волокон		
	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
$A_0$	$-6 \cdot 10^{-6}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-5}$
$A_1$	0,0022	0,0044	0,0086	0,0033	0,0058	0,0092
$A_2$	0,0057	0,1233	0,2598	0,0898	0,1295	0,5070

$d$  — параметр, який визначає відхилення осі обертання елемента навколо бігувальної лінії від його осі симетрії.

З урахуванням залежності (4) вираз для знаходження інерційних сил набуває вигляду:

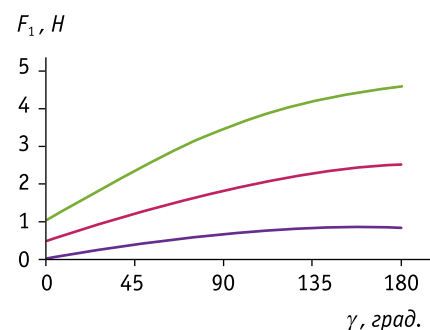
$$F_2 = \frac{2 \left[ \frac{m}{12}(b^2 + \Delta^2) + m \cdot d^2 \right] \cdot c_k \left[ \frac{\gamma_\Sigma}{T_\phi^2} \right]}{b}, \quad (5)$$

де  $c_k$  — позиційні інваріанти прискорення для обраного синусоїдального закону загинання елемента;

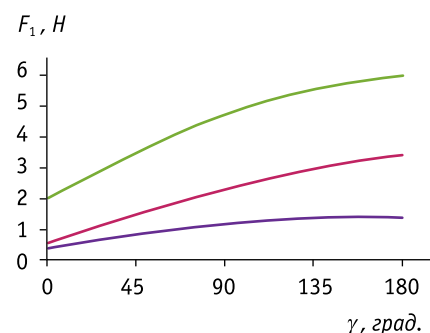
$\gamma_\Sigma$  — максимальний кут загинання елемента розгортки;

$T_\phi$  — період фальцювання, який, враховуючи специфіку конструкції пристрою та необхідність виконання додаткового обтискування сфальцюваної розгортки в кінці робочого циклу, становить 2/3 від періоду повного обертання напрямної.

За виконаними розрахунками за виразом (5) та отриманими результатами на рис. 3 побудовані графіки залежності інерційних навантажень незафіксованих елементів розгортки упродовж виконання операції фальцювання.



а)



б)

**Рис. 2.** Залежність технологічного опору від кута фальцювання картону завтовшки 0,3 (—), 0,5 (—), 0,7 мм (—) вздовж (а) та поперек (б) волокон

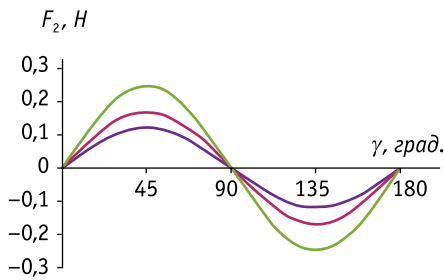


Рис. 3. Залежність сили інерції незафіксованого елемента розгортки від кута фальцювання картону завтовшки: 0,3 (—); 0,5 (—); 0,7 мм (—)

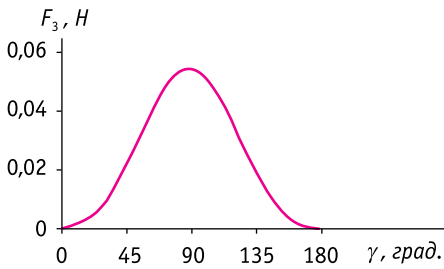


Рис. 4. Залежність сили опору повітря від кута фальцювання незафіксованого елемента розгортки

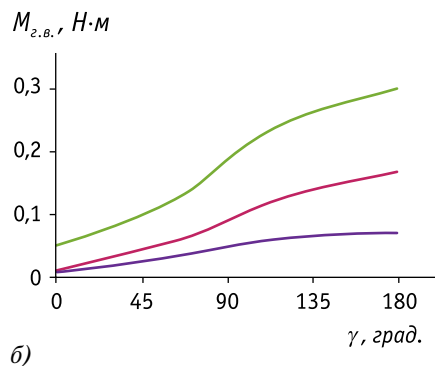
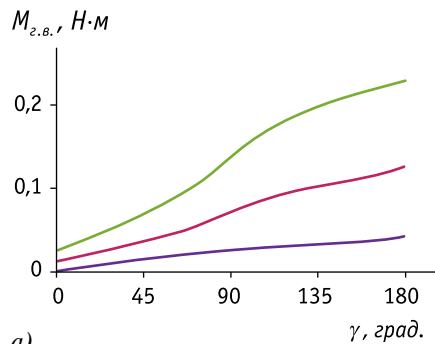


Рис. 5. Залежність моменту на головному валу пристрою від кута фальцювання елемента розгортки вздовж (а) та поперек (б) волокон картону завтовшки: 0,3 (—); 0,5 (—); 0,7 мм (—)

Як видно з рис. 3, сила інерції незафіксованого елемента розгортки під час його фальцювання має знакозмінний та плавний характер. Максимальне додатне  $F_2 = 0,25$  Н та від'ємне  $F_2 = -0,25$  Н значення отримані для найтовстішого (використовуваного в даному дослідженні) картону в разі фальцювання елемента розгортки на кути відповідно  $\gamma = 45^\circ$  і  $\gamma = 135^\circ$ . У наведених фіксованих положеннях значення сили інерції елемента розгортки завтовшки  $\Delta = 0,3$  мм менші за попередні у 2,1 разу.

Під час фальцювання елементів розгортки на них, крім наведених, діє сила, спричинена опором повітря за їхнього обертання навколо бігувальної лінії [3]:

$$F_3 = c_x \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A, \quad (6)$$

де  $c_x$  — аеродинамічний коефіцієнт опору;

$\rho$  — густина повітря;

$A$  — площа незафіксованого елемента розгортки;

$v$  — його середня лінійна швидкість.

Аналитична залежність (6) дозволяє визначити силу опору повітря, а побудований на основі одержаних значень графік (рис. 4) ілюструє характер зміни даної сили відносно зміни кута загинання елемента розгортки.

Як видно з рис. 4, сила опору повітря зростає плавно до максимального значення  $F_3 = 0,05$  Н для кута  $\gamma = 90^\circ$  повороту елемента розгортки. Його подальший згин супроводжується зменшенням  $F_3$ .

Аналіз отриманих результатів показує, що рушійною силою, яка визначає характер навантажень, є сила технологічного опору деформації волокон картону. Проте і сили інерції, і опір повітря впливають на величину результуючої сили.

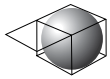
Сума всіх сил відображає повну картину дії нормальної реакції з боку напрямної на елемент, який підлягає фальцюванню. Нормальна реакція з урахуванням коефіцієнта тертя створює силу тертя в точці контакту напрямної з картоном. Ключовим параметром, що визначає величину потужності, яку споживає пристрій, є крутний момент на валах, де встановлені радіальні напрямні. Цей момент визначається як добуток сили тертя на змінний радіус кривизни напрямних  $\rho$ , що в даному випадку виступає плечем дії сили (рис. 5).

Аналіз графіків засвідчує, що максимальний момент під час фальцювання на даному пристрої виникає на його валах у кінці робочого циклу, тобто в завершальній фазі загинання елементів  $KP$ . Це можна пояснити зростанням основної складової результуючої сили — технологічного опору, що пов'язане із збільшенням внутрішніх напружень волокон картону за їхньої деформації. Порівняльний аналіз кількісних показників моментів на валах пристрою показує, що їхні значення відчутно змінюються залежно від товщини фальцюваного картону. Так, у разі фальцювання вздовж волокон картону завтовшки  $\Delta = 0,3$  мм максимальний крутний момент на валу становить  $M_{2,в.г.} = 0,04$  Н·м, а при  $\Delta = 0,7$  мм —  $M_{2,в.г.} = 0,23$  Н·м. Значення моментів під час фальцювання картону поперек волокон для трьох розглянутих варіантів товщини картону зростають у середньому в 1,5 разу відносно фальцювання вздовж волокон.

## Висновки

Створення нового енергоощадного обладнання потребує відповідних розрахунків, за результатами яких можна дати конкретну відповідь щодо





доцільності впровадження у пакувальну індустрію нових технологій та засобів їхньої реалізації. Усі результати дослідження, наведені в даній статті, спрямовані на аналіз і кількісну оцінку величини крутного моменту на головному валу пристрою. Для цього розроблено схему дії навантажень, проведено аналіз діючих сил, які виникають під час фальцювання, та виокремлено три характерні сили, котрі діють на фальцюваний елемент з боку напрямної. У ході розрахунків встановлено, що рушійною силою, яка визначає величину дії навантажень у точці контакту напрямної з елементом розгортки, є технологічний опір. Максимальні значення цієї сили орієнтовно на порядок вищі за максимальні значення сили інерції та майже на два порядки вищі за максимальне значення сили опору повітря для кожного з розглянутих типів картону. Спираючись на одержані дані, можна зробити висновки, що

для фальцювання картону завтовшки  $\Delta = 0,7$  мм необхідно прикласти крутний момент  $M_{z.c.} = 0,31$  Н·м. Проведені інженерні розрахунки обґрунтовують раціональну побудову пристроїв для фальцювання розгорток картонного пакування, орієнтованих на виготовлення пакувальної продукції обмеженими тиражами на основі залучення енергоощадних технологій.

### Література

1. *Регей І.І., Бегень П.І.* Обґрунтування технічної побудови операційних засобів для фальцювання розгорток з картону // Упаковка. — 2012. — № 2. — С. 42–44.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: Учеб. пособие для вузов в 5 т. — Т. 1. Механика. — М.: ФИЗМАТЛИТ, Изд-во МФТИ, 2005. — 560 с.
3. *Альшиуль А.Д., Киселев П.Г.* Гидравлика и аэродинамика. — М.: Издательство литературы по строительству, 1965. — 273 с. *Ж*

### Оценка силовой нагрузки в устройствах фальцевания разверток из картона

*И.И. Регей, д.т.н., П.И. Бегень*

В статье авторами проведен анализ нагрузок в устройстве фальцевания картонных разверток, в котором незафиксированные элементы сгибают криволинейными направляющими. Исследованы составляющие и характер влияния силы трения между направляющей и элементами развертки на крутящий момент на главном валу. Установлено, что движущей силой, которая влияет на величину крутящего момента, является технологическое сопротивление сгибания картона.

*Ключевые слова:* картон; фальцевание; развертка картона.

### Evaluation of power load in devices folding cardboard scans

*I.I. Regey, Dr., P.I. Begen*

In this article the authors analyzed the loads in the folding cardboard scan device in which uncommitted elements fold curved guides. The components and influence of the driving force of friction between the guides and elements of cardboard scan on the torque on the main shaft were investigated. Found that the driving force that affects the amount of torque is technological resist of bending cardboard.

*Key words:* cardboard; folding; reamer of cardboard.



ООО «НОВОПАК СВ»

+38 045 732 1703

+38 045 732 2498

+38 045 732 2511

WWW.NOVOPACKSV.COM.UA

КИЕВСКАЯ обл., г. РЖИЩЕВ, ул. РАДИАТОРНАЯ, 42

**СДЕЛАНО В УКРАИНЕ!**

ПРОИЗВОДСТВО И РЕАЛИЗАЦИЯ  
ОДНОРАЗОВОЙ УПАКОВКИ (ЛОТКОВ)  
ИЗ ВСПЕНЕННОГО ПОЛИСТИРОЛА  
ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

