

Вплив бігування на якість формування картонного пакування

І.О. Полежаєв, П.О. Киричок, д.т.н, НТУУ «КПІ», О.М. Гавва, д.т.н, Національний університет харчових технологій, м. Київ

Упаковка є ключовим логістичним чинником під час виробництва і розподілення споживчих товарів. Надійна і економічна упаковка потрібна для зберігання, транспортування і розподілення, доки продукт не буде доставлений в кінцевий пункт призначення. Картон є одним із широко використовуваних матеріалів у пакувальній індустрії, так як він легко може бути перетворений з плоскої конфігурації в пачку у формі твердого об'ємного тіла. Картонні пачки легкі, але й водночас можуть бути доволі жорсткими і витримувати значні навантаження. Картонна упаковка може бути отримана кількома способами, наприклад, формуванням «каркасу» (плоскі складені елементи картону) пачки у формі контейнера або шляхом формування упаковки з циліндричного рукава, заповненого рідиною, з використанням механізмів затискання та герметизації. У будь-якому випадку, кінцева форма упаковки досягається шляхом складання картонної плоскої заготовки за попередньо визначеними лініями. Остаточні властивості упаковки значною мірою залежать як від фізико-механічних властивостей картону, так і від якості дотримання технологічних параметрів її виготовлення.

Можна виділити два основних типи властивостей картону: зовнішній вигляд і експлуатаційні властивості [1]. Зовнішній вигляд пов'язаний із візуальним вираженням поверхні картону, а також придатністю його до нанесення друку та показниками білизни, вбирання фарб, опору до стирання та ін. Експлуатаційні властивості пов'язані з фізико-механічними характеристиками картону. Ці властивості демонструють, як картон буде витримувати вплив чинників навколишнього середовища.

Так, картон має лінійну пружну поведінку до заданої границі пружності. Це означає, що сила, прикладена до картону, пропорційна деформації, викликаній прикладеною силою. Якщо дія сили припиняється, картон відновлює свої первинні розміри.

Картон деформується за межею пружності і характеризується пружно-пластичними властивостями. За таких умов деформація непропорційна прикладеній силі. Коли дія сили припиняється, картон не відновлює свої первинні розміри. Значення межі пружності, як правило, складає 0,2 % відносного подовження (рис. 1) [2].

Властивості целюлозних волокон та особливості виробництва картону визначають його фізико-механічні властивості. З іншого боку, картон як матеріал можна розглядати як дуже близький до ортотропного. Тобто він має різні властивості в трьох ортогональних основних напрямках: напрямком волокон картону збігається з поздовжнім (машинним напрямком) — MD, напрямком волокон картону

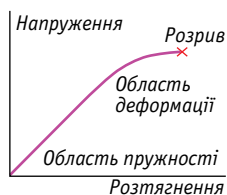


Рис. 1. Пружні і пружно-пластичні властивості типового картону

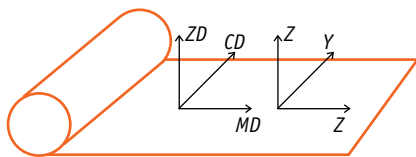


Рис. 2. Основні напрямки сприйняття навантажень картоном

перпендикулярний ходу машини — CD і ZD — напрямком товщини, як показано на рис. 2 [3].

Щоби забезпечити правильну та якісну лінію згину картонної заготовки та зменшити сили, які необхідно прикласти для згинання, картонні заготовки піддають попередньому обробленню — бігуванню.

Процес бігування — це попереднє нанесення на картон лінії згину у вигляді видавлюваних канавок певного профілю. Це і є процесом місцевого витягування матеріалу. Бігування застосовують для зменшення жорсткості листових картонних заготовок по лінії згину, значного полегшення умов утворення згинів і підвищення параметрів якості картонної упаковки, особливо в умовах її формування на машинах автоматичної дії.

Бігування умовно можна поділити на три етапи. На першому етапі картонна заготовка, при опусканні вирубного штампу, закріплюється еластичними прижимами на контрматриці. На другому — бігувальна лінійка (зі стандартною, завуженою або потовщеною формувальною головкою) витягує в двоосьовому напрямку картонну заготовку. На третьому етапі під дією бігувальної лінійки і контрматриці відбувається стиснення картону.

Бігувальні інструменти тиснуть на заготовку таким чином, що картон деформується точно по заглибленим елементам матриці, при цьому утворюючи чіткі лінії бігування. На рис. 3 показано макрографію процесу бігування [4].

Під час бігування, волокнисті зв'язки між шарами картону руйнуються, частина волокон пошкоджується і відбувається пластична деформація картонних шарів. У зоні бігування виникають високі напруження зсуву та стиснення. Розшарування, викликане зсувом шарів картону, зменшує його жорсткість згину в процесі подальшого складання упаковки. Завдяки локальним пошкодженням у зоні бігування, картон буде ідеально функціонувати як шарнір, що покращить якість і продуктивність процесу складання. Таким чином, попередньо про якість бігування можна судити за легкістю фальцювання, тобто складання. Щоб оцінити якість бігування, потрібно враховувати багато чинників, які на неї впливають, таких як товщина та вологість

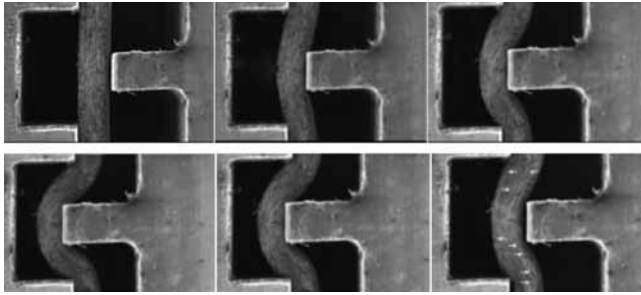


Рис. 3. Макрографія процесу бігування

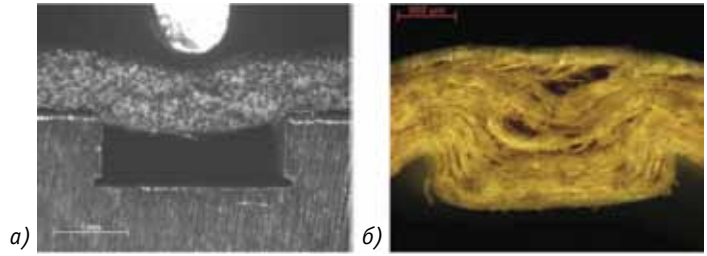


Рис. 4. Макроскопічне зображення картонної заготовки після бігування (а) та складання (б)

картону, ширина бігувальної канавки, глибина проникнення інструменту та ін. Експериментально встановлено, що найбільш суттєвим чинником серед зазначених вище є товщина картону. Більш товсті заготовки потребують ширших лінійку і паз. Тому вони менш чутливі до неточного регістру між лінійкою і канавкою.

Макроскопічні зображення бігованих і складених зразків наведено на рис. 4. На основі цих зображень можна зробити таких два важливі висновки, що можуть бути враховані під час побудови механічної моделі бігування.

Перший: пластична деформація в зоні бігування в проекції товщини картону ZD починається після бігування до 5 % нижче бігувальної лінійки. Особлива форма зони бігування (після взаємодії з інструментом) викликана не тільки пластичною деформацією у площині ZD, а напруженням зсуву зовнішнього шару та напруженням розтягнення в напрямку MD.

Другий: макроскопічні зображення, отримані після складання по лінії бігування показують, що внутрішній шар картону був відділений від зовнішніх шарів — особливо від верхнього шару. Сам внутрішній шар розділений на декілька паперових шарів. Нижні шари були загнуті всередину і вигнуті, як показано на рис. 4б [5].

Кількість таких шарів в картоні складає приблизно вісім, якщо не брати до уваги кілька надтонких. Подібна поведінка відшарування — природне явище для картону, хоча кількість утворених шарів при цьому може відрізнитися. Під час бігування, в області між бігувальним інструментом та бігувальною канавкою матриці виникають некомпланарні напруження стиску та зсуву. У промисловому бігуванні (як показано на рис. 5), у місця поряд із зоною бігування, виникають напруження розтягу в площині заготовки [6].

У процесі бігування на зовнішній стороні згину утворюється натяг, а на внутрішній — стискання, що дає змогу створити округлення нижнього шару. Більше того, здатність картону розшаровуватися є доволі важливою його властивістю для складання. Розшарування — це режим руйнування паперу або картону, де поверхня переломлюється паралельно площині листа. Цей тип пошкодження у випадку фальцювання картону є позитивним механізмом. Так як він може зменшити напруження на зовнішній стороні згину, що дасть можливість знизити ризик утворення тріщин на зовнішній стороні згину. Операція складання картону значною мірою ґрунтується на здатності заготовки до внутрішнього розшарування, щоб напруження стиску, які виникають на внутрішній стороні згину, утворили внутрішній рельєф. Під час розшарування напруження, що виникають у місці складання заготовки, як правило, від 50 до 100 разів менші, ніж напруження, які виникають

при складанні заготовки без попереднього бігування [7]. Під час складання картону внутрішні його шари легко піддаються згинанню через те, що вони мають вигнуту форму і перебувають у стиснутому стані (рис. 6). Адже тонкі шари в зоні бігування легше зігнути, ніж картон поза зоною бігування. Згин відбувається виключно по лініях бігування. Водночас, деякі не площинні напруження можуть виникати всередині складки через волокна, які відшарувалися від поверхонь і знаходяться у розширеному стані. Зовнішні шари, зокрема верхній шар, знаходяться під дією напружень розтягу, які можуть призвести до розтріскування верхнього шару та зламу заготовки. Таким чином, бігування і складання упаковки повинні виконуватись так, щоби напруження в площині верхнього шару було зведено до мінімуму. Точне моделювання поведінки бігувальних ліній є ключовим фактором у розробці моделі та наближеному математичному моделюванні процесу створення картонної упаковки.

Для прогнозування поведінки картону під дією різних параметрів бігування створюється математична модель. Така модель повинна бути побудована таким чином, щоби вона могла відносно легко бути реалізована в комп'ютерній програмі із застосуванням методу скінченних елементів. Для моделювання картону використовується цілісна модель, яка описує матеріальну поведінку картону у поєднанні з моделлю розшарування, для того, щоби пояснити утворення різних паперових шарів. Найважливішими елементами математичної моделі є пружно-пластичні складові матеріалу. Попередньо проведені числові розрахунки підтвердили адекватність розробленої математичної моделі реальним значенням параметрів, визначених експериментально.

Як відомо, процес бігування призводить до зниження пружності, жорсткості і міцності картону. Це погіршення пов'язано з сукупним впливом розшарування, по ширині W області бігування та по товщині картону δ . Геометричний ефект бігування досягається шляхом постійного відхилення шарів картону. Залежно від інтенсивності бігування більш-менш значні зміни в структурі картону спостерігаються після бігування, яке зменшує стійкість стиснутих шарів при згині.

Ґрунтуючись на спостереженні фізичних процесів, що відбуваються при бігуванні, передбачається, що:

- міцність та жорсткість лінії згину зменшуються протягом бігування пропорційно інтенсивності процесу бігування, виміряної за допомогою початкової номінальної деформації зсуву γ , яка визначається:

$$\gamma = \frac{2h}{W}, \quad (1)$$

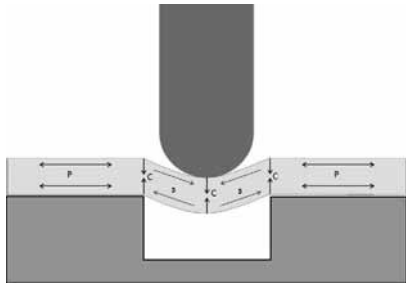


Рис. 5. Схема розподілення напружень та деформацій в робочій зоні бігування; p — розтягнення; c — стискування; z — зсув

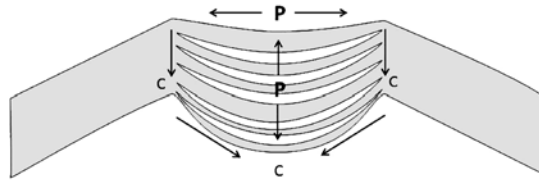


Рис. 6. Схема напружень та деформацій в зоні бігування під час складання; p — розтягнення; c — стискування

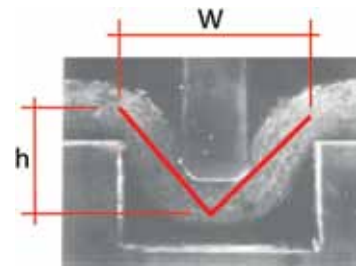


Рис. 7. Схема напружень та деформацій в зоні бігування під час складання; p — розтягнення; c — стискування

де h — величина заглиблення бігувальної лінійки, W — ширина канавки;

- збільшена глибина проникнення (вище γ) бігувального інструмента має два основні наслідки: відбувається розшарування картону на тонші шари; лишається більший позаплощинний прогин (рис. 7);
- погіршення механічних властивостей картону в місці бігування є наслідком зменшення товщини і постійного прогину розшарованих елементів [8].

Операція бігування енергоємка, технологічно складна і відповідальна: потрібно правильно обрати напрям бігування залежно від напрямку волокон картонного листа, вид та висоту бігувальних лінійок [9]. Для якісного формування лінії згину при бігуванні картонна заготовка повинна бути нерухомою, зафіксована на контрматриці за допомогою еластичних прижимів (рис. 8). Обираючи раціональні параметри операції бігування, необхідно забезпечити співвідношення сил тертя-ковзання між робочими елементами пристрою бігування та зусиллям бігування й притискування. При силі тертя-ковзання $F_{T.E.1}$, $F_{T.E.2}$ між еластичним прижимом і картонною заготовкою, більший за силу тертя-ковзання $F_{T.B.1}$, $F_{T.B.2}$, між головкою бігувальної лінійки і картонної заготовки картонна заготовка буде надійно зафіксована:

$$\begin{aligned} F_{T.E.1} &> F_{T.B.1} \\ F_{T.E.2} &> F_{T.B.2} \end{aligned} \quad (2)$$

Потрібно також визначити умови для обмеження навантажень на заготовку, які діють на другому та третьому етапах бігування. На другому етапі необхідно враховувати граничне значення величини витягування картону, при підвищенні якого може відбуватися його розшарування. Значення граничної величини витягування залежить не тільки від характеристик картону, а й від умов проведення операції: температура, вологість, швидкість деформації, конструктивні особливості технологічного оснащення та ін. На третьому етапі потрібно врахувати граничне значення міцності картону на стиск, при підвищенні якого відбувається руйнування картону. Необхідне співвідношення між зусиллями притискування і бігування, враховуючи вираз (1), становить:

$$\begin{aligned} P &\leq bLk[\sigma]; \\ P &\leq \frac{2f_1qLB}{f_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де b — ширина головки бігувальної лінійки, м; L — довжина бігувальної канавки, м; $k = 1,5 \dots 2$ — коефіцієнт, який

залежить від профілю бігувальної канавки; $[\sigma]$ — границя міцності картону, Па.

Крім зміни властивостей картону під дією зусилля бігування, на другому та третьому етапах відбувається стискування картону. Для визначення мінімальної товщини картону в зоні бігування необхідно проаналізувати вплив геометричних параметрів бігувальної лінійки та матриці на ступінь витягування картонної заготовки [10].

Для визначення ступеня витягування картону приймаємо такі умови: висота бігувального каналу рівна товщині картону $h = \delta$; зазор між нижньою точкою O бігувальної лінійки та контрматрицею рівний товщині картону δ ; місце витягування матеріалу відбувається тільки на ділянці CE (рис. 8); при бігуванні плоска поверхня картонної заготовки формується в циліндричну з висотою h . Ступінь витягування можна визначити через геометричні співвідношення параметрів пристрою бігування та товщину картонної заготовки такими способами:

- Ступінь витягування визначається як відношення площі заготовки:

$$\Delta_B = \frac{S_2 - S_1}{S_1} 100\%, \quad (4)$$

де S_1 — площа поверхні картонної заготовки до бігування, визначається як:

$$S_1 = LB, \quad (5)$$

B — ширина картонної заготовки, S_2 — площа поверхні картонної заготовки після бігування, визначається із геометричного співвідношення:

$$S_2 = \left[L - 2\sqrt{\delta(2r + \delta)} + \frac{2\pi(r + \delta)}{180^\circ} \cos^{-1}\left(\frac{r}{r + \delta}\right) \right] B, \quad (6)$$

де r — радіус заокруглення головки бігувальної лінійки.

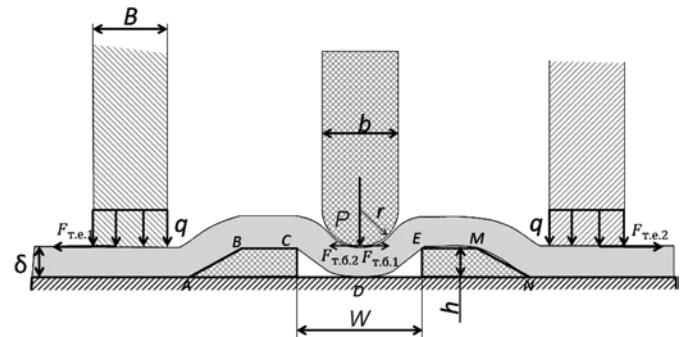


Рис. 8. Розрахункова схема процесу бігування



- *Ступінь витягування визначається як відносне збільшення довжини картонної заготовки в місці бігування:*

$$\Delta = \frac{\cup CE - CE}{CE} 100\%, \quad (7)$$

де CE — початкова довжина картонної заготовки в місці бігування; $\cup CE$ — довжина дуги, утвореної картонною заготовкою після бігування.

Використовуючи геометричні співвідношення можна записати:

$$CE = 2\sqrt{\delta(2r+\delta)}; \quad (8)$$

$$\cup CE = 2\pi(r+\delta) \frac{\cos^{-1}\left(\frac{r}{r+\delta}\right)}{180^\circ}. \quad (9)$$

За умови $CE > 1$ в картонній заготовці по ширині W бігувального каналу не буде виникати напруження зсуву.

Використовуючи вирази (7–9), формула для знаходження ступеня витягування буде мати вигляд:

$$\Delta_B = \frac{\pi(r+\delta) \frac{\cos^{-1}\left(\frac{r}{r+\delta}\right)}{180^\circ} - \sqrt{\delta(2r+\delta)}}{\sqrt{\delta(2r+\delta)}} 100\% \quad (10)$$

- *Ступінь витягування визначається як відносне потоншення картону:*

$$\Delta_B = \sqrt{\frac{\delta}{\delta_0}} - 1 \quad 100\%, \quad (11)$$

де δ — товщина листа картонної заготовки до бігування; δ_0 — товщина листа картонної заготовки після бігування.

Визначальним геометричним параметром процесу бігування, який повинен також забезпечувати достатню міцність картонної упаковки, є кінцева товщина заготовки в зоні бігування. Використовуючи вирази (9, 10), можна розрахувати мінімально можливу товщину картонної заготовки, яку забезпечує пристрій в зоні бігування:

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\left(\frac{2\pi(r+\delta) \frac{\cos^{-1}\left(\frac{r}{r+\delta}\right)}{180^\circ} - 2\sqrt{\delta(2r+\delta)}}{2\sqrt{\delta(2r+\delta)}} + 1 \right)^2}. \quad (12)$$

Виконані дослідження процесу бігування показали загальну тенденцію зменшення ступеня витягування заготовки картонної упаковки та зростання мінімальної товщини заготовки в зоні бігування при збільшенні радіуса скруглення формувальних головок бігувальної лінійки. Найменше деформування картонної заготовки та найбільший ступінь витягування буде при використанні потовщених формувальних головок. Такі бігувальні лінійки дають можливість проводити бігування товстого картону в межах $0,7 \leq \delta \leq 1,4$ (мм) без зниження якості лінії бігування і попереджують надриви на зовнішній стороні заготовки вздовж лінії бігування. При бігуванні заготовки тонкого картону ($\delta = 0,3$ (мм)) для невеликих упаковок доцільно використовувати бігувальні лінійки з завуженими формувальними головками для збільшення ступеня витягування в зоні бігування. При бігуванні заготовок товщиною $0,3 \leq \delta \leq 0,7$ (мм) для упаковок, що складаються, доцільно використовувати стандартні бігувальні лінійки з усередненими параметрами витягування заготовки

в зоні бігування порівняно з бігувальними лінійками, які мають завужені та потовщені формувальні головки.

Література

1. Каверин В.А., Феклин К.П. Выбор, изготовление, испытания тары и упаковки. — М.: МГУП, 2002. — 260 с.
2. Stiffness design of paperboard packages using the finite element method. — Juan Crespo Amigo. — Department of solid mechanics, Stockholm, Sweden 2012.
3. Creasing behaviour of corrugated board. An experimental and numerical approach. — L.G.J. Gooren. — Technische Universiteit Eindhoven Department Technical Engineering Materials Technology. — Eindhoven, February 2006.
4. Numerical and Experimental Investigation of Paperboard Creasing and Folding — Hui Huang. — Licentiate Thesis No. 111, 2011, KTH School of Engineering Science, Department of Solid Mechanics, BiMaC Innovation, Royal Institute of Technology, SE-100 44 Stockholm Sweden.
5. Manufacturing of paperboard and corrugated board packages. Pulp and Paper Chemistry and Technology. — Volume 4, Paper Products Physics and Technology.
6. An experimental and computational study of laminated paperboard creasing and folding L.A.A. Beex, R.H.J. Peerlings Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands, 25 August 2009.
7. Шредер В.Л., Йованович К.С. Картон. Тара и упаковка. — К.: ИАЦ «Упаковка», 1999. — 192 с.
8. A constitutive model for the mechanical response of the folding of creased paperboard. — A. Giampieri, U. Perego, R. Borsari. — Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano, Piazza L. da Vinci, 32, 20133 Milan, Italy.
9. Ефремов Н.Ф. Тара и её производство: Учеб. пособ. — М.: МГУП, 2001. — 312 с.
10. Деренівська А.В., Масло М.А., Валиулін Г.Р. Дослідження операції бігування заготовки картонної упаковки // Харчова промисловість. — № 9. — 2010. — С. 177–180. *Ж*

Влияние бигования на качество формования картонной упаковки

И.А. Полежаев, П.А. Киричок, д.т.н., А.Н. Гавва, д.т.н.

Упаковка из картона получается объемной за счет складывания плоской заготовки по заранее обозначенным линиям. Картонные заготовки предварительно подвергают обработке — бигованию для получения правильной и качественной линии сгиба и картонной заготовки. Для этого необходимо учитывать большое количество факторов при оценивании качества бигования: толщину и влажность картона, ширину биговальной канавки, ширину проникновения инструмента и др. В статье авторы представили результаты исследований влияния толщины картонной заготовки и радиуса округления формовочных головок биговальной линейки на качество бигования. Качество бигования оценивали с помощью степени вытягивания картона в биговальном канале.
Ключевые слова: бигование; картон; напряжение; сгибание; расслоение; упаковка.

Impact creasing on the quality of the formation of cardboard packaging

I.A. Polezhaev, P.O. Kirichok, Dr., O.M. Gavva, Dr.

Cardboard packaging are obtained volume by folding the slab to advance marked lines. The carton blanks are pre-treated — for creasing and right fold line quality and the carton blank. For this it is necessary to consider many factors when estimating the creasing quality: thickness and humidity cardboard creasing width of the groove width of the penetration tool, etc. The authors presented the results of studies of the effect of thickness of the carton blank and corner radius molding heads creasing line quality creasing. Creasing the quality was assessed by the degree of stretching of cardboard creasing channel.
Keywords: creasing; paperboard; voltage; flexion; bundle; packaging.