

УДК 676.27; 676.84

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КАРТОНУ ТА ГОФРОКАРТОНУ ПІД ЧАС ЇХНЬОГО БІГУВАННЯ

А. І. Шустикевич, А. Б. Коломієць, Ю. В. Ватуляк, О. О. Котовський

Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

Аналіз відомих теоретичних та експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей картону і гофрокартону виявив, що вони недостатньо охоплюють діапазон матеріалу пакувань, поширених в Україні. Обґрунтовано необхідність експериментального дослідження для визначення оптимальної глибини бігування картону після релаксації, що оцінюється здатністю до багаторазових чітких згинів без руйнування. Описано стенд та методику виконання досліджень. Представлена залежність для визначення навантаження в зоні бігування. Подані узагальнені графіки окремо для картону різної товщини та типів Е, В, С гофрокартону. Відзначено загальну нелінійність отриманих кривих. Проаналізовано величини зміни деформаційних характеристик зразків – співвідношення максимальної деформації до залишкової, а також оптимальні величини погонного навантаження для отримання якісного згину. Сформульовано рекомендації для виробників та науковців.

Ключові слова: картон, фізико-механічні властивості, бігування, гофрований, згин, стенд, навантаження, стискання, деформація, міцність, залежність.

Постановка проблеми. Для виготовлення картонних пакувань відповідно до світових стандартів FEFCO [1] в пакувальній галузі використовуються різноманітні за своїми деформаційними властивостями види картону і типи гофрокартону за стандартом DIN 55468 [2, 3]. Вибір методу та інструментів обробки заготовок із гофрованого картону пов'язаний з особливостями конструкції розгортки, які отримують після обробки різанням та бігуванням (перфоруванням) згідно з [4]. Вирішальний вплив на якість та стійкість пакувань мають фізико-механічні характеристики матеріалу заготовок (розгортки), а також стабільність розмірів і форми отриманих ліній розділення і згину.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Критерії якості гофрокартону згадані у [5] – це величина опору продавлюванню; торцеве стискання (залежить від типу гофри); площинне стискання (опір продавлюванню не залежить від геометричних параметрів гофрошару).

У європейських країнах відомим є критерій міцності на стискання – це здатність картону протистояти зусиллям стиснення [6]. Відомо, що багатошаровий картон має унікальне співвідношення між міцністю на стискання і міцністю на

розривання: міцність на стискання завжди в два-три рази нижча за міцність на розривання. Цей зв'язок є ключовим фактором, що дозволяє бігування, фальцювання та тиснення.

Глибокі теоретичні дослідження явищ у структурі картону під час його деформування виконуються вченими з Швеції, Фінляндії, Великої Британії та Бельгії. Наприклад, у роботі [7] представлені експериментальні дослідження, спрямовані на визначення оптимальної форми багатоцільового інструменту. Вказано на особливості отримання вірогідних результатів для гофрокартону, що залежать від того, на яку частину гофри флютингу припадає дія бігувального інструменту. Поведінку структури картону у дослідженні [8] представлено у вигляді енергетичних формул та оптимізовано чисельно для прогнозування розшарування із врахуванням зсуву між шарами. Теоретичні залежності підтверджені експериментальними дослідженнями.

У роботі [9] Т. Нордstrand теоретично та експериментально розглядає структурні властивості та поведінку гофрокартону та контейнерів під час згинання та руйнування з метою створення теоретичного інструменту для аналізу міцності коробок, який може використовуватися конструкторами коробок з гофрокартону. Цей інструмент заснований на аналізі кінцевих елементів. Вивченню деформаційних змін у гофрокартоні присвячена також робота [10] шведських вчених П. Ісаксона та Р. Хагглунда.

Виявлено, що експериментальні дослідження мали лімітований характер (для обмеженої кількості типів гофрокартону) і проводились на матеріалах, доступних у скандинавських країнах. В Україні розповсюдженими є паперово-картонні матеріали з інших країн, які мають дещо відмінні від скандинавських фізико-механічні характеристики [5]. Крім того, для створення дієвих рекомендацій виробникам пакування важливими є усталені параметри глибини бігування матеріалу, що виявляються через деякий час після здійснення процесу деформування структури.

Мета статті – експериментальне дослідження для визначення оптимальної глибини бігування картону після релаксації, що оцінюється здатністю до багаторазових чітких згинів без руйнування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для експериментальних досліджень було обрано 8 наборів зразків картону різного виду завтовшки від 0,36 мм до 1,0 мм та 4 набори зразків тришарового гофрокартону завтовшки від 1,2 мм до 4,0 мм (тобто типів Е, В, С). Дослідження виконувались з урахуванням методик стандартів [11–13].

Дослідження зразків проводилося на відповідному пристосуванні, схема якого зображена на рис. 1. Досліджуваний зразок 2 встановлювали на столі 1. На зразок опускали бігувальну лінійку 3 завдовжки 25 мм, яка була закріплена на важелі 7. Зусилля стискання між бігувальною лінійкою і зразком картону створювали за допомогою металевих циліндрів 5 (вагою від 0 до 660 Н), якими навантажували важіль 6, що був шарнірно зв'язаний з важелем 7 (рис. 1).

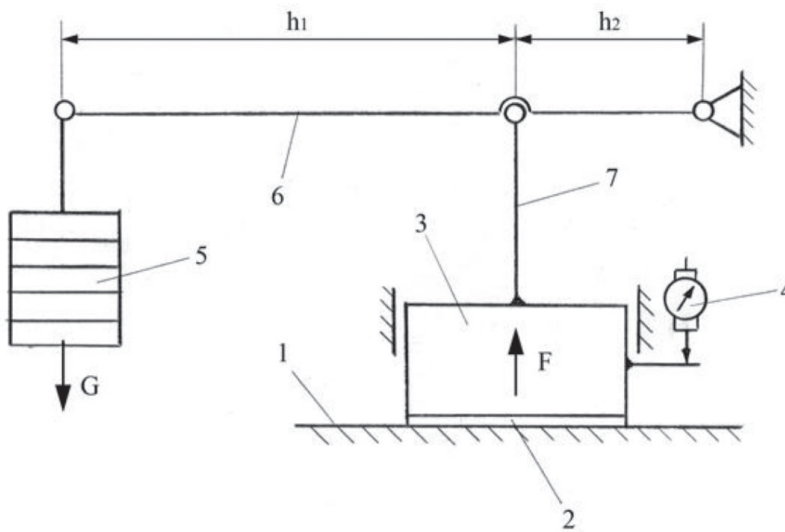


Рис. 1. Схема пристрою для дослідження деформаційних властивостей картону

Максимальну деформацію досліджуваного зразка оцінювали індикатором годинникового типу 4 з ціною поділки 10^{-5} м. Навантаження в зоні бігування визначали за формулою:

$$P = \frac{G \cdot g(h_1 + h_2)}{h_2},$$

де G – маса вантажів; h_1 і h_2 – плечі ($h_1=860$ мм; $h_2=230$ мм).

Дослідження проводили в такій послідовності: спочатку встановлювали один вантаж і заміряли при цьому максимальну деформацію картону, потім змінювали місце бігування картону і встановлювали на важіль 6 два або більше вантажів. Для кожного значення маси вантажу було визначено власну глибину деформації картону під час виконання операції бігування і час часткового відновлення форми заглибини (бігу) до остаточної оптимальної величини.

У подальшому зразок картону залишали у вільному (недеформованому) стані упродовж трьох годин. Термін часу у три години вибрано з міркувань досягнення повної стабілізації залишкової деформації. Після цього за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 10^{-5} м, закріпленого на магнітній стійці, вимірювали залишкову деформацію досліджуваного зразка.

На підставі отриманих даних побудовано типові діаграми стискання для кожного досліджуваного виду картону (рис. 2) і типу гофрокартону (рис. 3). На графіках (рис. 2) показано: крива 1 утворена з вимірів під час навантаження зразка; крива 2 – після трьох годин витримки.

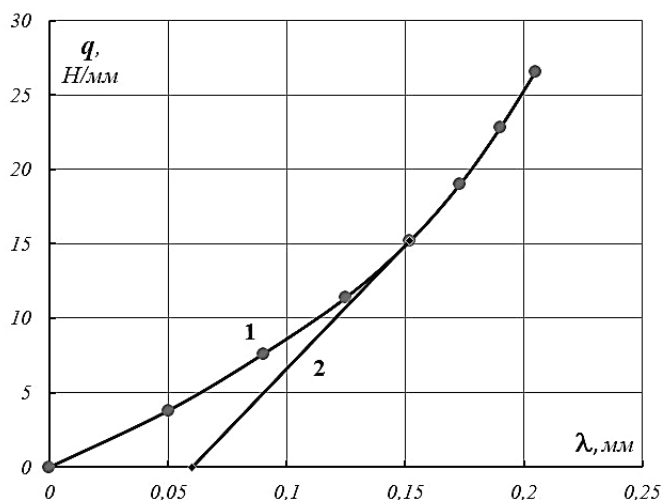


Рис. 2. Деформаційна характеристика картону № 1 товщиною $d=0,36$ мм

Проведені експериментальні дослідження виявили наступне. Всі криві, отримані вимірюваннями під час навантаження, мають нелінійну характеристику. Діаграми стиснення для картонів при збільшенні технологічного навантаження плавно зростають майже у прямій пропорції до зміни деформації. Під час зусилля стиснення, більшого за 15–20 Н/мм, для зразків картону № 1, 2, 3, 5, 6 і 8 спостерігається зменшення приросту деформації, що свідчить про ущільнення цих зразків картону.

Для зразків картону № 1–4 (товщиною від 0,36 до 0,5 мм) залишкова деформація становить близько 0,06–0,08 мм. Це приблизно втричі менше від максимальної деформації при погонному зусиллі у 26,6 Н/мм. Отже, початкова деформація повинна бути втричі більшою від оптимально-раціональної, щоб забезпечити якісне згинання без руйнування картону. Для зразків картону № 5–8 (товщиною 0,66–1,0 мм) залишкова деформація складає 0,10–0,12 мм. Відношення максимальної деформації до залишкової – 3 рази, для зразків картону № 8 – 4 рази. Для зразків № 1–4 оптимальною величиною, за якою можливо отримати якісний згин, є погонне навантаження у 12 Н/мм, для зразків № 5–8 оптимальним є погонне зусилля у 15 Н/мм.

На графіках (рис. 3) показано: крива 1 знята при навантаженні зразка (розташування хвиль перпендикулярне); крива 2 – для цього ж зразка після трьох годин витримки; крива 3 – при навантаженні зразка (розташування хвиль паралельне); крива 4 – для цього ж зразка після трьох годин витримки. Для чотирьох зразків гофрокартону знімали показники деформації для розташування хвиль (гофри) паралельно і перпендикулярно відносно розташування бігувальної лінійки. Також для всіх зразків визначене мінімальне погонне зусилля, за якого можливо отримати якісний згин.

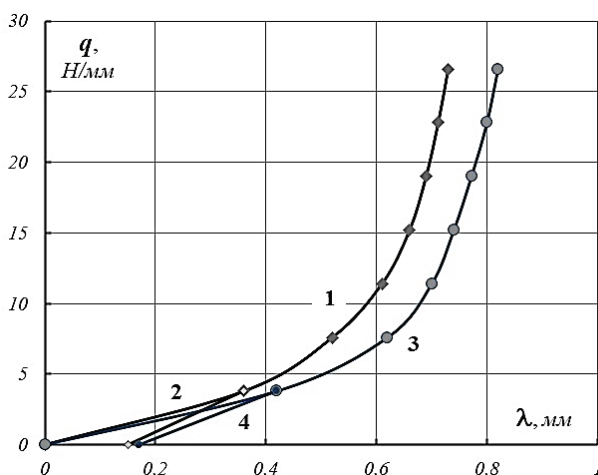


Рис. 3. Деформаційна характеристика гофрокартону № 9 (тип Е товщиною $d=1,2$ мм)

Під час дослідження зразків **гофрокартону** № 9 і 10 типу Е («мікрогофра») виявлено, що із зростанням навантаження стрімко зростає деформація. Для зразків № 11 і 12 процес деформування відбувається ще швидше. Це пояснюється тим, що на початку навантаження відбувається зминання хвиль гофри, згодом спостерігається стрімке зростання зусиль за незначного збільшення деформації. Початкова деформація (відповідає зусиллю у 4 Н/мм) більша приблизно в 1,1 рази для випадку розташування хвиль гофри паралельно бігувальній лінійці порівняно із зразками з розташуванням хвиль гофри перпендикулярно до інструменту.

Для зразків № 9 і 10 (товщиною 1,2 мм та 1,8 мм) залишкова деформація становить, відповідно, 0,15–0,17 мм та 0,22–0,26 мм. Тут більші значення залишкової деформації отримані для зразків із розташуванням хвиль гофри паралельно до напрямку бігувальної лінійки. Співвідношення максимальної деформації до залишкової для згаданих зразків становить 5 разів.

Для зразків гофрокартону № 11 (тип В товщиною 2,65 мм) та № 12 (тип С товщиною 4,0 мм) залишкова деформація склала, відповідно, 0,29–0,33 мм і 0,64–0,70 мм. Відношення максимальної деформації до залишкової для зразка № 11 становить 7 разів, для зразка № 12 – 5 разів. Для зразків гофрокартону № 9–11 оптимальною величиною погонного навантаження, за якої можливо отримати якісний згин, є 7,5 Н/мм, для зразка № 12 – 15 Н/мм, тобто удвічі більше.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень можна рекомендувати для досліджених видів картону і типів гофрокартону конкретні режими бігування, а саме – початкову глибину та відповідне зусилля бігування. Ці дані можуть бути застосовані, наприклад, для дослідження процесу об'ємного формування паковань з картону або гофрокартону методом прошовування заготовки [14].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. FEFCO/EN/ISO/TAPPI, revision October 2018. URL: <http://www.fefco.org/technical-information/standards-guidelines>.
2. Dieter Kleeberg. Substrates for printing and packaging. Product enhancement – a glossary for print providers. *Supplement to KBA Report*. No. 33, 9/2008 (English edition). p. 4. URL: www.koenig-bauer.com/fileadmin/user_upload/KBA_Report/r33_beilage_en.pdf.
3. DIN 19303. Karton - Begriffe und Sorteneinteilungen, Cardboard - Terms and grades.
4. Регей І. І. Розгортки з гофрованого картону. *Упаковка*. 2021. № 4 (143). С. 18–21.
5. Фізико-хімічні властивості пакувальних матеріалів : навч. посіб. / Костюк В. С., Соколенко А. І, Васильківський К. В. та ін. ; за ред. Соколенка А. І. Київ : Кондор-Видавництво, 2013. 402 с.
6. Cardboard company Holmen Iggesund (Reference Manual). URL: <https://www.iggesund.com/services/knowledge/reference-manual/> (дата звернення: 15.09.2021).
7. Nica W., Chalmet R., Roman J., Juwet M. Inline corrugated board creasing. *Procedia Manufacturing*. 2020. 51. Pp. 501–504.
8. Mullineux G. et al. Numerical optimization approach to modelling delamination and buckling of geometrically constrained structures. *Philosophical Transactions of Royal Society A*. 2012. 370. Pp. 1925–1941. doi:10.1098/rsta.2011.0407.
9. Nordstrand T. Basic testing and strength design of corrugated board and containers. Doctoral Thesis (Structural Mechanics). Lund University, 2003. 150 p.
10. Isaksson P., Hägglund R. A mechanical model of damage and delamination in corrugated board during folding. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, Issue 15, October 2005, Pp. 2299–2315.
11. DIN 55437-1. Testing of board - Creasings - Part 1: Laboratory producing of test creasings.
12. ISO 2493. Determination of resistance to bending.
13. ISO 9895. Compressive strength - Short-span test.
14. Kolomiets A. B., Kotovskii O. O. Research of the cardboard tray and case volumetric forming process. Theoretical foundations of modern science and practice. Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. Melbourne, Australia. 2020. Pp. 55–58. URL: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf> (дата звернення 15.09.2021).

REFERENCES

1. FEFCO/EN/ISO/TAPPI, revision October 2018. Retrieved from <http://www.fefco.org/technical-information/standards-guidelines> (in English).
2. Dieter Kleeberg. (9/2008). Substrates for printing and packaging. Product enhancement – a glossary for print providers. *Supplement to KBA Report*, 33 (English edition), 4. Retrieved from www.koenig-bauer.com/fileadmin/user_upload/KBA_Report/r33_beilage_en.pdf (in English).
3. DIN 19303. Karton - Begriffe und Sorteneinteilungen, Cardboard - Terms and grades (in English).
4. Rehei, I. I. (2021). Rozghortky z hofrovanoho kartonu. *Upakovka*, 4 (143), 18–21 (in Ukrainian).

5. Kostiuk, V. S., Sokolenko, A. I., & Vasylykivskyi, K. V. et al. (2013). *Fizyko-khimichni vlastyosti pakuvalnykh materialiv*. Edited by Sokolenko A. I. (in Ukrainian).
6. Cardboard company Holmen Iggesund (Reference Manual). Retrieved from <https://www.iggesund.com/services/knowledge/reference-manual/> (data zvernennia: 15.09.2021) (in English).
7. Nica, W., Chalmet, R., Roman, J., & Juwet, M. (2020). Inline corrugated board creasing. *Procedia Manufacturing*, 51, 501–504 (in English).
8. Mullineux, G. et al. (2012). Numerical optimization approach to modelling delamination and buckling of geometrically constrained structures. *Philosophical Transactions of Royal Society A*, 370, 1925–1941. doi:10.1098/rsta.2011.0407 (in English).
9. Nordstrand, T. (2003). Basic testing and strength design of corrugated board and containers. Doctoral Thesis (Structural Mechanics). Lund University (in English).
10. Isaksson, P., & Häggglund, R. (October, 2005). A mechanical model of damage and delamination in corrugated board during folding. *Engineering Fracture Mechanics*, 72, 15, 2299–2315 (in English).
11. DIN 55437-1. Testing of board - Creasings - Part 1: Laboratory producing of test creasings (in English).
12. ISO 2493. Determination of resistance to bending (in English).
13. ISO 9895. Compressive strength - Short-span test (in English).
14. Kolomiets, A. B., & Kotovskii, O. O. (2020). Research of the cardboard tray and case volumetric forming process. Theoretical foundations of modern science and practice. Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. Melbourne, Australia, 55–58. Retrieved from <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2020/04/XI-Conference-06-07-Melbourne-Australia.pdf> (дата звернення 15.09.2021) (in English).

doi: 10.32403/0554-4866-2021-2-82-21-28

EXPERIMENTAL RESEARCH OF DEFORMATION PROPERTIES OF CARDBOARD AND CORRUGATED CARDBOARD DURING THEIR CREASING

A. I. Shustykevych, A. B. Kolomiets, Yu. V. Vatuliak, O. O. Kotovskii

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
shustandiv@gmail.com, kolanbor@gmail.com*

Cardboard and corrugated cardboard that meet international standards are used to make cardboard packaging. Physical and mechanical characteristics of the materials affect their deformation properties and, accordingly, the product quality.

An analysis of well-known European theoretical and experimental studies of the physical and mechanical properties of cardboard materials has revealed that they do not cover all cardboard distributed in Ukraine. Especially important for the technological

process is the stability of the dimensions after the application of creasing lines on the cardboard or corrugated cardboard blanks. The necessity of experimental research to determine the optimal depth of cardboard creasing after relaxation is substantiated.

The stand for research is described. For experimental studies, various cardboards with a thickness of 0.36 to 1.0 mm and three-layer corrugated cardboard types E, B, C with a thickness of 1.2 to 4.0 mm are used. The dependence for determining the load in the creasing zone is presented. According to the research methodology, the cardboard samples were sequentially loaded with increasing forces through the creasing ruler; each time they are kept for a certain time and unloaded. Thus, the ability of the material to repeatedly clear folds without destruction is evaluated.

Generalized graphs are presented separately for cardboard of different thickness and corrugated cardboard of E, B, C types. It is noted that all of them have a common feature – nonlinearity. The values of the change in the deformation characteristics of the samples are analyzed, i.e., the ratio of the maximum deformation to the residual. Rational values of running load are also determined to obtain high-quality creasing of the blank.

The presented recommendations for manufacturers and scientists can be applied to research, for example, the process of volumetric formation of packaging.-

Keywords: *cardboard, physical and mechanical properties, creasing, corrugated, bending, stand, load, compression, deformation, strength, dependence.*

Стаття надійшла до редакції 04.10.2021.

Received 04.10.2021.