

Методи розрахунку механічних властивостей гофрованого картону

В.Г. Шевчик, д.т.н., С.Є. Хаджинова, к.т.н., Політехніка Лодзька, Інститут папероробної промисловості і поліграфії, Польща

Гофрований картон широко використовується в різних галузях промисловості, переважно як пакувальний матеріал, але може застосовуватися і під час виготовлення меблів та в будівництві. Перевагою гофрованого картону є те, що він виробляється з відновлюваної сировини, а після використання виробів з нього стає джерелом вторинної сировини. Крім того, його легко утилізувати. Однак через складну конструкцію волокнистого матеріалу, з якого він зроблений, важко передбачити міцнісні характеристики гофрованого картону, які на додаток змінюються залежно від умов його експлуатації. На механічні властивості паперу й картону великий вплив мають вологість і тривалість навантаження. Із збільшенням цих факторів зменшується міцність картону. Для того щоб виключити їхній вплив на результати лабораторних досліджень, у нормах і стандартах, які описують методологію вимірювання механічних параметрів, подано стандартні кліматичні умови. Зазвичай досліджувані матеріали кліматизують за температури повітря 23 °С і відносної вологості повітря 50 %, а швидкість приросту навантаження або швидкість деформації добираються так, щоб дослід тривав від кількох десятків секунд до кількох хвилин.

Папір як в'язкопружне тіло

Папір та картон можна характеризувати властивостями в'язкопружного тіла. У результаті дії навантажень у них виникають пружні, в'язко-пружні і залишкові деформації. Для опису стану паперу, який знаходиться під навантаженням, що діє вздовж однієї вісі, опрацьовано різні реологічні моделі, а їхня корисність проаналізована в багатьох наукових працях [1–7].

Практичну цінність становлять моделі, що складаються з чотирьох елементів, наприклад модель Бюргерса, схема якої представлена на рис. 1. Вони дають можливість описати основні явища, що спостерігаються під час дослідження паперу: релаксацію напружень, релаксацію деформацій, повзучість чи появу залишкових деформацій. Але окрім застосування цих моделей для опису явищ, що мають місце у волокнистих матеріалах, у багатьох випадках можуть з'явитись проблеми, пов'язані з апроксимацією реальних результатів досліджень паперу, під впливом дії різних навантажень. Це пов'язано з поведінкою реальної волокнистої структури і моделі.

Перевагою моделі Бюргерса є чіткий поділ між різними видами деформацій. Пружній деформації відповідає пружний елемент E_1 (рис. 1). За пластичну деформацію відповідає в'язкий елемент η_1 . В'язкопружна деформація представлена елементами E_2 , η_2 (модель Кельвіна — Войта).

Для опису стану паперу окрім одновимірних реологічних моделей використовуються також і двовимірні моделі, які дають можливість описувати складні стани напружень у площині паперу.

М. Мартінковський [8] описав стан паперу за допомогою двовимірної реологічної моделі, яка базується на моделях Зенера і Пойнтінга — Томпсона, що моделюють напруження у двох головних напрямках площини паперу. Згадані чотириелементні моделі мають досить обмежене засто-

сування для опису станів паперу, бо не використовуються для опису залишкових деформацій.

Зробивши узагальнення, можна стверджувати, що наведені вище моделі, хоча і дають можливість одержувати залежності між деформацією, напруженням та часом, але створюють проблеми під час практичного застосування і тому рідко використовуються.

На практиці реологічні моделі використовуються для опису станів паперу, на який уздовж однієї вісі циклічно діє напруження. Часто параметри, що встановлені для однієї програми навантажень, не дають добрих результатів для інших змін навантаження в часі.

Пружність паперу

Часто на практиці для опису стану паперу за низького рівня напружень і короткого часу їхньої дії використовується закон Гука. При цьому нехтуються залишкові деформації, як дуже малі, але отримані результати є досить точними.

У багатьох випадках — як на практиці, так і під час лабораторних досліджень — папір розглядається як пружне тіло. Однією із стандартизованих механічних властивостей, що визначаються для паперу, є модуль Юнга. Відомі також методи для вивчення таких модулів пружності паперу, як коефіцієнт Пуассона та модуль зсуву (модуль пружності другого роду) [8, 9].

Ортотропія механічних властивостей паперу

Види паперу, що виробляються у промислових умовах на папероробних машинах, характеризуються різними механічними властивостями в різних напрямках аркуша, що є характерним для ортотропних тіл. Вісі симетрії цього розподілу, для якого отримують екстремальні значення руйнівного напруження, деформації під час розриву та модуля Юнга, зазвичай збігаються з основними напрямками паперу, тобто машинним напрямком (MD) і поперечним





напрямок (CD). У деяких випадках головні вісі ортотропії у площині паперу відхиляються на деякий кут від машинного і поперечного напрямків. На рис. 2 наведено приклад розподілу показника жорсткості розтягування TSI [10], що відповідає поділу модуля Юнга на складові у площині паперу, головні вісі ортотропії якого обернені по відношенню до головної вісі у площині паперу на кут α . На рис. 3 показані приклади розподілу модулів Юнга, коефіцієнтів Пуассона і модулів зсуву, згідно з Уесаке [11], у площині паперу.

Диференціація властивостей паперу у площині виникає з орієнтації волокон. Під час виробництва паперу як в ситовій, так і в пресовій частинах папероробної машини відбувається направлена орієнтація волокон у полотні. Щоправда, аналізуючи волокнисту структуру, важко зауважити упорядковане розташування волокон, але під час формування паперу його «поздовжні вісі» зазвичай розташовуються вздовж напрямку руху полотна.

Під терміном «вісь волокна» слід розуміти умовну вісь, яка символізує його найбільший розмір, тому що, насправді, форми волокон дуже різні. Найчастіше вони приймають форму скручених трубочок різних діаметрів.

Структура паперу є причиною того, що він має більш високі міцнісні властивості в напрямку вздовж «осі волокна», ніж у поперечному напрямку. І, навпаки, можливість деформації є значно більшою в напрямку, перпендикулярному напрямку волокон.

Для більшості видів паперу коефіцієнт анізотропії для міцності під час розтягування у поздовжньому (машинному) напрямку і поперечному знаходиться в діапазоні від 2 до 3.

Підсумки

Представлені характеристики матеріалів (видів паперу), з яких виробляється гофрокартон, призвели до того, що

механічні властивості гофрованого картону визначаються на основі лабораторних досліджень і під час їхнього прогнозування не використовуються аналітичні методи.

Використання методики прогнозування таких параметрів, як жорсткість до згинання (BS) і опір гофрокартону до стискання (ECT), на основі механічних властивостей окремих шарів (видів паперу), дає можливість вибрати оптимальну сировину для виготовлення гофрованого картону. Крім того, методи аналізу міцності гофрокартону за різних умов навантаження можуть бути використані під час оцінювання несучої здатності виготовлених із цього гофрокартону пакувань.

На підставі актуального стану знань може бути представлена теза, що, трактуючи папери як ортотропні пружні матеріали, можна прогнозувати механічні властивості гофрованого картону, зробленого із цих видів паперу.

Методика досліджень

Метою досліджень є представлення простих і доступних для практичного використання методів прогнозування жорсткості під час згинання і опору торцевому стисканню гофрованого картону.

Обсяг роботи включав лабораторні дослідження жорсткості під час згинання і опору торцевому стисканню для тришарового гофрованого картону і порівняння отриманих результатів з розрахованими згідно із запропонованими формулами.

Досліди проведено з використанням п'яти видів тришарового гофрокартону з різною граматурою, які означено відповідно: $T1$ (430 г/м²), $T2$ (440 г/м²), $T3$ (460 г/м²), $T4$ (490 г/м²), $T5$ (390 г/м²).

Товщина паперу і картону визначалась згідно з нормою PN EN 20534. Усі зразки були кліматизовані за відносної вологості повітря 50 % і температури 23 °С.

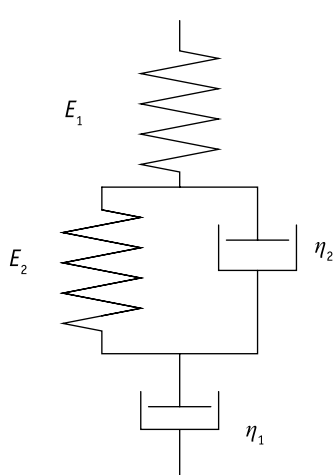


Рис. 1. Схема моделі Бюргера

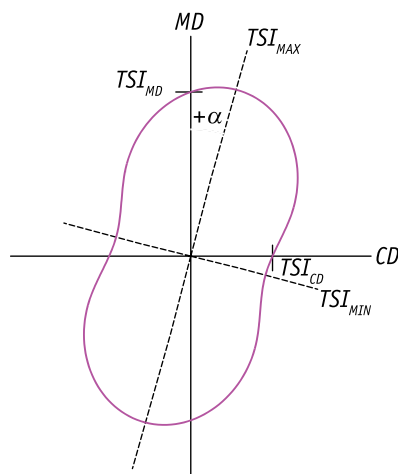


Рис. 2. Розподіл жорсткості розтягування паперу в машинному і поперечному напрямках [10]

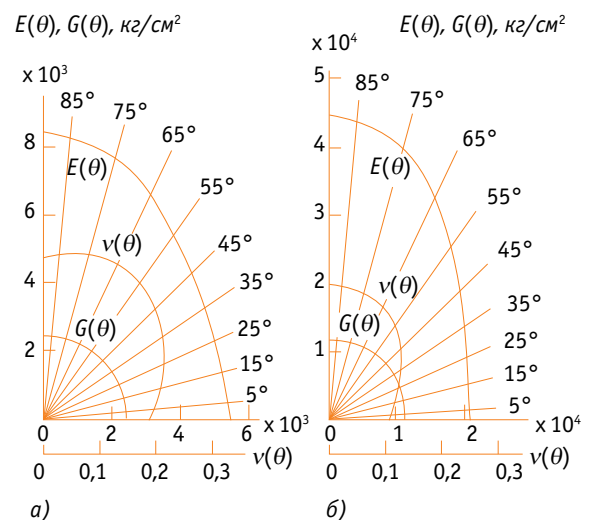


Рис. 3. Розподіл пружних констант залежно від напрямку у площині для письмового (а) та мішкового (б) паперу [11]

Жорсткість під час згинання

У папероробній промисловості показник BS означає жорсткість під час згинання щодо ширини зразка l .

Жорсткість гофрокартону під час згинання у поперечному напрямку (BS_{CD}) розраховано за формулою (у всіх формулах позначення шарів (i) гофрокартону: 1 — верхній (лайнер), 2 — гофрований (флютінг), 3 — нижній (лайнер)):

$$BS_{CD} = \frac{1}{l} \left[\frac{E_{CD1} \cdot J_1}{1 - \nu_{MDCD1} \cdot \nu_{CDMD1}} + E_{CD2} \cdot J_2 + \frac{E_{CD3} \cdot J_3}{1 - \nu_{MDCD3} \cdot \nu_{CDMD3}} \right], \quad (1)$$

де E_{CDi} — модуль Юнга i -го шару у поперечному напрямку; ν_{MDCDi}, ν_{CDMDi} — коефіцієнт Пуассона i -го шару;

J_i — момент інерції перерізу i -го шару щодо нейтральної вісі поперечного перерізу гофрокартону під час згинання. У машинному напрямку момент інерції гофрованого шару J_2 дуже малий, і тому ним можемо знехтувати. Тоді формула для визначення жорсткості під час згинання в машинному напрямку (BS_{MD}) спрощується до вигляду:

$$BS_{MD} = \frac{1}{l} \left[\frac{E_{MD1} \cdot J_1}{1 - \nu_{MDCD1} \cdot \nu_{CDMD1}} + \frac{E_{MD3} \cdot J_3}{1 - \nu_{MDCD3} \cdot \nu_{CDMD3}} \right], \quad (2)$$

де E_{MDi} — модуль Юнга i -го шару в машинному напрямку. Модулі Юнга для видів паперу, з яких зроблено гофрокартон, визначаються згідно із PN EN ISO 1924 2. Жорсткість під час згинання для гофрокартону була визначена за допомогою чотирьохпунктового методу згідно із стандартом PN ISO-5628, використовуючи пристрій для чотирьохпунктового згинання, який показано на рис. 4.

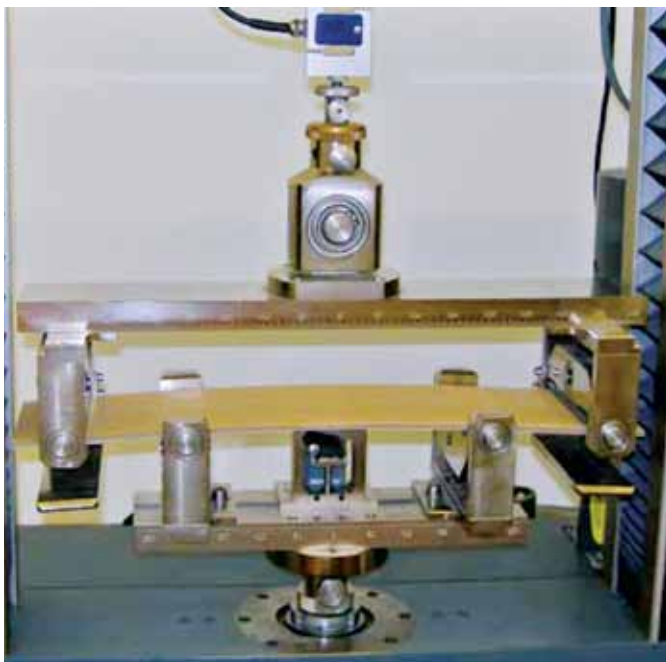


Рис. 4. Пристрій для дослідження жорсткості під час згинання картону із застосуванням чотирьохпунктового методу

Опір торцевому стисканню

На відміну від попередньо використаних методів, у застосованій методиці визначення несучої здатності гофрокартону, підданого дослідженню ECT , ураховано можливість його руйнування не тільки в результаті стискання, але і за рахунок місцевого викривлення окремих шарів.

Напруження стискання, яке призводить до втрати міцності зовнішніх шарів ($i = 1, i = 3$) за рахунок місцевого викривлення, може бути описане формулою:

$$\sigma_{ii} = \frac{4\pi^2}{g_i \cdot p^2} \sqrt{D_{CDi} D_{MDi}}, \quad (3)$$

де p — крок хвилі гофру;

g_i — товщина i -го шару;

D_{CDi}, D_{MDi} — жорсткість під час стискання плоских шарів (лайнерів) у поперечному та машинному напрямках відповідно.

Для гофрованого шару (флютінгу) напруження σ_{12} , яке є причиною втрати міцності шару, може бути розраховане за формулою:

$$\sigma_{12} = \frac{4\pi^2}{g_2 \cdot s^2} \sqrt{D_{CD2} D_{MD2}}. \quad (4)$$

Окремі шари гофрокартону під час торцевого стискання також можуть бути зруйновані. Якщо крок хвилі гофру малий, то напруження, які викликають місцеве викривлення в даному шарі, можуть мати більші значення, ніж допустимі напруження стискання. Припускаючи, що опір стискання даного шару буде визначатися на основі досліджень стискання при малому зазорі (SCT), напруження σ_{si} , яке викликає руйнування i -го шару, можна визначити за формулою:

$$\sigma_{si} = \frac{SCT_{CDi}}{g_i}, \quad (5)$$

де SCT_{CDi} — опір i -го шару стисканню при малому зазорі у поперечному напрямку.

Для того щоб визначити напруження σ_{dopi} , яке викликає втрату міцності i -го шару, можна використати рівняння:

$$\sigma_{dopi} = \min(\sigma_{li}, \sigma_{si}). \quad (6)$$

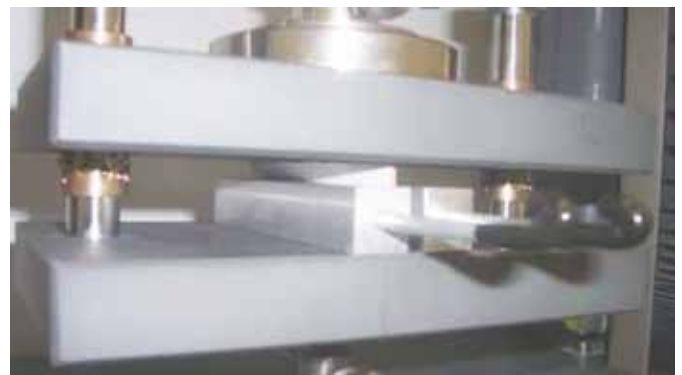


Рис. 5. Прилад для визначення показника ECT



На практиці після втрати міцності через стискання даний шар не може витримати більшого навантаження. Загалом, у разі подальшої деформації шару величина навантаження, яке на нього діє, поступово знижується. Якщо припустити, що від моменту втрати міцності даним шаром до моменту досягнення максимальної міцності гофрокартону навантаження, що діє на даний шар, не зменшиться, максимальну міцність картону N_{Tmax} можна визначити за формулою:

$$N_{Tmax} = \sum_{i=1}^3 \sigma_{dopi} \cdot g_i \cdot \lambda_i, \quad (7)$$

де λ_i — коефіцієнт гофрування i -го шару (для плоских шарів $\lambda = 1$).

Під час визначення мінімального значення лінійного навантаження, яке призводить до втрати міцності гофрокартону, запропоновано такий метод. При цьому прийнято, що в усіх дослідах окремі шари гофрокартону будуть вести себе як лінійно пружні матеріали. Тоді величина деформації ε_{dopi} i -го шару, яка відповідає напруженню σ_{dopi} і яка є причиною втрати його міцності, може бути визначена з формули:

$$\varepsilon_{dopi} = \frac{\sigma_{dopi}}{E_{CDi}}. \quad (8)$$

Під час стискання деформації окремих шарів однакові, і тому міцність першим втратить шар, для якого ε_{dopi} має найменше значення.

Якщо ε_j означає деформацію шару j у момент його руйнування, а індекс j означає порядок окремих шарів, які по черзі втрачають міцність у процесі стискання гофрокартону, то приймемо такі позначення: $\varepsilon_1 = \min(\varepsilon_{dopi})$, $\varepsilon_3 = \max(\varepsilon_{dopi})$, що інакше можна записати у вигляді нерівності $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$. Для визначення мінімального лінійного навантаження N_{Tmin} , що діє на гофрокартон під час торцевого стискання, прийнято, що після втрати міцності окремим шаром у разі подальшого стискання гофрокартону він не приймає жодних навантажень.

Ураховуючи це припущення, можна розрахувати міцність гофрокартону N_{Tj} у момент втрати міцності окремими ша-

рами (індекс j означає порядок втрати міцності окремими шарами):

$$N_{T1} = \varepsilon_1 \cdot \sum_{j=1}^3 E_{CDj} \cdot g_j \cdot \lambda_j; \quad (9)$$

$$N_{T2} = \varepsilon_2 \cdot \sum_{j=2}^3 E_{CDj} \cdot g_j \cdot \lambda_j; \quad (10)$$

$$N_{T3} = \varepsilon_3 \cdot \sum_{j=3}^3 E_{CDj} \cdot g_j \cdot \lambda_j. \quad (11)$$

Приймаючи, що в момент втрати міцності першим шаром гофрокартон втратить свою міцність, нижню границю опору торцевому стисканню можна визначити за допомогою рівняння (9). Тим не менш треба пам'ятати, що визначена таким способом міцність гофрокартону може бути заниженою, бо втрата міцності одним шаром не обов'язково означає втрату міцності всього гофрокартону. У разі подальшого стискання інші шари ще перед втратою своєї міцності можуть бути здатні до перенесення більших навантажень, ніж навантаження гофрокартону, за якого тільки один шар втрачає свою міцність. Теоретично, аналогічна ситуація може мати місце і після втрати міцності наступним шаром. Але для гофрованого картону це практично неможливо, через те що всі шари мають схожі механічні властивості.

Більш точні, ніж у разі застосування рівняння (9), результати розрахунку мінімального опору торцевому стисканню для гофрованого картону можна отримати, беручи до уваги всі згадані вище випадки, у яких відбувається втрата міцності гофрокартону. Це описує залежність:

$$N_{Tmin} = \max(N_{T1}, N_{T2}, N_{T3}). \quad (12)$$

Для того щоб порівняти результати розрахунків, отриманих на основі запропонованої методики, з існуючими залежностями, вибрано три кореляційні рівняння, які дають можливість визначити ECT на базі результатів досліджень SCT [12–14], а для того щоб оцінити результати, отримані за допомогою різних рівнянь, введено позначення ECT_1 , ECT_2 , ECT_3 :

$$ECT_1 = k(SCT_{CD1} + \lambda_2 \cdot SCT_{CD2} + SCT_{CD3}); \quad (13)$$

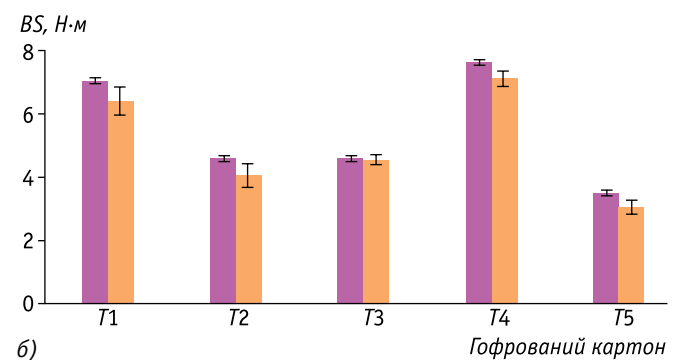
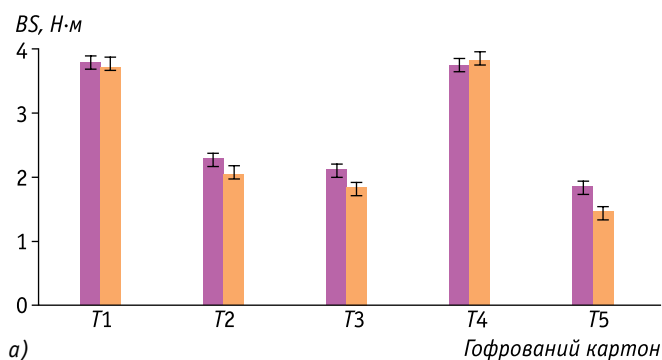


Рис. 6. Жорсткість під час згинання гофрокартону різної граматури (T1, T2, T3, T4, T5) у поперечному (а) та машинному (б) напрямках: визначена експериментально (■); розрахована (■)

$$ECT_2 = 0,45(SCT_{CD1} + \lambda_2 \cdot SCT_{CD2} + SCT_{CD3}) + 1,73; \quad (14)$$

$$ECT_3 = 0,53(SCT_{CD1} + \lambda_2 \cdot SCT_{CD2} + SCT_{CD3}) + 1,49, \quad (15)$$

де k — коефіцієнт, який підбирається емпірично (у даній роботі прийнято, що $k = 0,75$).

Опір стискання при малому зазорі визначається згідно із PN-ISO 9895.

Опір торцевому стисканню для гофрованого картону визначається згідно з PN-EN ISO 3037, а вимірювання були зроблені за допомогою пристрою, приведенного на рис. 5.

Результати досліджень та їхній аналіз

Результати експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків жорсткості під час згинання представлені на рис. 6. На підставі порівняння результатів вимірювань і розрахунків жорсткості під час згинання гофрокартону можна стверджувати, що запропонований метод з великою точністю дає можливість визначити значення жорсткості гофрованого картону на основі його геометричних параметрів і модулів Юнга окремих шарів.

Середнє значення різниці між експериментальними і розрахованими результатами для обох напрямків (машинного і поперечного), знаходиться в межах 9 % від отриманих експериментальних значень.

На рис. 7 представлено порівняння величин опору до стискання (ECT), отриманих в результаті експериментальних досліджень і розрахованих теоретично.

У всіх розглянутих випадках реальні значення ECT є меншими від максимального значення, розрахованого за допомогою запропонованої методики. Це означає, що розрахунок верхньої границі ECT згідно із запропонованим методом дає достатньо добрі результати.

У трьох випадках теоретичне мінімальне значення ECT є більшим від реальних експериментальних значень. Аналізуючи результати мінімального значення ECT , слід пам'ятати, що похибки, які мають місце під час експерименту, наприклад під час вирізання зразків, можуть занижити отримані результати ECT навіть до 20 %. Крім того, навіть у випадку нарізання зразків з використанням спеціалізованого обладнання, як це було під час даних досліджень, краї картону не будуть ідеально рівними і паралельними. Це може призвести до нерівномірного розподілу тиску і зниження значення ECT , що пояснює ситуацію, коли показник ECT був менший від мінімального теоретичного значення. Також треба пам'ятати, що жоден з розрахункових методів не враховує деякі недоліки картону, наприклад різну міцність склеювання шарів гофрокартону. Під час стискання клейові з'єднання можуть потріскатись, що призведе до значного збільшення розмірів поверхні при місцевому викривленні, а отже, знизить міцність картону. У випадку картону $T1$, який характеризується найбільшим кроком хвилі гофру і найбільшою висотою хвилі, міцність картону буде обмежуватись місцевим викривленням. У випадку картону $T2$ і $T3$ місцеве викривлення буде причиною руйнування одного із зовнішніх шарів (лайнерів), а знищення інших відбудеться під впливом стискання. Міцність інших видів гофрованого картону під час торцевого стискання буде визначатись стійкістю їхніх шарів під час стискання. На підставі представлених результатів можна зробити висновок, що в більшості випадків міцність гофрованого картону під час торцевого стискання буде залежати від опору стискання (міцності) окремих видів паперу, з яких його зроблено і величина якого визначається на основі досліджень SCT . Є очевидним у такій ситуації, що кореляційні

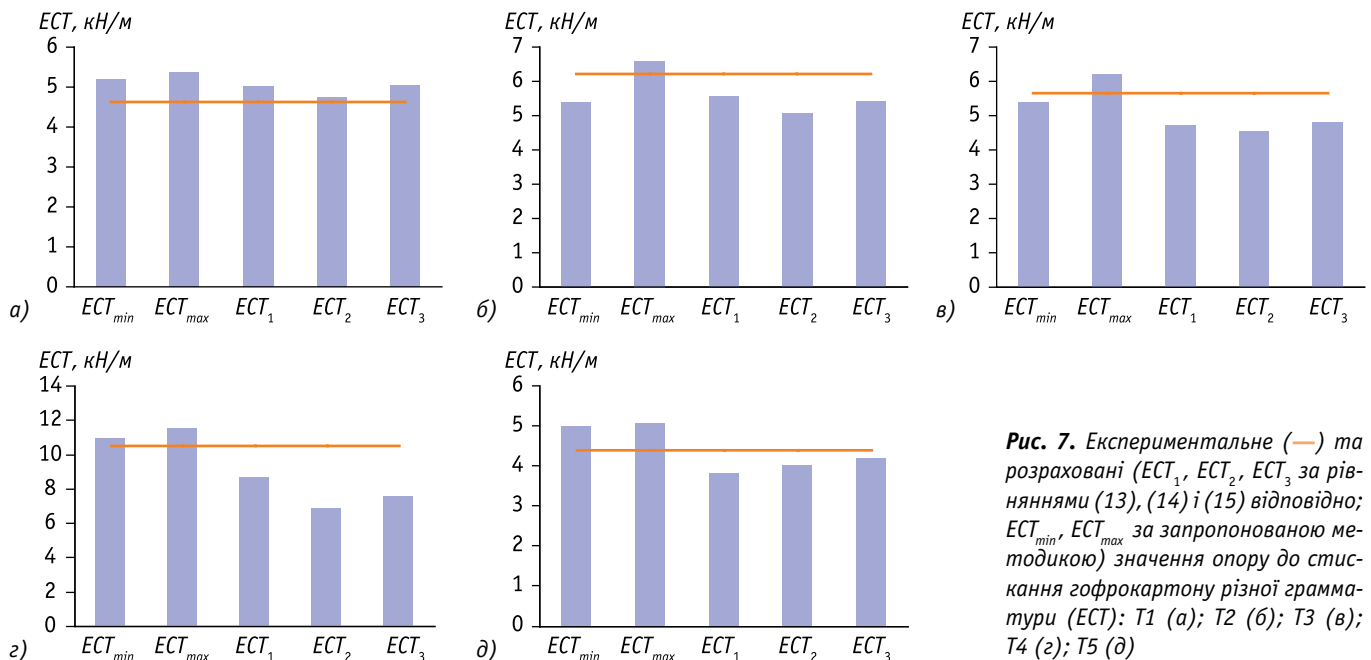


Рис. 7. Експериментальне (—) та розраховані (ECT_1 , ECT_2 , ECT_3 за рівняннями (13), (14) і (15) відповідно; ECT_{min} , ECT_{max} за запропонованою методикою) значення опору до стискання гофрокартону різної граматири (ECT): $T1$ (а); $T2$ (б); $T3$ (в); $T4$ (г); $T5$ (д)



емпіричні залежності, які базуються на результатах досліджень *SCT*, повинні давати результати теоретичних розрахунків, наближені до фактичних значень. Треба, однак, зауважити, що в деяких випадках вирішальну роль відіграє місцеве викривлення окремих шарів і емпіричні залежності можуть призводити до результатів з більшими похибками, ніж у випадку запропонованого аналітичного методу для визначення *ECT*. Представлений метод оцінки *ECT* гофрованого картону дозволяє аналізувати явища, що відбуваються під час дослідження показників міцності, і дає можливість вибрати відповідні складники (види паперу) для виробництва гофрокартону так, щоб у практичних умовах механічні властивості окремих шарів були б повністю використані. Завдяки цьому можна буде знизити вартість виробництва і споживання матеріалів. Крім того — на відміну від розповсюджених емпіричних залежностей — цей метод не вимагає експериментального визначення констант, характерних для різних видів гофрокартону, що полегшує прогнозування опору торцевому стисканню для гофрованого картону, і тому є більш універсальним.

Висновки

1. Запропонований метод розрахунку жорсткості під час згинання і опору торцевому стисканню для гофрованого картону на базі його геометричних параметрів і модулів Юнга окремих шарів дає достатньо добрі результати і дозволяє проводити більш глибокий аналіз досліджуваних явищ порівняно з відомими методами розрахунку.
2. Середні похибки між результатами вимірювань і розрахунків жорсткості під час згинання для всіх розглянутих випадків знаходяться в межах 9 % від отриманих експериментальних значень.
3. У досліджах *ECT* найбільш поширеною причиною втрати міцності окремих шарів, а таким чином і всього гофрокартону, є перевищення допустимих напружень за рахунок стискання. Місцеве викривлення окремих шарів гофрованого картону може мати вплив на значення *ECT* для гофрокартону з великим кроком хвилі гофру і великою висотою хвилі.
4. Отримані результати підтверджують тезу, що за невеликих значень напружень папір можна розглядати як лінійно пружний матеріал, а це дає можливість передбачати механічні властивості виготовленого з нього гофрованого картону.

Література

1. *Stera S.* Wpływ procesu wykończenia papieru na użytkowe oraz strukturalno-reologiczne własności papieru workowego: Praca habilitacyjna. — Łódź: Politechnika Łódzka, 1981.
2. *Fulmański Z.* Badania nad własnościami reologicznymi warstw papierów poddanych działaniu naprężeń ściskających oraz wykorzystanie wyników tych badań w procesie wykonywania elastycznych walców kalandrowych: Praca doktorska. — Łódź: Politechnika Łódzka, 1984.

3. *Papermaking science and technology, Papermaking Part 3, Finishing / Praca zbiorowa, pod red. J. Gullichsen, H. Paulapuro.* — Helsinki: Fapet Oy, 1999. — S. 128–130.
4. *Papermaking science and technology, Part 16, Paper Physics / Praca zbiorowa, pod red. J. Gullichsen, H. Paulapuro.* — Helsinki: Fapet Oy, 1998. — S. 261–268.
5. *Fiejgin W.B.* Obrabotka bumagi dawlennjem. — Moskwa: Lesnaja Promyslennost', 1989. — S. 55–69.
6. *Frolow M.B.* Strukturalnaja miechanika bumagi. — Moskwa, 1982.
7. *Saliklis E.D., Kuskowski S.J.* Constitutive modelling of paper accounting for rate of load and transient relative humidity effects // *Tappi Journal.* — 1998. — № 81(2). — S. 181–188.
8. *Marcinkowski M.* Analiza własności mechanicznych papieru w oparciu o dwuwymiarowy model reologiczny: Praca doktorska. — Łódź: Politechnika Łódzka, 2000.
9. *Vargic L., Bakos D.* Kompozitné materiály na báze papiéra // *Papir a celulóza.* — 1990. — № 45 (6). — S. 35–38.
10. *Markström H.* Testing methods and instruments for corrugated boards. — Kista: Lorentzen & Wettre, 1999.
11. *Uesaka T., Murakami K., Imamura R.* Bi-axial tensile behavior of paper // *Tappi Journal.* — 1979. — № 62(8). — S. 111–114.
12. *Raubal H.G.* Najnowsze osiągnięcia firmy Lorentzen & Wettre w zakresie badań tektury falistej: Konferencja Instytutu Celulozowo-Papierniczego, Stowarzyszenia Papierników Polskich i Krajowej Izby Opakowań «Postęp w produkcji tektury falistej i opakowań papierowych». — Łódź-Arturówek, 26–27.03.1998.
13. *Dąbrowski J., Baranek E.* Sztywność półproduktów papierowych decyduje o właściwościach użytkowych tektury falistej oraz wytwarzanych z niej pudeł: Konferencja Instytutu Celulozowo-Papierniczego, Stowarzyszenia Papierników Polskich i Krajowej Izby Opakowań «Postęp w produkcji tektury falistej i opakowań papierowych». — Łódź-Arturówek, 26–27.03.1998.
14. *Jakubiszyn M., Czechowski J.* Forecasting the properties of corrugated board and packing based on the correlations equations // *Przeegl. Papiern.* — 2002. — № 58 (5). — S. 287–293. ✓

Методы расчета механических свойств гофрированного картона

В.Г. Шевчик, д.т.н., С.Е. Хаджинова, к.т.н.

В статье представлены оригинальные методы расчета жесткости при сгибании и сопротивления торцевому сжатию для гофрированного картона. Эти методы были разработаны на основе предположения, что виды бумаги, которые применяются при изготовлении гофрированного картона, являются упругими материалами. Полученные результаты подтвердили практическую ценность предлагаемого метода расчета механических свойств гофрокартона.

Ключевые слова: бумага; гофрокартон; жесткость при сгибании, сопротивление торцевому сжатию.

Methods for calculating the mechanical properties of corrugated board

V.G. Szewczyk, Dr., S.E. Hadzhinova, Ph.D.

Authors present the original methods for calculating stiffness in bending and resistance of mechanical compression for corrugated cardboard. These techniques are based on the assumption that the types of paper that are used in the manufacture of corrugated cardboard, are elastic materials. The results are confirmed the practical value of the method of calculation of the mechanical properties of corrugated board.

Key words: paper; cardboard; bending stiffness; resistance of mechanical compression.

