

DOI: 10.20535/kpissn.2020.4.227126

УДК 678.027.3.678.073-023.4

О.Л. Сокольський\*, Ю.Ю. Герасименко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\*corresponding author: sokolkiev@ukr.net

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ТЕРМОКЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ

**Проблематика.** Технологія з'єднання термоклеєм широко застосовується для створення картонно-паперового та полімерного пакування в хімічній, харчовій і текстильній промисловості. Щоб задовольнити потреби споживача, необхідно забезпечити достатній рівень міцності тари та зручність використання. При створенні міцної якісної упаковки особлива увага повинна приділятися правильному підбору матеріалів й устаткування. Для створення міцного та надійного з'єднання необхідно розуміти поведінку клейових з'єднань, яка залежить від таких чинників: типу клею, часу затвердіння, типу з'єднання, товщини лінії склеювання і т. д. Тому, для більш ефективного використання клейових матеріалів, необхідно розробити надійні методи проектування та прогнозування поведінки клейових з'єднань.

**Мета досліджень.** Розробити об'єктивний метод випробувань і числовий метод прогнозування поведінки термоклейового з'єднання при розшаруванні для аналізу його міцності.

**Методика реалізації.** Розглянуто інтегральний метод визначення в'язкості руйнування, який можна використовувати незалежно від форми з'єднання, а також від лінійної чи нелінійної поведінки клею. Для прогнозування поведінки термоклейового з'єднання під час навантаження розроблено комп'ютерну розрахункову модель і проведено числовий розрахунок деформацій і напружень, які виникають у клейовому з'єднанні під час розтягувального навантаження.

**Результати досліджень.** Отримано залежності напруження в середині з'єднання від переміщення та зусилля на краях зразка від величини ходу розтягу, що дає змогу оцінити якість з'єднання та вплив жорсткості термопластичного клейового матеріалу на руйнування з'єднання.

**Висновки.** Аналіз отриманих даних показав, що зусилля на краях зразка прямо пропорційні величині ходу розтягу, а також, що руйнування клейового з'єднання відбувається після досягненні межі міцності клею, величина напружень за такої умови спочатку зростає до граничної, а потім залишається сталою до повного руйнування.

**Ключові слова:** термоклей; клейове з'єднання; числове моделювання.

### Вступ

Історично склеювання вважається високопродуктивною універсальною технологією з'єднання. Переважну більшість оригінальних природних сполучних матеріалів тепер замінено синтетично приготованими клеями. Практично всі технічно корисні матеріали можуть бути з'єднані один з одним за допомогою цієї технології. Традиційно вживані клейові з'єднання потребують значного часу набуття планованої міцності та створюють небезпеку через випаровування розчинників у робочій зоні. Перелічених вад можна уникнути, використовуючи термоклейове з'єднання, тобто з'єднання розплавом термопластичного клейового матеріалу (термоклею).

Технологію з'єднання термопластичним клейовим матеріалом широко застосовують у різних сферах промисловості: від структурного з'єднання в авіабудуванні й автомобілебуду-

ванні, а також у будівництві та будівельній промисловості, до неструктурного з'єднання, наприклад, у пакувальній і текстильній промисловості. У роботі розглянуто вплив властивостей термопластичного клейового матеріалу та умов процесу з'єднання на міцність термоклейового з'єднання.

Термоклей є твердим за кімнатної температури. Під час нанесення повинен бути в рідкому стані, оскільки це дасть йому змогу встановити тісний молекулярний контакт із адгезивами. Адгезив – це речовина, що може з'єднувати матеріали за допомогою поверхневого з'єднання (адгезія) та з'єднання, що володіє достатньою внутрішньою міцністю (когезією). Тому перед застосуванням їх необхідно розплавити. Процес плавлення розпочинається при нагріванні вище температури розм'якшення. Термопластичні клейові матеріали досягають необхідної міцності після того, як вони охолонуть до кімнатної температури. Це дає можливість мінімізувати час

з'єднання деталей і підвищити показники продуктивності. Термопластичні клейові матеріали практично не токсичні, а нанесення та склеювання можна легко автоматизувати. Термоклейове з'єднання дає змогу з'єднувати абсолютно різні матеріали між собою чи з іншими матеріалами, зберігаючи водночас їхні специфічні характеристики. До того ж термоклей найкраще підходить для заповнення зазорів і з'єднують широкий спектр пористих і непористих матеріалів.

Термоклей можна наносити екструзуванням, розкочуванням або розпиленням клею, а ручне нанесення зазвичай виконується за допомогою ручних електричних пістолетів. Термопластичні клейові матеріали доступні як циліндричні стрижні, що розплавляються в пістолеті, а також як гранули чи порошок. З'єднання деталей здійснюється відразу після нанесення чи після розігріву затверділих клейових гранул. Залежно від хімічної структури термоклейів температура їх обробки знаходиться в діапазоні від 120 до 240 °С. Оскільки термоклей є термопластичними, їх можна багаторазово плавити та охолоджувати для затвердіння, а з'єднувальні деталі можна термічно від'єднувати та повторно з'єднувати.

Клейовий матеріал повинен відповідати певним вимогам виробника та споживача. Вони залежать від механічних навантажень й умов довкілля під час транспортування, зберігання, кінцевого використання продукту і, нарешті, утилізації.

Руйнування клейового шва переважно може відбуватися трьома способами:

- когезійне руйнування клею;
- міжфазовий розрив між клеєм і з'єднувальним матеріалом;
- когезійне руйнування в з'єднуваному матеріалі.

Розуміння поведінки клейових з'єднань необхідно для реалізації потенціалу термоклею та створення міцних і надійних з'єднань.

Тому розробка надійних методів проектування та прогнозування необхідна для більш ефективного використання клейових матеріалів у промисловості.

### Постановка задачі

Метою дослідження є встановлення об'єктивного методу випробувань і способу прогнозування поведінки термоклейового з'єднання при розшаруванні для аналізу його якості. Використовуючи метод скінченних елементів,

спрогнозувати поведінку термоклейового з'єднання під час навантаження й охарактеризувати вплив жорсткості термопластичного клейового матеріалу на руйнування з'єднання.

### Виклад основного матеріалу

У роботі [1] досліджуються клейові з'єднання композитних матеріалів. Основна увага приділяється дослідженню міцності з'єднання. Розглянуто два основних математичних підходи до аналізу клейових з'єднань: аналітичний і числовий (аналіз методом скінченних елементів) методи. Числові методи розглядають як лінійні, так і нелінійні моделі. Ці методи дають можливість визначити напруження та деформації під час навантаження та спрогнозувати можливі точки руйнування. Метод скінченних елементів має велику перевагу: можна визначити напруження в тілі практично будь-якої геометричної форми. Лінійний і нелінійний аналіз методом скінченних елементів, проведений для різних типів клейових з'єднань, дав змогу оцінити ефективні адгезивні напруження та деформації. Визначено, що міцність на розрив клейових з'єднань залежить від ряду факторів і їх поєднань, наприклад, від типу клею, часу затвердіння, типу з'єднання, товщини лінії склеювання і т. д.

У більшості моделей когезійних зон відношення напружень розтягу та розриву на границі розділу такі, що при збільшенні міжфазової відстані сила зчеплення на границі досягає максимуму (початок тріщини), потім зменшується, а далі тріщина поширюється та відбувається повне роз'єднання. Модель когезійної зони відтворює процес руйнування, розширюючи концепцію механіки суцільних середовищ, включно із зоною розриву, та використовуючи параметри міцності й енергії для характеристики процесу роз'єднання (рис. 1).

На рис. 1,  $b$   $\sigma_1$  – локальна адгезійна міцність,  $J_1$  – інтенсивність вивільнення пружної енергії при поширенні тріщини,  $\delta_1$  – розкриття когезійної зони при максимальному напруженні (локальна деформація матеріалу при розриві),  $\delta_{\max}$  – гранична деформація або максимальне розкриття когезійної зони.

Основна відмінність у моделях когезійних зон полягає в формі кривих напруження–розтяг і параметрах, які описують цю форму. Параметри, що описують закон з'єднання: площа під кривою напруження–розтяг (міцність) і характерна міцність (міцність з'єднання) чи характер-

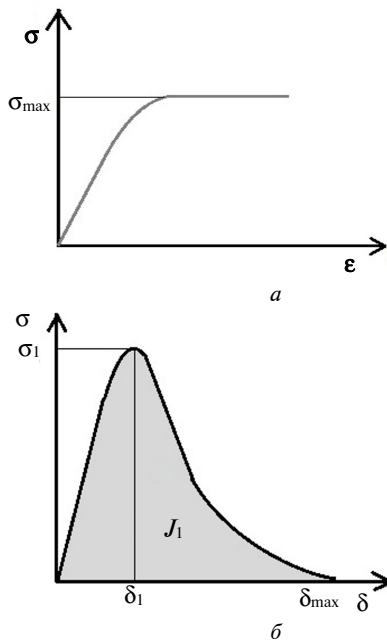


Рис. 1. Залежності у клейовому з'єднанні під час розтягу: а – зміни напружень від деформацій; б – сили реакції від переміщення країв

не зміщення, яке представляє деформацію руйнування в зоні з'єднання. Загальні закони напруження–розтяг для композитів, що пластично руйнуються, та клеїв розглянуті в [2].

У роботі [3] розглядається інтегральний метод визначення в'язкості руйнування. Цей метод можна використовувати незалежно від форми з'єднання, а також від лінійної чи нелінійної поведінки клею. Швидкість нелінійного виділення енергії (*J*-інтеграл) визначається як:

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds), \tag{1}$$

$$W = W(x, y) = W(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij},$$

де *W* – щільність енергії деформації,  $\sigma$  – тензор напружень,  $\epsilon$  – тензор деформацій,  $\Gamma$  – замкнений контур проти годинникової стрілки навколо вершини тріщини, який починається та закінчується на гранях тріщини, *T* – вектор натягу, перпендикулярний напрямку до зовнішньої сторони контуру, *u* – переміщення в напрямку *x*, *ds* – елемент контуру  $\Gamma$ .

Для зразка як подвійна консольна балка з точковими навантаженнями на краю тріщини (рис. 2) *J*-інтеграл визначається так:

$$J = 12 \frac{(Pa)^2}{Eh^3} + P(w'_1 - w'_2), \tag{2}$$

де *P* – прикладене навантаження на одиницю ширини, *a* – довжина тріщини, *h* – товщина прилипання, *E* – модуль пружності, а *w*<sub>1</sub> і *w*<sub>2</sub> – відповідно повороти поверхонь, що вище та нижче примикають до кінчика тріщини.

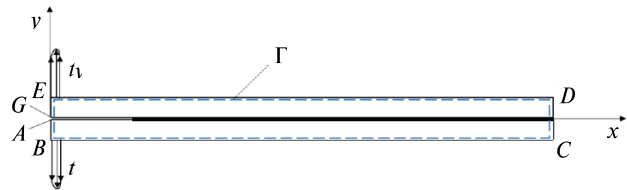


Рис. 2. Розрахункова схема, що використовується для визначення *J*-інтеграла [4]

Оцінка *J*-інтеграла по траєкторії за межами зони попереднього руйнування дає:

$$J = \int_0^{\delta_{nc}} \sigma(\delta_n) d\delta_n, \tag{3}$$

де  $\delta_n$  і  $\delta_{nc}$  – нормальне розкриття початкової тріщини та повне її розкриття відповідно,  $\sigma(\delta_n)$  – нормальне напруження з'єднання.

Нормальне напруження з'єднання можна отримати диференціюванням рівняння (3) з  $\delta_n$ :

$$\sigma(\delta_n) = \frac{\partial J}{\partial \delta_n}.$$

У роботі [4] розглядається поширення квазістатичних тріщин у клейових з'єднаннях.

Швидкість нелінійного виділення енергії:

$$J = \int_{\Gamma} \left( w n_x - \mathbf{t} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} \right) ds = -\frac{1}{b} \frac{\partial \Pi_{NL}}{\partial a}, \tag{4}$$

де *ds* – збільшення довжини за обраним контуром  $\Gamma$ , *t* і *u* – зчеплення та переміщення по  $\Gamma$ , *n<sub>x</sub>* – компонента зовнішнього одиничного вектора нормалі до  $\Gamma$ , *x* – напрям поширення тріщини, *w* – питома енергія деформації.

Критичне значення швидкості нелінійного виділення енергії:

$$J_c = \Omega.$$

Рівняння (4) засноване на припущенні, що матеріал є однорідним. Оскільки матеріал є однорідним, справедливі такі співвідношення:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial \epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \boldsymbol{\sigma}(\epsilon) \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x}, \tag{5}$$

де  $\sigma$  і  $\epsilon$  – тензори напружень і деформацій відповідно.

Інтеграл  $J$  з рівняння (4) визначається як:

$$J = \int_{\Gamma} \left( w n_x - t_y \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) ds, \quad (6)$$

оскільки  $t_x = 0$ .

На рис. 2 показано схему для моделювання руйнування клейових з'єднань.

Беручи до уваги контур  $\Gamma$  (лінія ABCDEG), показаний на рис. 2, єдиною частиною  $\Gamma$ , де  $w$  і  $n_x$  не рівні нулю, є дві прямі лінії AB і EG, де енергія деформації обумовлена тільки дотичними напруженнями та деформаціями, які слід вважати постійними та рівними  $F/A$  і  $F/(\mu A_s)$  відповідно. Отже:

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} w n_x ds &= \int_A^B \frac{F^2}{2\mu A_s A} dy + \int_E^G \frac{F^2}{2\mu A_s A} dy = \\ &= 2 \int_0^{-h} \frac{F^2}{2\mu A_s A} dy = \frac{F^2}{b\mu A_s A} \int_0^{-h} b dy = \\ &= -\frac{F^2}{b\mu A_s}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для другого доданка інтеграла сили реакції, для яких задані переміщення, апроксимуються тут як зосереджені сили. Це означає, що розтягувальні зусилля  $t_y$  можна використовувати для нескінченно малих областей, де  $\partial u_y / \partial x$  є постійним (і може бути взятим з інтеграла (6)).

Обертання верхнього важеля, де передбачено переміщення, вважається позитивним, якщо спрямоване проти годинникової стрілки:

$$\begin{aligned} \text{верх: } \frac{\partial u_y}{\partial x} &= \Theta_v - \frac{F}{\mu A_s}, \\ \text{низ: } \frac{\partial u_y}{\partial x} &= -\Theta_v + \frac{F}{\mu A_s}. \end{aligned}$$

Оскільки  $\partial u_y / \partial x$  можна вирахувати з інтеграла,  $t_y$  позитивна зверху і негативна знизу, отримуємо:

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} t_y \frac{\partial u_y}{\partial x} ds &= 2 \left( \Theta_v - \frac{F}{\mu A_s} \right) \frac{1}{b} \int_{\Gamma_{\text{верх}}} t_y b ds = \\ &= \frac{2}{b} \left( F \Theta_v - \frac{F^2}{\mu A_s} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\Gamma_{\text{верх}}$  – нескінченно мала область зверху, де застосовується розтяг.

Замінивши рівняння (7) і (8) в рівнянні (6) маємо:

$$J = \frac{F^2}{b} \left( \frac{1}{\mu A_s} - \frac{2\Theta_v}{F} \right). \quad (9)$$

Проведено експериментальне дослідження процесу з'єднання термоклеєм за методикою, наведеною в праці [5]. Для паперових зразків задано такі механічні властивості матеріалу: модуль Юнга – 5740 МПа, коефіцієнт Пуассона – 0,276. Термоклей із матеріалу на основі EVA: модуль Юнга – 90 МПа, межа міцності – 8 МПа, коефіцієнт Пуассона – 0,3.

Також проведено числовий розрахунок деформацій і напружень, які виникають у клейовому з'єднанні, при різних значеннях його граничної міцності в межах від 0,05 до 5 МПа. На рис. 3 зображені розподіл деформацій і напружень при заданому значенні міцності з'єднання 5 МПа.

З рис. 3, б видно, що найбільше напруження виникає в середині з'єднання та становить 31 МПа. На рис. 4 зображено графіки залежності напруження в середині з'єднання від переміщення та зусилля на краях зразка від переміщення відповідно.

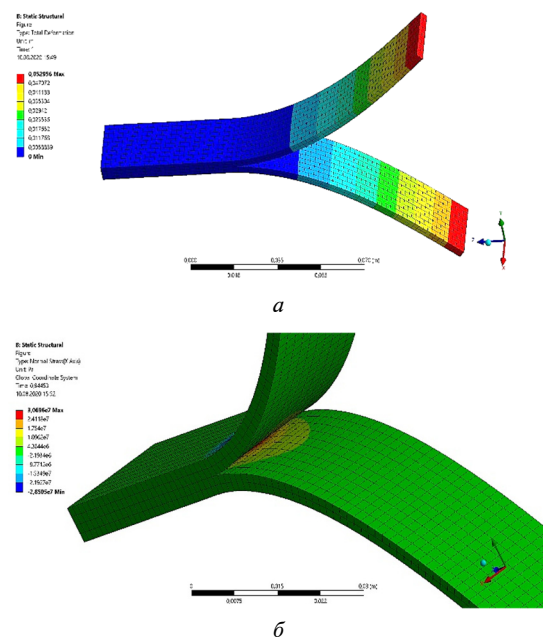


Рис. 3. Модель випробування з'єданого зразка на розтяг: а – розподіл деформацій; б – розподіл напружень

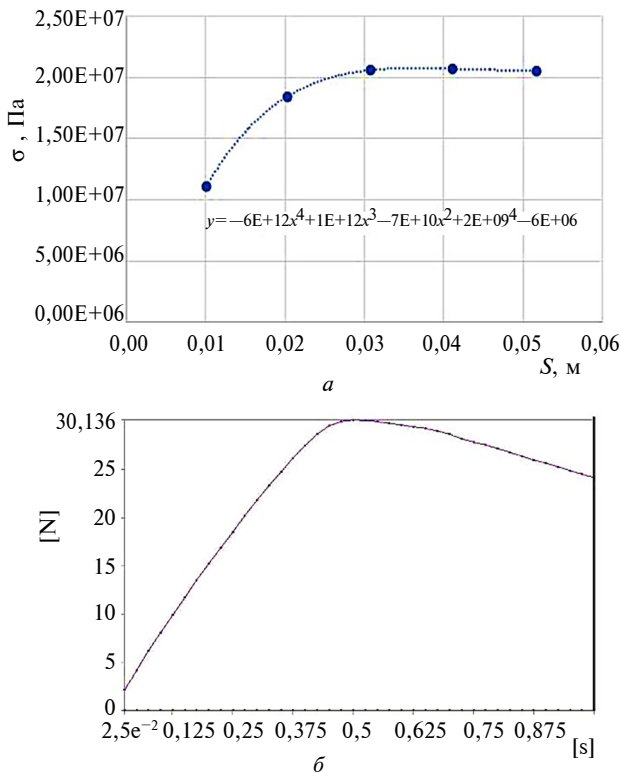


Рис. 4. Графік залежності: *a* – напруження в середині з'єднання від переміщення; *b* – зусилля на краях зразка від переміщення

З рис. 4, *a* видно, що на початку напруження зростають, а при досягненні межі міцності клею відбувається його відрив.

Рівняння залежності напруження у клейовому з'єднанні від величини ходу розтягу має вигляд

$$\sigma = -6 \cdot 10^{12} s^4 + 1 \cdot 10^{12} s^3 - 7 \cdot 10^{10} s^2 + 2 \cdot 10^9 s - 6 \cdot 10^6.$$

Залежність на рис. 4, *b* має лінійний вигляд, тому можна говорити, що зусилля на краях зразка прямо пропорційні величині ходу розтягу. Отримані результати якісно відповідають теоретичній кривій на рис. 1, *a*.

Експериментально отримано залежність реакцій на торцях стрічки зразка від переміщення (рис. 5).

Отриманий графік якісно відповідає теоретичній кривій на рис. 1, *b* і розрахунковій на рис. 4, *b*. Із графіка на рис. 6 можна визначити величину  $J$ -інтеграла, що чисельно дорівнює площі під кривою. Із цієї величини можна за формулою (9) розрахувати величину кута розкриття з'єднання, за якого відбувається його руйнування.

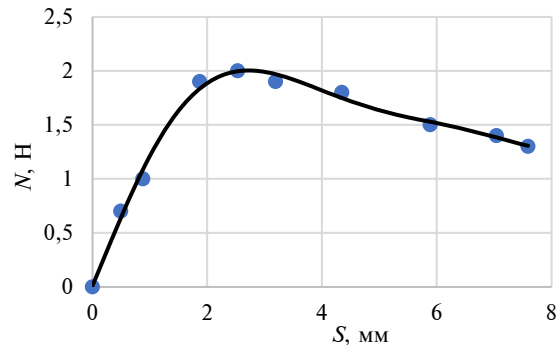


Рис. 5. Графік залежності реакцій на торцях зразка від переміщення

Отриманий графік якісно відповідає теоретичній кривій на рис. 1, *b* і розрахунковій на рис. 4, *b*. Із графіка на рис. 5 можна визначити величину  $J$ -інтеграла, що чисельно дорівнює площі під кривою. Із цієї величини можна за формулою (9) розрахувати величину кута розкриття з'єднання, за якого відбувається його руйнування.

## Висновки

За результатами проведених досліджень можна зазначити:

1. Для дослідження поведінки клейового з'єднання при розшаруванні розроблено комп'ютерну розрахункову модель на базі методу скінченних елементів і проведено числовий розрахунок деформацій і напружень, які виникають у клейовому з'єднанні під час розтягувального навантаження.

2. Для оцінки якості клейового з'єднання отримано залежності напруження в середині з'єднання від переміщення та зусилля на краях зразка від величини ходу розтягу.

3. Показано, що зусилля на краях зразка прямо пропорційні величині ходу розтягу, а також, що руйнування клейового з'єднання відбувається після досягненні межі міцності клею, величина напружень за такої умови спочатку зростає до граничної, а потім залишається сталою до повного руйнування.

Перспективою подальших досліджень може бути числове моделювання реальних термостійких з'єднань із урахуванням емпірично визначеної функціональної залежності сили реакції від переміщення.

## References

- [1] M.D Banea and L.F.M. da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview”, in *Proc. Institution Mech. Engineers, Part L: J. Materials: Design Applicat.*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009. doi: 10.1243/14644207jmda219
- [2] T. Ungsuwarungsri and W.G. Knauss, “The role of damage-softened material behavior in the fracture of composites and adhesives”, *Int. J. Fracture*, vol. 35, no. 3, pp. 221–241, 1987. doi: 10.1007/bf00015590
- [3] M.D. Banea *et al.*, “Temperature dependence of the fracture toughness of adhesively bonded joints”, *J. Adhesion Sci. Technol.*, vol. 24, no. 11–12, pp. 2011–2026, 2010. doi: 10.1163/016942410x507713
- [4] L. Škec *et al.*, “On Gc, Jc and the characterisation of the mode-I fracture resistance in delamination or adhesive debonding”, *Int. J. Solids Structures*, vol. 144–145, pp. 100–122, 2018. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2018.04.020
- [5] Y. Herasimenko and A. Sokolskyi, “Investigation of the flexible packaging elements joining using hot melt adhesive”, *Modern Eng. Innov. Technol.*, vol. 1, no. 11, pp. 5–8, 2020.

А.Л. Сокольский, Ю.Ю. Герасименко

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТЕРМОКЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

**Проблематика.** Технология соединения термоклеем широко применяется для создания картонно-бумажной и полимерной упаковки в химической, пищевой и текстильной промышленности. Чтобы удовлетворить потребности потребителя необходимо обеспечить достаточный уровень прочности упаковки и удобство в использовании. При создании прочной качественной упаковки особое внимание должно уделяться правильному подбору материалов и оборудования. Для создания прочного и надежного соединения необходимо понимать поведение клеевых соединений, которое зависит от следующих факторов: тип клея, время затвердевания, тип соединения, толщины линии склеивания и т. д. Поэтому, для более эффективного использования клеевых материалов необходимо разработать надежные методы проектирования и прогнозирования поведения клеевых соединений.

**Цель исследований.** Разработать объективный метод испытаний и способ прогнозирования поведения термоклеевого соединения при расслаивании для анализа его прочности.

**Методика реализации.** Рассмотрен интегральный метод определения вязкости разрушения, который можно использовать независимо от формы соединения, а также от линейного или нелинейного поведения клея. Для прогнозирования поведения термоклеевого соединения при нагрузке разработана компьютерная расчетная модель и проведен числовой расчет деформаций и напряжений, возникающих в клеевом соединении во время растягивающей нагрузки.

**Результаты исследований.** Получены зависимости напряжения в середине соединения от перемещения и усилия на краях образца от величины хода растяжения, что позволяет оценить качество соединения и влияние жесткости термопластичного клеевого материала на разрушение соединения.

**Выводы.** Анализ полученных данных показал, что усилия на краях образца прямо пропорциональны величине хода растяжения, а также, что разрушение клеевого соединения происходит после достижения предела прочности клея, величина напряжений при этом сначала возрастает до предельной, а затем остается постоянной до полного разрушения.

**Ключевые слова:** термоклей; клеевое соединение; численное моделирование.

O.L. Sokolskyi, Yu.Yu. Herasimenko

### SIMULATION OF THE DAMAGE PROCESS OF THERMAL GLUE BOND

**Background.** Thermal glue bonding technology is widely used to create paper and paperboard packaging and polymer packaging in the chemical, food, and textile industries. To meet the needs of the consumer, it is necessary to provide a sufficient level of packaging strength and ease of use. When creating strong quality packaging, special attention should be paid to the correct selection of materials and equipment. To create a strong and reliable bond, it is necessary to understand the behavior of adhesive bonds, which depends on the following factors: type of adhesive, curing time, type of bond, the thickness of the bond line, etc. Therefore, for more efficient use of adhesive materials, it is necessary to develop reliable methods for designing and predicting the behavior of adhesive bonds.

**Objective.** Development of an objective test method and a method for predicting the behavior of a thermal glue bond during debonding to analyze its strength.

**Methods.** The article considers an integral method for determining fracture toughness, which can be used regardless of the form of the bond, as well as the linear or nonlinear behavior of the thermal glue. To predict the behavior of an thermal glue bond under load, a computer design model was developed and a numerical calculation of deformations and stresses arising in the thermal glue bond during a tensile load was carried out.

**Results.** The dependences of the stress in the middle of the bond on the displacement and the force at the edges of the sample on the magnitude of the tensile stroke were obtained, which makes it possible to evaluate the quality of the bond and the effect of the stiffness of the thermoplastic adhesive on the damage of the bond.

**Conclusions.** An analysis of the data obtained showed that the forces at the edges of the sample are directly proportional to the magnitude of the stretching stroke, and also that the destruction of the thermal glue bond occurs after reaching the ultimate strength of the adhesive, the magnitude of the stresses first increases to the limit, and then remains constant until complete damage.

**Keywords:** thermal glue; adhesive bonding; numerical modeling.

Рекомендована Радою  
хіміко-технологічного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
18 вересня 2020 року

Прийнята до публікації  
10 грудня 2020 року

