

УДК
678.029.43:
[621.791.042+
678.073]

ГЕРАСИМЕНКО Ю. Ю., СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ ТЕРМОКЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ

Мета. Розробити числовий метод прогнозування товщини та ширини термоклейового шва під дією механічного зусилля та охолодження, а також дослідити вплив притискного зусилля та витрати термоклею на ширину шва, яка впливає на міцність та герметичність термоклейового з'єднання.

Методика. Для прогнозування утворення термоклейового шва під дією механічного зусилля та охолодження розроблено комп'ютерну розрахункову модель і проведено числовий розрахунок розподілу температур та деформації шару термоклею від притискного зусилля валків та витрати термоклею. Результати числового моделювання підтверджено експериментально із застосуванням створеної дослідної установки для термоклейового з'єднання.

Результати. Запропонована математична модель процесу охолодження розплаву полімеру та його деформації з врахуванням закону в'язкості Кросса (Cross Law) від швидкості деформації та залежності в'язкості від температури. Розрахунковим та експериментальним шляхом встановлено початкові та граничні умови, що визначають даний процес. Отримано залежності ширини шва від притискного зусилля валків, а також залежності ширини шва від витрати термоклею. Встановлено, що зі збільшенням витрати термоклею ширина шва зростає за логарифмічною залежністю. При збільшенні притискного зусилля валків ширина шва зростає за квадратичною залежністю.

Наукова новизна. Визначено вплив притискного зусилля валків та витрати термоклею на ширину шва. Встановлено, що при збільшенні значення притискного зусилля від 10,5 Н до 20,5 Н, ширина шва збільшується з 8 мм до 17 мм (майже у два рази).

Практична значимість. Числове моделювання процесу утворення термоклейового з'єднання дозволяє прогнозувати оптимальні значення витрати термоклею та притискного зусилля валків, щоб отримати необхідну ширину шва, яка б забезпечувала як оптимальну для споживача міцність з'єднання, так і достатню для підтримки герметичності пакування.

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

Вступ. На сьогоднішній день склеювання є найбільш універсальною та високопродуктивною технікою з'єднання. Майже всі технічно корисні матеріали у різній їх комбінації піддаються склеюванню та зберігають при цьому необхідні характеристики. Переважну більшість вихідних натуральних сполучних матеріалів замінено синтетичними клеями у вигляді розчинів, мономерів та клею-розплаву (термоклею) [1].

Склеювання як процес з'єднання дозволяє поєднувати тонкі матеріали. Це є перевагою і дозволяє знизити вагу готового виробу при його виготовленні. Крім того, термоклей є основою для виготовлення різних плівкових ламінатів у пакувальній промисловості.

Клейові з'єднання мають переваги над іншими видами механічних з'єднань, оскільки забезпечують рівномірний розподіл напружень у зоні склеювання, що в свою чергу підвищує жорсткість та передачу навантажень.

Для оптимізації міцності та герметичності термоклейового з'єднання необхідно враховувати низку параметрів:

- хімічний склад та рецептура термоклею, його робоча температура, механічні, реологічні та теплофізичні властивості;
- процес підготовки розплаву та спосіб нанесення;
- температура твердіння.

Наведені параметри безпосередньо впливають на якість утвореного з'єднання.

Існують роботи, які описують процес утворення нероз'ємних зварних та клейових з'єднань [2] та їх руйнування [3, 4], проте прогнозування геометричних та міцнісних параметрів з'єднань гнучких деформівних матеріалів розглянуто недостатньо.

Постановка завдання.

В наявних наукових джерелах як правило розглядається два типи задач деформації матеріалу між обертовими валками:

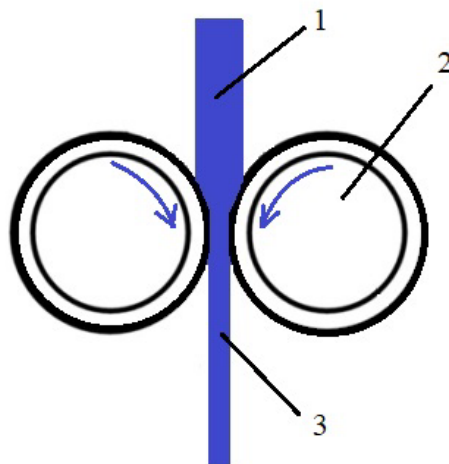
1) прокатка металевих матеріалів, де розглядаються задачі їх охолодження після проходження валків [5, 6], причому кінцева товщина стрічки однозначно задана зазором між валками, а властивості матеріалу вважаються лінійними;

2) каландрування полімерних матеріалів між валками з фіксованим зазором з урахуванням нелінійних властивостей полімерів і неізотермічності процесу [7–9], причому товщина матеріалу на виході залежить від еластичних властивостей матеріалу. Але зміна ширини стрічки при цьому не розглядається.

В основу даного дослідження покладено мету розробити числовий метод прогнозування товщини та ширини термоклейового шва під дією притискного зусилля валків та охолодження. Проаналізувати вплив притискного зусилля та витрати термоклею на ширину шва з метою подальшого прогнозування оптимальних значень цих параметрів для забезпечення необхідної міцності з'єднання.

Результати дослідження. Дослідження процесу утворення термоклейового з'єднання проводилось згідно методики наведеній у [10]. Цей процес складається з декількох стадій. Він потребує контролю над такими параметрами як: початкова температура розплаву, швидкість подачі розплаву, притискне зусилля валків, кількість розплаву термоклею. Також важливо розуміти взаємовплив цих параметрів.

Схема процесу утворення термоклейового з'єднання між валками зображена на рис. 1.



1 – розплав термоклею; 2 – валки, що обертаються в протилежних напрямках; 3 – стрічка термоклейового шва

Рис. 1. Схема процесу утворення термоклейового шва між валками

Розплав термоклею під дією сили тяжіння подається у зону, утворену двома валками, що обертаються назустріч один одному, де відбувається процес прикатки валками (рис. 1). У цій зоні відбувається деформування шару термоклею під дією притискного зусилля валків та подальше його охолодження. Термоклей за короткий час починає тверднути і на виході перетворюється на стрічку. Процес утворення термоклейового шва можна розділити на 3 стадії: процес течії розплаву термоклею, теплопередача та затвердіння.

Розглянемо зв'язану термомеханічну задачу твердіння та деформації шва термоклею під дією механічного зусилля та охолодження.

Математичну модель охолодження розплаву полімеру можна представити системою рівнянь, яка складається з рівняння нерозривності, нестационарних рівнянь збереження кількості руху та енергії [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}; \\ \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}h) \right] = \nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T] + \bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}, \end{array} \right.$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ;

\mathbf{v} – вектор швидкості, м/с ;

ρ – густина, кг/м^3 ;

t – час, с ;

p – зовнішній гідростатичний тиск, Па ;

$\bar{\bar{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\mathbf{D}}$ – тензор в'язких напружень другого рангу, Па ;

$\dot{\mathbf{D}} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)$ – тензор швидкості деформації, с^{-1} ;

$\eta(\dot{\gamma})$ – динамічна в'язкість термोकлею як функція градієнта швидкості $\dot{\gamma}$ (швидкості зсуву), $\text{Па}\cdot\text{с}$;

$h = \int_0^T c_p(T) dT$ – масова ентальпія, Дж/кг ;

c_p – масова теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

$\bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}$ – член, що визначає дисипацію механічної енергії, Вт/м^3 ;

T – абсолютна температура, К ;

$(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку.

В математичній моделі використовувався закон в'язкості Кросса (Cross Law) від швидкості деформації та залежності в'язкості від температури.

Закон з врахуванням температурної залежності в'язкості для даного класу матеріалів має вигляд:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0}{1 + (\varepsilon \dot{\gamma})^m} H(T),$$

де η_0 – в'язкість розплаву полімеру за мінімальної швидкості зсуву, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ε – період релаксації, с ;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с^{-1} ;

m – показник ступеня, який визначає неньютонівські властивості термोकлею;

$$H(T) = \exp \left[\frac{E_a}{RT_a} \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right) \right];$$

E_a – енергія активації течії, Дж/моль;

R – газова стала, Дж/(моль·К);

T_a – абсолютна температура активації, К;

T_0 – абсолютна температура відліку, К.

За початкові умови приймаються розподіл полів компонент вектора швидкості \mathbf{v}_0 , й температури T_0 в момент часу $t = 0$:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{cases}$$

де $(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м;

Ω – розрахункова область.

Для граничних умов задають:

– на площині перерізу – температуру й нормальну компоненту швидкості або масову витрату матеріалу:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{cases}$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні площини перерізу;

v_{inlet}, T_{inlet} – швидкість (м/с), масова витрата (кг/с) та абсолютна температура (К) у початковій площині перерізу, відповідно;

– на поверхнях контакту термоклею з валком задаються умови прилипання:

$$\mathbf{v}_w = \mathbf{v}_{wt}; \quad \mathbf{v}_t = \mathbf{v}_{tt},$$

де $\mathbf{v}_w, \mathbf{v}_t$ – вектори результуючої та тангенціальної швидкості поверхні валка, м/с;

v_{wt}, v_{tt} – тангенціальні компоненти векторів результуючої та тангенціальної швидкості термоклею на поверхні валка, м/с;

– на зовнішній поверхні, що контактує з валком – граничні умови III роду:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \alpha(T - T_\infty),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні, який знаходиться експериментально, Вт/(м²·К);

T_∞ – абсолютна температура поверхні валка, К;

\mathbf{q} – вектор густини теплового потоку, Вт/м².

Для дослідження процесу утворення термоклейового шва розроблено комп'ютерну розрахункову модель на базі методу скінченних елементів і проведено числові розрахунки. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

Процес утворення термоклейового шва між валками – є складним завданням тривимірного моделювання. Тому для зручності моделювання та побудови комп'ютерної моделі виконано спрощення. Оскільки товщина шару термоклею набагато менша ніж довжина поверхні валків та ширина утвореної стрічки, то для розрахунків з 3D моделі переходимо до 2D моделі. Через те що задача є симетричною, тому для 2D аналізу створено геометрію половинки шару термоклею з початковими розмірами: ширина – 3 мм, товщина – 0,5 мм (рис. 2). Використовувався термоклей на основі співполімеру етилену з вінілацетатом (СЕВА). Для заданої геометрії проведено комп'ютерне моделювання розподілу температур та деформації шару термоклею від притискного зусилля валків.

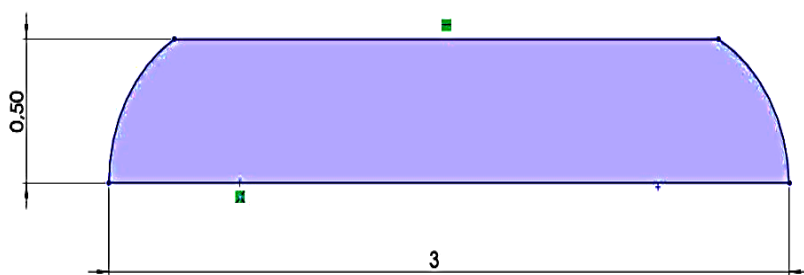


Рис. 2. Початкова геометрія шару термоклею

Числові експерименти здійснювалися для різних значень притискного зусилля валків в межах 8...22 Н за часом до 1 с. Отримано розподіл температур та форму шару термоклею при притискному зусиллі валків 8,66 Н (рис. 3).

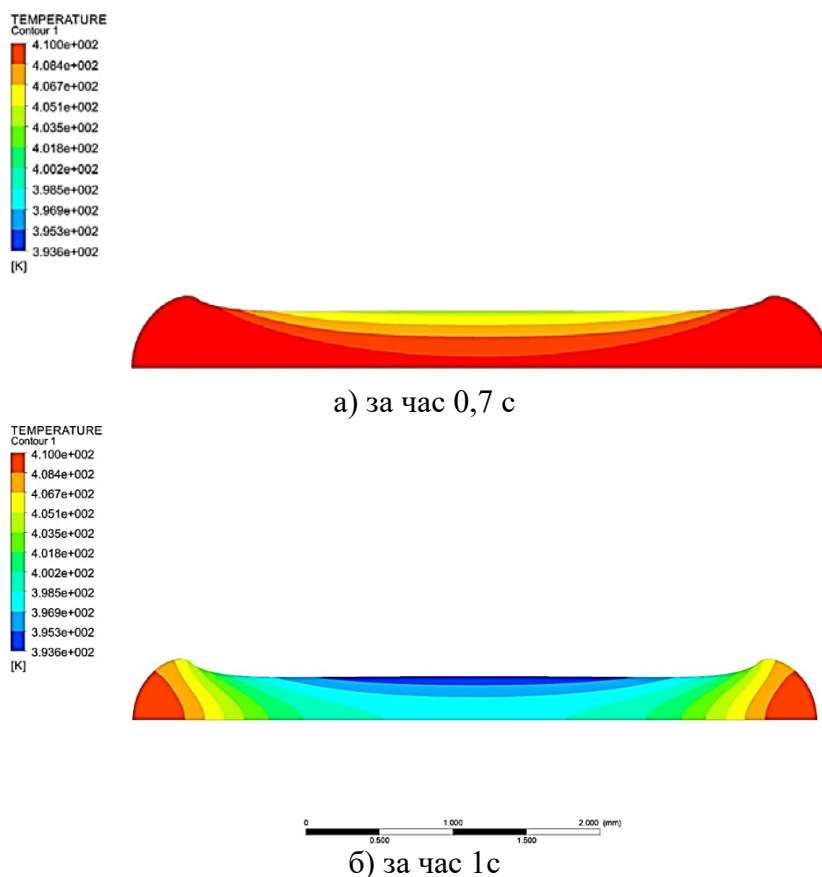


Рис. 3. Розподіл температур та форма шару термоклею при притискному зусиллі валків 8,66 Н

З рис. 3 видно, що термоклей при притискному зусиллі валків в 8,66 Н поступово охолоджується і через 1 с майже на всій поверхні досягає температур нижчих за температуру текучості та починає тверднути. Початкова товщина шару термоклею за час 0,7 с з 1 мм зменшилась до 0,66 мм, а за 1 с становила – 0,58 мм. Ширина шва після 1 с збільшилася з 3 мм до 4,66 мм, тобто у 1,55 рази.

Приклад розподілу температур та форми шару термоклею при притискному зусиллі валків в 13 Н наведено на рис. 4.

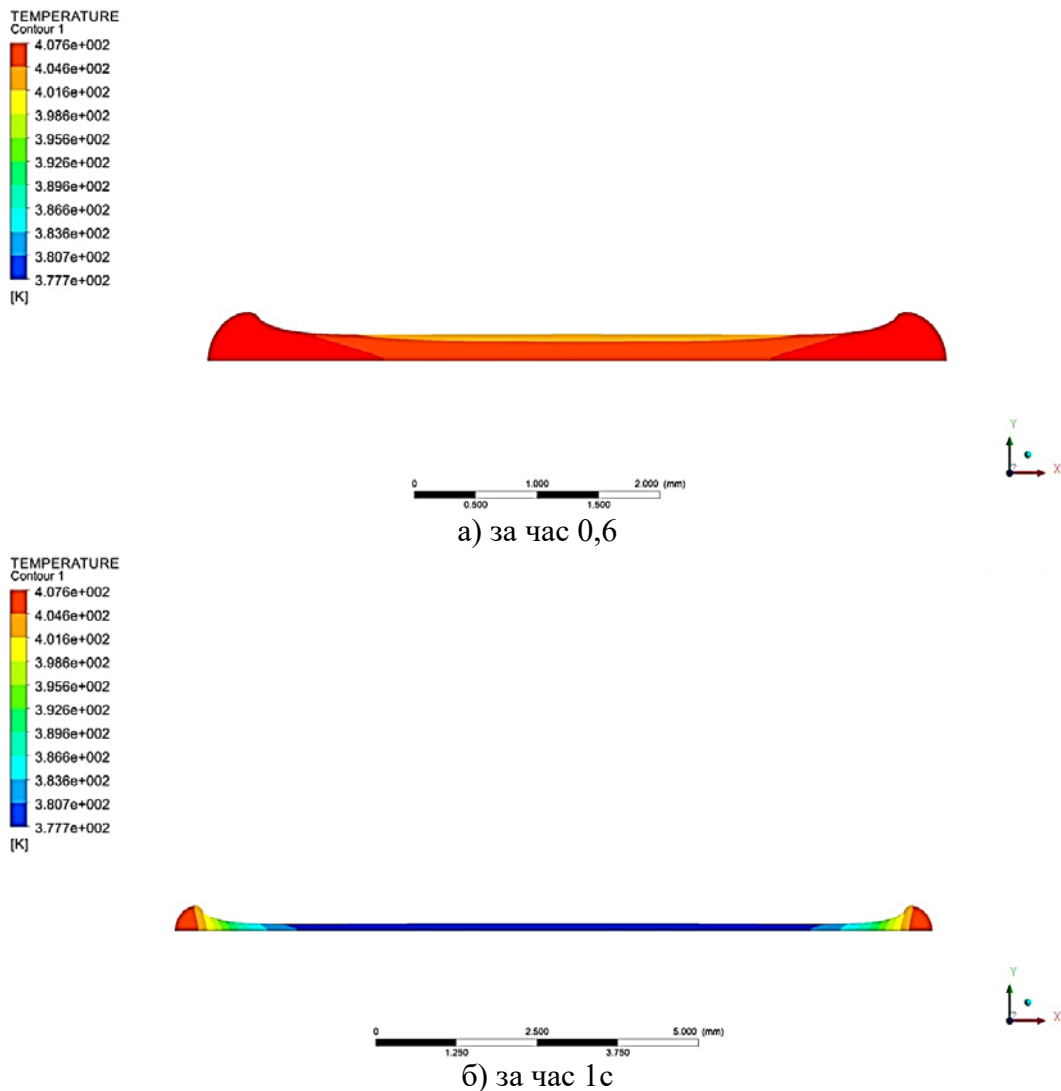


Рис. 4. Розподіл температур та форма шару термоклею при притискному зусиллі валків 13 Н

З рис. 4 видно, що термоклей при притискному зусиллі валків в 13 Н поступово охолоджується і через 1 с на своїй поверхні досягає температур нижчих за температуру текучості та затвердів. Початкова товщина шару термоклею за час 0,6 с з 1 мм зменшилась у 2 рази до 0,44 мм, а за 1 с становила – 0,22 мм (в 4,5 рази менше за початкове значення товщини). Ширина шва після 0,6 с збільшилась у 2 рази, а після 1 с становила – 11,63 мм, що у 3,9 рази більше за початкове значення ширини.

Приклад розподілу температур та форми шару термоклею при притискному зусиллі валків в 21,66 Н наведено на рис. 5.

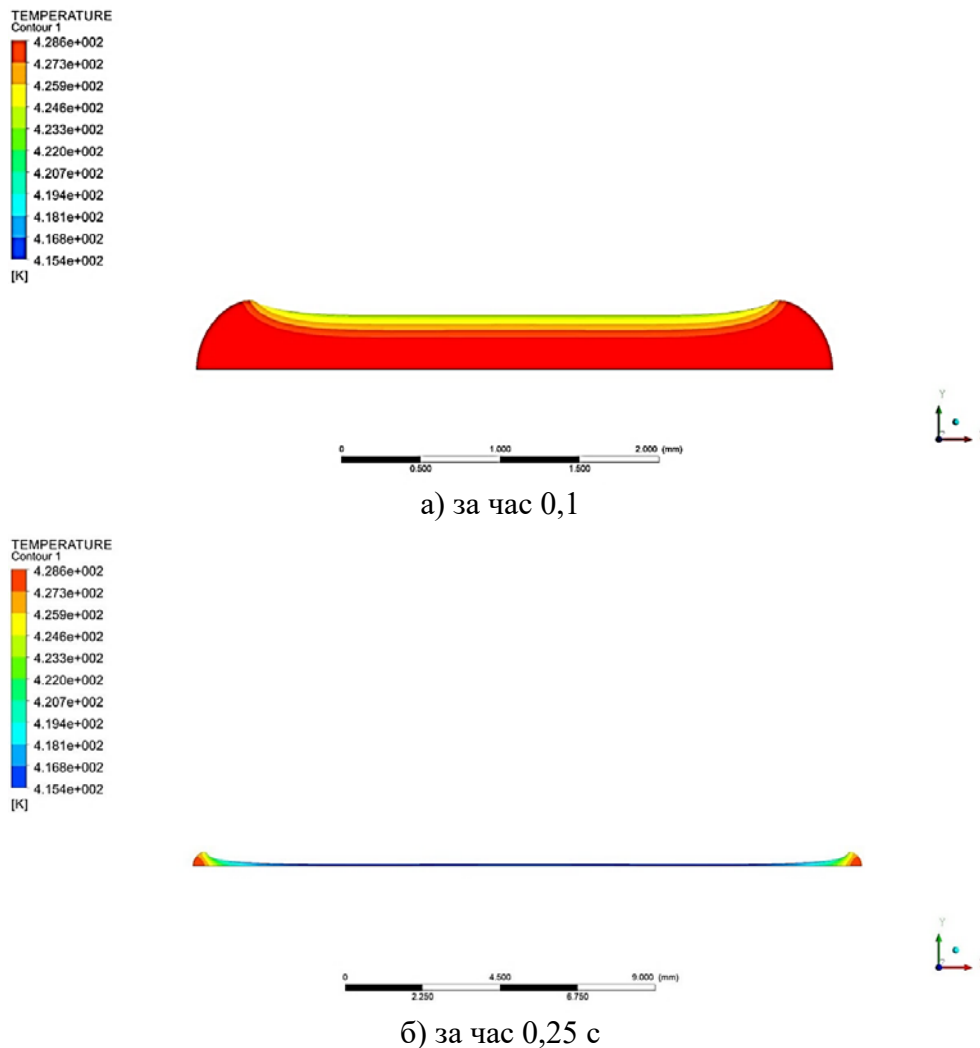


Рис. 5. Розподіл температур та форма шару термоклею при притисковому зусиллі валків 21,66 Н

З рис. 5 видно, що термоклей при притисковому зусиллі валків в 21,66 Н поступово охолоджується і після 0,25 с досягає температур нижчих за температуру текучості та твердне. Початкова товщина шару термоклею за час 0,1 с з 1 мм зменшилась до 0,68 мм, а за 0,25 с становила – 0,14 мм (в 7 разів менше за початкове значення товщини). Ширина шва після 0,25 с становила 18,09 мм, що у 6 разів більше за початкове значення ширини.

Наступною задачею було оцінити вплив витрати термоклею та притискового зусилля валків на ширину термоклейового шва та виконати порівняння числових розрахунків з експериментальними даними.

Отримано залежність ширини шва від витрати термоклею рис. 6. Притискове зусилля валків складало 13 Н.

На графіку рис. 6 спостерігається, що зі збільшенням витрати термоклею ширина шва зростає за логарифмічною залежністю. Розбіжність експериментальних даних з числовими розрахунками складає від 1 до 2 мм, що складає 10–13% і є допустимим.

Отримано залежність ширини шва від притискового зусилля валків (рис. 7). Витрата термоклею складала 0,0011 г/мм.

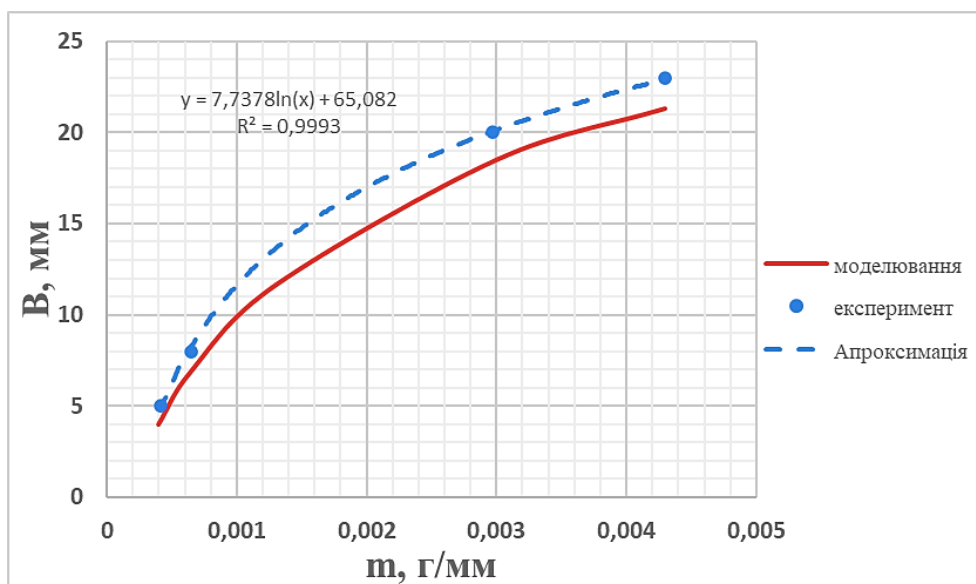


Рис. 6. Залежність ширини шва від витрати термоклею

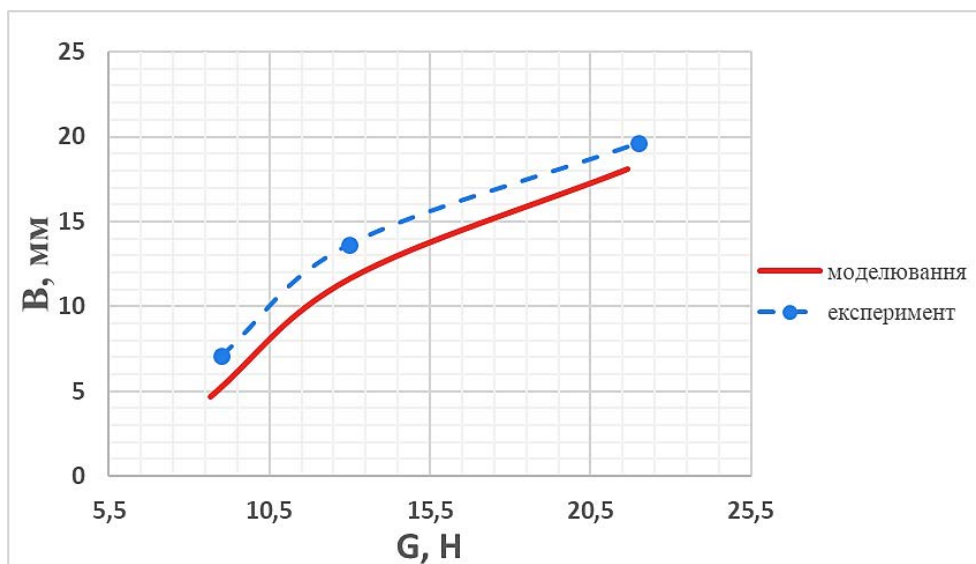


Рис. 7. Залежність ширини шва від притискового зусилля валків

На графіку (рис. 7) спостерігається, що при збільшенні притискового зусилля валків ширина шва зростає за квадратичною залежністю. Збільшення притискового зусилля від 10,5 Н до 20,5 Н дозволяє збільшити ширину шва з 8 мм до 17 мм (майже у два рази). Розбіжність експериментальних даних з числовими розрахунками не перевищує 2 мм, що складає до 12% і є допустимим.

Отже, наведені залежності дозволяють врахувати вплив притискового зусилля та витрати термоклею на ширину шва.

Наведене числове моделювання дозволяє прогнозувати оптимальні значення витрати термоклею та притискового зусилля валків, щоб отримати необхідну ширину шва, яка б забезпечувала як оптимальну для споживача міцність з'єднання, так і достатню для підтримки герметичності пакування.

Висновки. Для дослідження процесу утворення термоклейового з'єднання розроблено комп'ютерну розрахункову модель на базі методу скінченних елементів і проведено числовий

розрахунок розподілу температур та деформації шару термоклею від притискного зусилля валків та витрати термоклею. Такий підхід у дослідженні дозволить обрати оптимальне поєднання значень витрати термоклею та притискного зусилля валків для утворення якісного з'єднання, яке б було достатньо міцне та герметичне.

Для оцінки якості термоклейового з'єднання отримано залежності ширини шва від притискного зусилля валків, а також залежності ширини шва від витрати термоклею. Показано, що при збільшенні значення притискного зусилля від 10,5 Н до 20,5 Н, ширина шва збільшується з 8 мм до 17 мм (майже у два рази).

References

Література

1. Adhesive application methods and equipment. *Adhesiveplatform*. URL: <https://www.adhesiveplatform.com/adhesive-application-methods-and-equipment/>.
 2. Hallbäck, N., Korin, C., Barbier, C., Nygårds, M. (2014). Finite Element Analysis of Hot Melt Adhesive Joints in Carton Board. *Packaging Technology and Science*, 27 (9), 701–712.
 3. Banea, M. D., da Silva, L. F. M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223 (1), 1–18.
 4. Gondlyakh, A., Chemeris, A., Kolosov, A. et al. (2021). Iterative-Analytical Model of Nonlinear Deformation and Fracture of Multilayer Composite Panels. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 33–51.
 5. Lee, Y. S., Kim, H. W., Cho, J. H. (2015). Process parameters and roll separation force in horizontal twin roll casting of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 218, 48–56.
 6. Hadadzadeh, A., Wells, M. A. (2013). Mathematical modeling of thermo-mechanical behavior of strip during twin roll casting of an AZ31 magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(2), 101–114.
 7. Hernández, A., Arcos, J., Méndez, F., Bautista, O. (2013). Effect of pressure-dependent viscosity on the exiting sheet thickness in the calendering of Newtonian fluids. *Applied Mathematical Modelling*, 37 (10–11), 6952–6963.
 8. Javed, M. A., Ali, N., Arshad, S. (2019). Numerical analysis of the calendering process by using Giesekus fluid model. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 36 (2), 167–190.
 9. Javed, M. A., Ali, N., Arshad, S., Shamshad, S. (2021). Numerical approach for the calendering process using
1. Adhesive application methods and equipment. *Adhesiveplatform*. URL: <https://www.adhesiveplatform.com/adhesive-application-methods-and-equipment/>.
 2. Hallbäck N., Korin C., Barbier C., Nygårds M. Finite Element Analysis of Hot Melt Adhesive Joints in Carton Board. *Packaging Technology and Science*. 2014. No. 27 (9). P. 701–712.
 3. Banea M. D., da Silva L. F. M. Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2009. No. 223 (1). P. 1–18.
 4. Gondlyakh A., Chemeris A., Kolosov A. et al. Iterative-Analytical Model of Nonlinear Deformation and Fracture of Multilayer Composite Panels. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 33–51.
 5. Lee Y. S., Kim H. W., Cho J. H. Process parameters and roll separation force in horizontal twin roll casting of aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. No. 218. P. 48–56.
 6. Hadadzadeh A., Wells M. A. Mathematical modeling of thermo-mechanical behavior of strip during twin roll casting of an AZ31 magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2013. No. 1(2). P. 101–114.
 7. Hernández A., Arcos J., Méndez F., Bautista O. Effect of pressure-dependent viscosity on the exiting sheet thickness in the calendering of Newtonian fluids. *Applied Mathematical Modelling*. 2013. No. 37 (10–11). P. 6952–6963.
 8. Javed M. A., Ali N., Arshad S. Numerical analysis of the calendering process by using Giesekus fluid model. *Journal of Plastic Film & Sheeting*. 2019. No. 36 (2). P. 167–190.
 9. Javed M. A., Ali N., Arshad S., Shamshad S. Numerical approach for the calendering process

Carreau-Yasuda fluid model. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, <https://doi.org/10.1177/8756087920988748>.

10. Herasimenko, Y. Y., Sokolskyi, A. L. (2020). Investigation of the flexible packaging elements joining by hot melt adhesive. *Modern engineering and innovative technologies*, Germany, 11 (1), 5–8.

11. Sokolskyi, O. L., Karvatskii, A. Ya., Mikulionok, I. O., Herasimenko, Yu. Yu. (2018). Improvement of the technology of thermal gluing by a melt of polymer additive material. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 5, 154–160.

using Carreau-Yasuda fluid model. *Journal of Plastic Film & Sheeting*. 2021. <https://doi.org/10.1177/8756087920988748>.

10. Herasimenko Y. Y., Sokolskyi A. L. Investigation of the flexible packaging elements joining by hot melt adhesive. *Modern engineering and innovative technologies*, Germany. 2020. No. 11 (1). P. 5–8.

11. Sokolskyi O. L., Karvatskii A. Ya., Mikulionok I. O., Herasimenko Yu. Yu. Improvement of the technology of thermal gluing by a melt of polymer additive material. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2018. No. 5. P. 154–160.

HERASYMENKO YULIIA

Assistant

Department of Chemical, Polymer and Silicate
Engineering of the National Technical University of
Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
<https://orcid.org/0000-0002-7791-6821>
E-mail: yuliiaherasimenko@gmail.com

SOKOLSKYI OLEKSANDR

Dr., as.prof.

Department of Chemical, Polymer and Silicate
Engineering of the National Technical University of
Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Scopus Author ID: 47861385600
Researcher ID: J-9284-2017
<https://orcid.org/0000-0002-7929-3576>
E-mail: sokolkiiev@ukr.net

ГЕРАСИМЕНКО Ю. Ю., СОКОЛЬСКИЙ А. Л.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Україна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОКЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Цель. Разработать числовой метод прогнозирования толщины и ширины термоклеевого шва под действием механического усилия и охлаждения, а также исследовать влияние прижимного усилия и расхода термокля на ширину шва, влияющих на прочность и герметичность термоклеевого соединения.

Методика. Для прогнозирования образования термоклеевого шва под действием механического усилия и охлаждения разработана компьютерная расчетная модель и произведен числовой расчет распределения температур и деформации слоя термокля от прижимного усилия валков и расхода термокля. Результаты числового моделирования подтверждены экспериментально с применением созданной опытной установки для термоклеевого соединения.

Результаты. Предложена математическая модель процесса охлаждения расплава полимера и его деформации с учетом закона вязкости Кросса от скорости деформации и зависимости вязкости от температуры. Расчетным и экспериментальным путем установлены начальные и предельные условия, определяющие этот процесс. Получены зависимости ширины шва от прижимного усилия валков, а также зависимости ширины шва от расхода термокля. Установлено, что при увеличении расхода термокля ширина шва растет по логарифмической зависимости. При увеличении прижимного усилия валков ширина шва растет по квадратичной зависимости.

Научная новизна. Определено влияние прижимного усилия валков и расхода термокля на ширину шва. Установлено, что при увеличении значения прижимного усилия от 10,5 Н до 20,5 Н ширина шва увеличивается с 8 мм до 17 мм (почти в два раза).

Практическая значимость. Числовое моделирование процесса образования термоклеевого соединения позволяет прогнозировать оптимальные значения расхода термокля и прижимного

усилия валков, чтобы получить необходимую ширину шва, обеспечивающую оптимальную для потребителя прочность соединения, так и достаточную для поддержания герметичности упаковки.

Ключевые слова: термоклей; клеевое соединение; математическая модель; числовое моделирование.

HERASYMENKO Yu., SOKOLSKYI O.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

STUDY OF THE THERMAL GLUE JOINT FORMATION PROCESS

Purpose. Develop a numerical method for predicting the thickness and width of a hot-melt joint under the action of mechanical force and cooling, as well as investigate the effect of pressing force and hot-melt adhesive consumption on the joint width, which affect the strength and tightness of the hot-melt joint.

Methodology. To predict the formation of a hot-melt adhesive seam under the action of mechanical force and cooling, a computer calculation model was developed and a numerical calculation was made of the distribution of temperatures and deformation of the hot-melt adhesive layer from the pressing force of the rolls and the consumption of hot-melt adhesive. The results of numerical simulation are confirmed experimentally using the created pilot plant for hot-melt bonding.

Findings. A mathematical model of the process of polymer melt cooling and its deformation is proposed taking into account the Cross viscosity law on the strain rate and the dependence of viscosity on temperature. The initial and limiting conditions that determine this process are established by calculation and experiment. The dependences of the seam width on the pressing force of the rolls, as well as the dependence of the seam width on the consumption of hot-melt adhesive, are obtained. It has been established that with an increase in the consumption of hot-melt adhesive, the width of the seam increases according to a logarithmic dependence. With an increase in the pressing force of the rolls, the width of the seam increases according to a quadratic dependence.

Originality. The influence of the clamping force of the rolls and the consumption of hot-melt adhesive on the width of the seam is determined. It has been established that with an increase in the clamping force from 10.5 N to 20.5 N, the width of the seam increases from 8 mm to 17 mm (almost twice).

Practical value. Numerical modeling of the formation process of a hot-melt adhesive allows predicting the optimal values of the hot-melt adhesive consumption and the clamping force of the rolls to obtain the required seam width, which provides the optimum joint strength for the consumer, and is sufficient to maintain the tightness of the package.

Keywords: hot-melt adhesive; adhesive bond; mathematical model; numerical simulation.