

УДК 621.79.03

ANALYSIS OF THE PROCESS OF THERMAL CONTACT WELDING OF PLASTIC FILMS CONTAMINATED WITH FINE BULK MATERIALS

O. Havva*National University of Food Technologies***Yu. Sholovii, N. Maherus***Lviv Polytechnic National University***Key words:**

thermal contact welding,
plastic film,
fine bulk material,
polymer packaging

Article history:

Received 02.04.2021

Received in revised form
20.04.2021

Accepted 10.05.2021

Corresponding author:

gavvaoleksandr@
gmail.com

ABSTRACT

Fine bulk materials (FBM) with particle sizes less than 50 micrometers can be contaminated with dust during recycling process. This dust settles on the walls of the future packaging in the process of packing, which complicates the process of sealing by thermal contact welding. It is established that a layer of FBM with a thickness of 0.003 to 0.01 mm is deposited on the contact surfaces of welding during the process of package forming. This fact reduces the strength of the weld by 15—20% and increases the welding time.

The aim was analysis of the thermal contact welding of plastic films contaminated with FBM. The object of research is thermal contact welding of plastic films with one-sided heating, which is widely used in industry. Heat transfer during non-stationary thermal conductivity was investigated as a function of temperature field and heat flux in time and space. The determination of temperature fields was based on the schematization of thermal processes. The process of heat transfer in an unlimited heat-conducting body was described by according to Fourier's law. It was considered in the study of one-way heating that the material thickness is much smaller than the width and length of the seam and it was assumed that the heat flow from the heater is directed in one direction.

The result was the equation of thermal conductivity relative to the temperature of the heater for one-dimensional flow under these boundary conditions. It was implemented thermal processes in the cross section of the weld in the SolidWorks software environment, the COSMOSWorks application. Plastic films with a thickness of 20 μm to 50 μm and different degree of pollution were researched. Graphical dependences of the change in the welding temperature on the film thickness and the dynamics of the temperature rise in the weld of a single-layer plastic film without a substrate for one-way heating are obtained.

The results allow us to conclude that the contamination of the films with a layer of fine product causes a temperature difference from 1.67°C to 6.78°C. It depends on the film thickness and the layer of FBM. Increase in the thickness of the plastic material leads to the decrease in influence of the FBM layer between the contact surfaces on the strength of the weld.

DOI: 10.24263/2225-2916-2021-29-13

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ТЕРМОКОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ПЛІВОК, ЗАБРУДНЕНИХ ДРІБНОДИСПЕРСНИМИ СИПКИМИ МАТЕРІАЛАМИ

О. М. Гавва, д-р техн. наук

Національний університет харчових технологій

Ю. П. Шоловій, канд. техн. наук

Н. І. Магерус, канд. техн. наук

Національний університет «Львівська політехніка»

У статті наведені результати досліджень термоконтактного зварювання поліетиленових плівок, забруднених дрібнодисперсними сипкими матеріалами. Проведено моделювання процесу поширення теплоти в матеріалі при зварюванні полімерних плівок з одностороннім нагрівом, досліджено розподіл температури по товщині зварювального матеріалу та динаміку наростання температури у зварному шві для плівок різної товщини та різного ступеня забруднення.

Ключові слова: термоконтактне зварювання, поліетиленова плівка, дрібнодисперсний сипкий матеріал, полімерна упаковка.

Постановка проблеми. Серед загального валу пакувальної продукції значний відсоток займають дрібнодисперсні сипкі матеріали (ДСМ) з розмірами частинок менше 50 мікрометрів. До таких продуктів належать борошно, крохмаль, мелені перець і кава, цукор-пудра, харчові добавки тощо. Такий вид продукції потребує особливої уваги, оскільки навіть незначні коливання показників вологості, температури тощо здатні суттєво змінювати його властивості, що ускладнює процес переробки та пакування. Одним із ефективних способів пакування ДСМ у харчовій промисловості є пакування в тришовні пакети з різноманітних полімерних матеріалів, починаючи від одношарових поліетиленових плівок різної щільності до багатшарових високотехнологічних матеріалів з високими бар'єрними властивостями. У процесі пакування ДСМ на обладнанні вертикального компонування виготовлення м'якої споживчої упаковки, зазвичай, суміщене з процесом заповнення її продукцією (рис. 1) [1], тому на стінках рукава (у місцях формування поперечних зварних швів) осідає пил, утворений у результаті переміщення порції продукту з дозатора в майбутню упаковку.

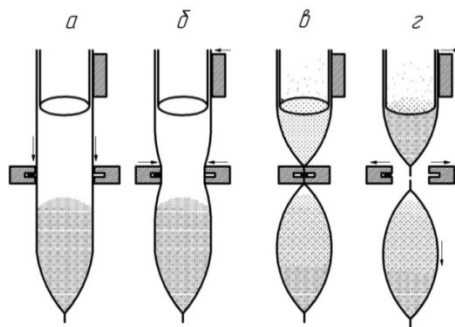


Рис. 1. Схема суміщених процесів виготовлення м'якої упаковки і наповнення її продукцією

Герметизація тришовних полімерних пакетів при пакуванні ДСМ полягає у сти-сканні рукава на цій ділянці, здійсненні енергетичного впливу на матеріал упаковки для отримання температури, необхідної для формування міцного поперечного зварного шва [2]. Тому забезпечення якісного зварювання полімерних плівок гарантуватиме надійну герметизацію пакетів при пакуванні дрібнодисперсної сипкої продукції з різними властивостями.

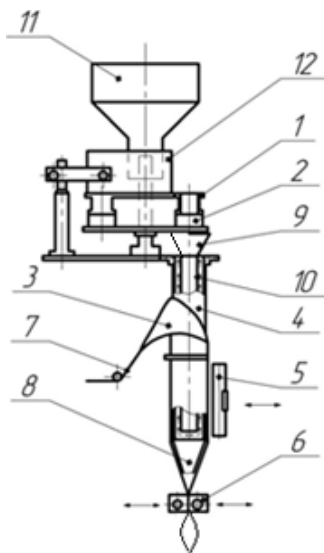


Рис. 2. Схема формування пакета і заповнення його ДСМ

При пакуванні ДСМ у тришовний полімерний пакет на лінійному автоматі вертикального компонування (рис. 2) пакувальний матеріал 7, переміщуючись по поверхні «комірця» 3, утворює навколо тубуса 4 нескінченний рукав, формування якого завершується зварюванням вертикального шва пристроєм 5, а зварювальний пристрій 6 формує горизонтальний шов. Обертання мірників 2 об'ємного дозатора 1 забезпечує формування дози ДСМ та її переміщення за допомогою напрямних 10 тубуса 4 у майбутню упаковку. Далі пристрої 5 та 6 відводяться, рукав з полімерної плівки протягується на довжину пакета і цикл повторюється.

Як правило, під час утворення вертикального зварного шва проблем не виникає, оскільки все залежить від правильної організації подачі плівкового матеріалу з рулону та формування рукава [3], а ось на якість горизонтального шва, окрім таких чинників, як температура зварювання, зусилля та час притискання, великий вплив має чистота внутрішніх поверхонь пакета.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Встановлено, що в процесі формування упаковки для ДСМ на контактних поверхнях зварювання осідає продукт дозування, товщиною шару якого від 0,003 до 0,01 мм. Відомо, що при зварюванні упаковки із шаром сипких речовин між контактуючими поверхнями (технічний вуглець, борошно, крохмаль, зубний порошок, будівельні суміші тощо) міцність зварного шва знижується на 15—20%, а час зварювання збільшується [4]. Інколи сильна забрудненість взагалі не дає змоги здійснити зварювання пакета, через що він потрапляє в брак.

Для з'єднання полімерних плівок нині використовують різні методи зварювання: контактний-тепловий, газовими теплоносіями, струмами високої частоти, інфрачервоними променями та ультразвуком. Міцність зварних швів для різних полімерних плівок при температурі 100—150°C знаходиться в межах 8—15 Н / 15 мм [5]. Однак осідання пилу в зоні формування зварних швів знижує їх міцність на 20—50% залежно від ступеня забруднення.

У результаті дослідження процесу термоконтактного зварювання плівкових матеріалів протягом короткого часу (до 1 с) [6] проаналізовано три режими зварювання, що відповідають різним значенням адгезії матеріалів на межі розділу та запропоновано пристрій з контролем температури і тиску, що дає змогу зварювати різні зразки термопластичних матеріалів. При дослідженні впливу адгезії між полімерами на якість зварного шва при термоконтактному зварюванні [7] запропоновано спосіб покращення міцності зварного шва шляхом нанесення поверхневих покриттів на нагрівальний елемент. Встановлено, що міцність зварного шва на зсув при цьому покращується на 32%. У статті [8] представлені результати дослідження лазерного зварювання тонких полімерних плівок до більш важкої основи. Однак дослідження щодо зварювання забруднених плівок відсутні.

Метою статті є дослідження термоконтактного зварювання поліетиленових плівок, забруднених ДСМ шляхом моделювання процесу поширення теплоти в матеріалі при зварюванні полімерних плівок з одностороннім нагрівом.

Матеріали і методи. З метою встановлення впливу товщини напиленого шару ДСМ на якість зварного шва упаковки було досліджено контактне теплове зварювання з одностороннім нагрівом поліетиленових плівок, що широко використовується у промисловості. При застосуванні такого методу теплота передається до зварних поверхонь за рахунок теплопровідності матеріалів і нагрівного інструмента.

Результати дослідження. Передачу теплоти при нестационарному режимі теплопровідності можна досліджувати як функцію температурного поля і теплового потоку в часі та в просторі [9]:

$$T=f(x, y, z, t) \text{ та } Q=\varphi(x, y, z, t), \quad (1)$$

де (x, y, z) — координати точки, що розглядається; t — час.

Розрахункове визначення температурних полів ґрунтується на схематизації теплових процесів. Відомо, що теплове поле в тілі можна формувати з миттєвих точкових джерел. Процес поширення теплоти в необмеженому теплопровідному тілі реалізовується за законом теплопровідності Фур'є [9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

де T — температура, °C; a — коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Температуропровідність характеризує швидкість поширення температури під дією теплового потоку в нестационарних температурних умовах. Коефіцієнт температуропровідності a визначається за формулою: $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$, де λ — коефіцієнт

теплопровідності, C_p — питома теплоємність, ρ — густина. Під теплопровідністю розуміють властивість полімеру переносити тепло від більш нагрітих частин до менш нагрітих. У результаті цього відбувається вирівнювання температур в об'ємі полімера.

Для подальшого дослідження процесу поширення теплоти в матеріалі рівняння (2) необхідно доповнити:

- а) геометричними умовами, що визначають форму і розмір нагрітого тіла;
- б) властивостями матеріалу нагрітого тіла: коефіцієнтом теплопровідності λ , питомою теплоємністю c , густиною ρ , їх залежностями від температури, якщо така є, а також змінною у просторі і в часі потужністю внутрішніх джерел теплоти q_v ;
- в) початковими умовами, що встановлюють розподіл температури всередині тіла $T(x, y, z)$ в початковий момент часу $T = 0$. Для спрощення розрахунків, зазвичай, приймають, що при $t = 0$ температура в усіх точках тіла однакова: $T = T_0$;
- г) граничними умовами, що характеризують процес теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем.

При дослідженні одностороннього нагріву враховують, що товщина матеріалу значно менша за ширину та довжину шва. Також приймається, що тепловий потік від нагрівача спрямованим в одну сторону вздовж осі y (рис. 3).

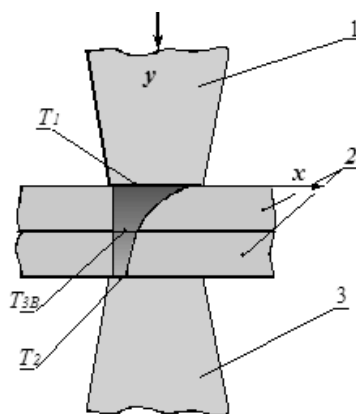


Рис. 3. Схема термоконтального зварювання з одностороннім нагрівом: 1 — нагрівач; 2 — плівка, що зварюється; 3 — холодний інструмент; T_1 — температура нагрівача; T_2 — температура холодного інструмента; $T_{зв}$ — температура поверхні, що зварюється

Для спрощення розрахунків приймається, що всі площини, паралельні площині XU , будуть ізотермічними поверхнями. Початкова температура контактуючих поверхонь є функцією координати y . При дослідженні теплових полів завдання полягає у визначенні температури ізотермічних поверхонь у певний момент часу.

Розв'язок рівняння (2) повинен відповідати основному рівнянню теплопровідності Фур'є для одномірного теплового потоку при граничних умовах:

$$T(y, 0) = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad t > 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (3)$$

де y — товщина плівки від верхньої поверхні, що перебуває в контакт з нагрівачем, м.

При заданому початковому розподілі температури в матеріалі та відомих умовах теплообміну на його межах, а також за умови, що теплофізичні властивості матеріалу в процесі зварювання лишаються постійними, можна дослідити процес поширення тепла в матеріалі.

Розв'язуючи рівняння (3) методом точкових джерел, одержуємо:

$$\frac{T_H - T}{T_H - T_0} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-y}^0 e^{-\beta^2} d\beta, \quad (4)$$

де T_H — температура нагрівача в $^{\circ}\text{C}$; T_0 — початкова температура матеріалу в $^{\circ}\text{C}$; T — температура матеріалу в точці з координатою y в $^{\circ}\text{C}$.

Права частина виразу (4) є інтегралом імовірності, числове значення якого може бути знайдене за таблицями теплофізичних довідників або визначене за допомогою системи MathCad, зокрема функції ERF.

Рівняння теплопровідності відносно температури нагрівача T_H для одновимірного потоку при даних граничних умовах можна записати у вигляді:

$$T(y,t) = T_H - (T_H - T_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a \cdot t}}\right), \quad (5)$$

де $T(y,t)$ — температура на відстані y від поверхні плівки, $^{\circ}\text{C}$,

T_0 — температура навколишнього середовища.

Враховуючи, що можуть зварюватися плівки різної товщини, доцільніше нагрів проводити через тоншу плівку h , тоді використовуючи рівняння (5) можна визначити температуру матеріалу у зоні зварного з'єднання:

$$T_{ЗВ} = T_H - (T_H - T_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{h}{2\sqrt{a \cdot t}}\right). \quad (6)$$

Однак таку математичну модель (6) доцільно використовувати при зварюванні полімерних пакетів, у яких контактуючі поверхні не забруднені частинками ДСМ. Оскільки забруднення поверхонь зварювання негативно впливає на передачу тепла від нагрівального елемента до зони зварного шва, то в програмному середовищі SolidWorks з допомогою додатку COSMOSWorks було проведено моделювання теплових процесів у поперечному перерізі шва з урахуванням різного ступеня забруднення зварних поверхонь.

Для дослідження впливу шару ДСМ між контактуючими поверхнями на процес формування упаковки було проведено моделювання процесу зварювання поліетиленових плівок товщиною від 20 мкм до 50 мкм. Як продукт пакування було вибрано борошно. При дослідженні температурних полів у матеріалі прийнято температуру нагрівача 300°C , температуру навколишнього середовища 25°C , а коефіцієнт теплопровідності представлено як функцію температури.

У результаті моделювання отримано графічні залежності зміни температури зварювання по товщині плівки (рис. 4), які засвідчують, що в плівці, яка знаходиться в контакт з нагрівачем, температура рівномірно спадає. Однак у зоні контакту двох плівок, забруднених шаром ДСМ, який потрапив на стінки рукава під час процесу завантаження пакета, має місце різке зниження температури. При моделюванні цього процесу прийнято товщини шару ДСМ на поверхні зварних матеріалів, у межах від 0,003 мм до 0,01 мм. Величина цього перепаду температур залежить від товщини шару ДСМ на стінках зварних поверхонь і становить від $2,56^{\circ}\text{C}$ — при

товщині шару 0,003 мм до 6,78°C — при товщині шару 0,01 мм. Температура в зоні зварювання при дослідженні плівок такої товщини знаходиться приблизно в межах 121—117°C залежно від ступеня забруднення плівок ДСМ.

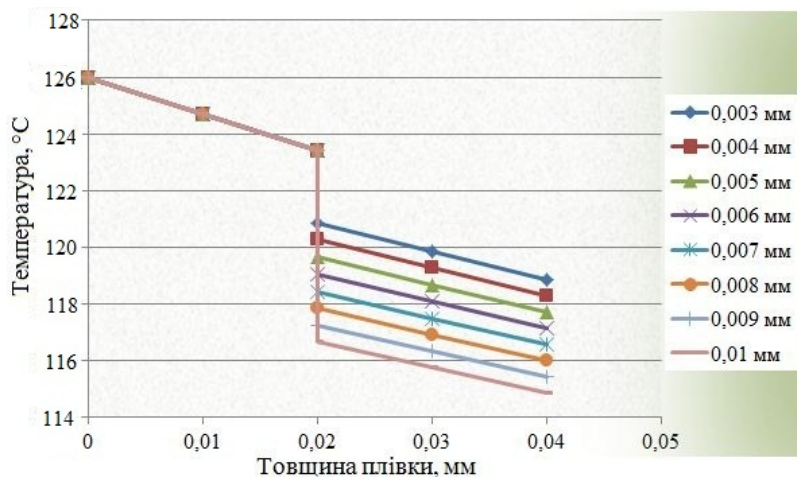


Рис. 4. Розподіл температури по товщині матеріалу плівки товщиною 0,02 мм при різних значеннях забруднення зварних поверхонь

Аналогічні дослідження були проведені для плівок товщиною 0,03 мм, 0,04 мм та 0,05 мм. Графічні залежності (рис. 5) відображають розподіл температури в поперечному перерізі шва для максимальної в нашому дослідженні товщини плівки 50 мкм.

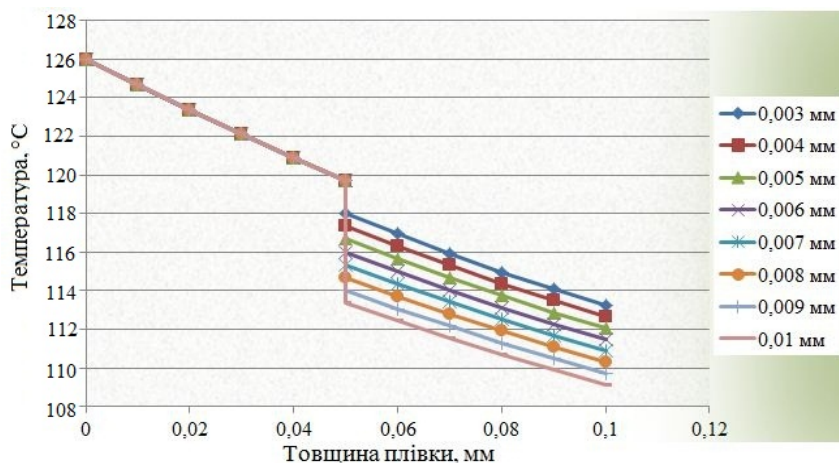


Рис. 5. Розподіл температури по товщині матеріалу для плівки товщиною 0,05 мм при різних значеннях забруднення зварних поверхонь

Встановлено, що температура в зоні зварювання коливається в межах 118—113°C залежно від товщини шару ДСМ між плівками. А різкий спад температури у цьому місці становить 1,67°C — при товщині шару ДСМ 0,003 мм та 6,33°C — при товщині шару ДСМ 0,01 мм.

Також було проведено моделювання перехідних процесів (нестационарних), що виникають у момент підведення нагрівача до плівок. Нестационарний тепловий розрахунок моделює розподіл теплової енергії залежно від часу. Оскільки повний цикл термозварювання на пакувальних автоматах триває менше однієї секунди, то й перехідний процес розглянуто в межах цього ж інтервалу часу. На рис. 6 представлена динаміка наростання температури в зварному шві при односторонньому нагріві одношарової поліетиленової плівки без підкладки. Для визначення динаміки нагріву необхідно виходити з температури нагрівного інструмента, для прикладу взята $T_H = 300^\circ\text{C}$. На графіку виділена робоча зона зварювання для поліетилену ($T_{ЗВ} = 120 \div 125^\circ\text{C}$), яка надає можливість чітко встановити технологічний час зварювання для плівок заданої товщини.

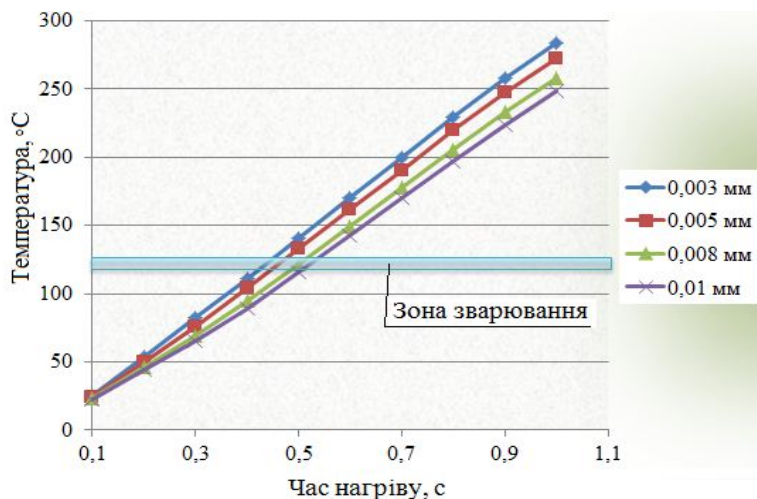


Рис. 6. Динаміка наростання температури у зварному шві при односторонньому нагріві ($T_H = 300^\circ\text{C}$) поліетиленової плівки товщиною 20 мкм при різних ступенях забруднення

Аналіз залежностей показує, що швидкість зростання температури залежить від ступеня забруднення контактуючих поверхонь сипкими продуктами: при мінімальному шарі ДСМ (0,003 мм) між контактуючими поверхнями температура в зоні зварювання досягає потрібного значення за 0,45 с, що значно швидше, ніж у випадках більшої товщини забрудненого шару, зокрема, при зростанні шару ДСМ до 0,01 мм необхідний час для зварювання плівки зростає до 0,53 с. Враховуючи те, що повний цикл термозварювання становить менше секунди, то таке зростання температури при збільшенні шару продукту між поверхнями зварювання може впливати на продуктивність пакувального автомата.

Аналогічні результати моделювання процесу нагрівання та формування зварного шва було отримано для поліетиленової плівки товщиною 50 мкм (рис. 7): для нагрівання полімерної плівки товщиною 50 мкм до температури зварювання необхідно затратити від 0,5 с до 0,68 с залежно від шару ДСМ, що осів на поверхні рукава в зоні зварювання.

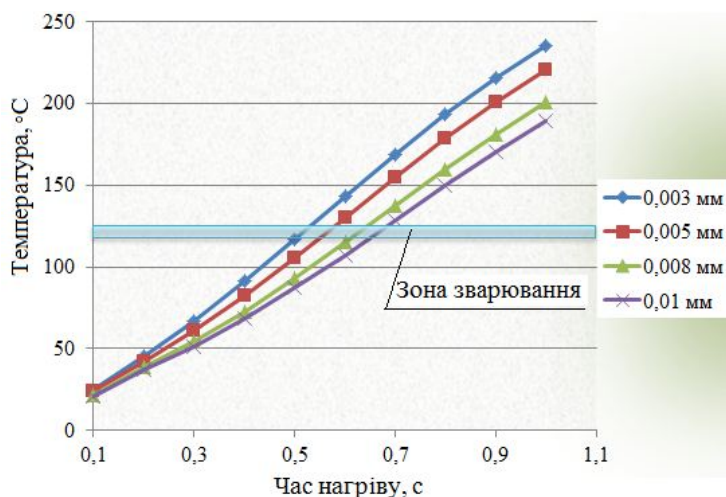


Рис. 7. Динаміка наростання температури у зварному шві при односторонньому нагріві ($T_n = 300^\circ\text{C}$) поліетиленової плівки товщиною 50 мкм при різних ступенях забруднення

Висновки. Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що рівномірний розподіл температур відбувається лише по товщині зварювальних плівок. Однак у зоні контакту цих плівок відбувається різкий температурний спад, спричинений забрудненням плівок шаром дрібнодисперсного продукту: температурний перепад змінюється від $1,67^\circ\text{C}$ до $6,78^\circ\text{C}$ залежно від товщини плівки та шару ДСМ. Встановлено, що при збільшенні товщини полімерного матеріалу, що зварюється, зменшується вплив шару ДСМ між контактуючими поверхнями на міцність зварного шва.

Оскільки забруднення зварювальних поверхонь полімерних плівок шаром ДСМ призводить до зниження температури зварювання між контактуючими поверхнями, то міцність зварного шва також буде знижуватись. На основі проведених досліджень встановлено, що міцність зварного з'єднання при товщині ДСМ між поверхнями зварювання 10 мкм знизиться на 4% при незмінних тривалості дії нагрівного елемента й тиску на плівку упаковки.

ЛІТЕРАТУРА

- Ефремов Н. Ф. Тара и ее производство: Уч. пособие / Н. Ф. Ефремов — М.: Изд-во МГУП, 2001. — 312 с.
- Барсуков Р. В., Сливине О. Н., Хмельов В. Н., Циганок С. Н., Пустунів А. В., Савін І. І., Левін С. В. Зварювання термопластичних полімерних матеріалів / Бійський технологічний інститут Алтайського держ. техн. ун-ту. — Бійськ. Росія. — 2004. — 184 с.
- Пригодій Д. В. Удосконалення теорії динаміки і обладнання систем транспортування плівкових матеріалів в технологіях пакування продукції / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. — Київ, 2018. — 167 с.
- Волков С. С., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1986. — 256 с.
- Шредер В. Л., Гавва А. Н., Кривошей В. Н. Упаковывание пищевых продуктов в гибкие материалы. — Упаковка № 3. — 2011. — С. 23—26.
- Julien Avenet, Arthur Levy, Jean-Luc Bailleul, Steven Le Corre, Jérôme Delmas Adhesion of high performance thermoplastic composites: Development of a bench and procedure for kinetics identification. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X20302931>.

7. Vincent Rohart, Louis Laberge Lebel, Martine Dubé Improved adhesion between stainless steel heating element and PPS polymer in resistance welding of thermoplastic composites.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836819330033>.

8. N. Brown, D. Kerr, M. R. Jackson, R. M. Parkin Laser welding of thin polymer films to container substrates for aseptic packaging.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399200000335>.

9. Валецький Б. П. Підвищення ефективності роботи машин для велико-габаритного пакування з плівкозварювальними механізмами / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук — Луцьк, 2010. — 148 с.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕРМОКОНТАКТНОЙ СВАРКИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК, ЗАГРЯЗНЕННЫХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ СЫПУЧИМИ МАТЕРИАЛАМИ

А. Н. Гавва

Национальный университет пищевых технологий

Ю. П. Шоловий, Н. И. Магерус

Национальный университет «Львовская политехника»

В статье приведены результаты исследований термоконтантной сварки полиэтиленовых пленок, загрязненных мелкодисперсными сыпучими материалами. Проведено моделирование процесса распространения теплоты в материале при сварке полимерных пленок с односторонним нагревом, исследовано распределение температуры по толщине сварочного материала и динамику нарастания температуры в сварном шве для пленок различной толщины и разной степени загрязнения.

Ключевые слова: *термоконтантная сварка, полиэтиленовая пленка, мелкодисперсный сыпучий материал, полимерная упаковка.*