

УДК 678.057

Сокольський О.Л.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Герасименко Ю.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Кушнір М.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПРУТКА В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ ПРИСАДКОВИМ МАТЕРІАЛОМ

Складено математичну модель процесу плавлення полімерного прутка в пристроях для зварювання розплавом. Запропоновано вдосконалену конструкцію пристрою для зварювання розплавом. Виконано числове моделювання процесу плавлення для традиційної й удосконаленої конструкцій. Встановлено розподіл тиску на вході в канал і температури на виході з нього для різних швидкостей подачі прутка. Підтверджено енергетичну ефективність запропонованої конструкції порівняно з наявними.

Ключові слова: плавлення, полімер, зварювання, присадковий матеріал, моделювання.

Постановка проблеми. Зварювання пластмас – технологічний процес отримання нероз’ємного з’єднання елементів конструкції упаковки за допомогою хімічної або дифузійно-реологічної взаємодії макромолекул полімерів.

Останнім часом набуває поширення зварювання розплавом (присадковим полімерним матеріалом) завдяки простоті, високій продуктивності, широким технологічним можливостям та високій якості зварних з’єднань. Метод зварювання присадковим полімерним матеріалом заснований на використанні теплоти розплавленого присадкового матеріалу, що подається між поверхнями, що з’єднуються. Проте для досягнення високої якості з’єднання необхідно забезпечити якісну підготовку розплавленого присадкового матеріалу за мінімальних затрат енергії та часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зварювання присадковим полімерним матеріалом може проводитися за безперервною та періодичною схемами [1]. За безперервною схемою зварювання присадковий полімерний матеріал виходить із нагрівального циліндра безперервно, а в разі виконання процесу за періодичною схемою періодично надходить у зазор між деталями, які

встановлені в форму або затиснуті в спеціальному пристосуванні. Зварювання розплавом доцільно здійснювати за високих швидкостей подачі розплаву до зони з’єднання і максимальної його маси, оскільки присадковий полімерний матеріал втрачатиме менше теплоти і нагрівати його можна до більш низьких температур.

Щоб забезпечити процес зварювання, розплавлений матеріал, що подається в зону з’єднання, повинен мати температуру на 40–80°C вищу за температуру текучості полімеру [2].

Зварювання розплавом можна виконувати у два способи: екструзійним зварюванням і зварюванням розплавленим прутком.

Екструзійне зварювання. У такий спосіб зварюють стикові або нахлесточні з’єднання деталей великої довжини з використанням екструдованого присадкового матеріалу. За найбільш типовою схемою, присадковий матеріал безперервно надходить з екструдера в зону з’єднання, де віддає своє тепло поверхням, що підлягають з’єднанню, і разом із з’єднаними деталями проходить між обтискними роликками (рис. 1) [3].

Присадковий матеріал зазвичай має круглий переріз. Розміри перерізу прутка є одним із

чинників, що визначають розподіл температур у присадковому матеріалі. Попередній підігрів поверхонь елементів, що зварюються, дозволяє на 20–30°C знизити температуру присадкового матеріалу порівняно зі зварюванням без попереднього підігріву поверхонь, що з'єднуються. Температура присадкового матеріалу, за якої забезпечується максимальна міцність з'єднань, залежить від величини тиску зварювання (з пониженням тиску температура присадкового матеріалу повинна підвищуватися, однак для кожного полімеру характерний свій інтервал температур присадкового матеріалу, за межами якого забезпечити максимальну міцність з'єднань неможливо).

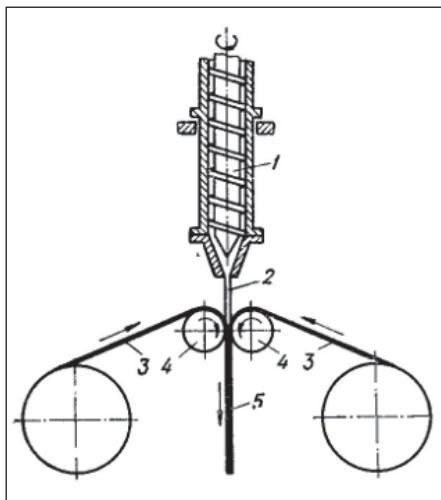


Рис. 1. Екструзійне зварювання: 1 – екструдер, 2 – розплавлений присадковий матеріал; 3 – рулони пакувального матеріалу; 4 – притиски роликів; 5 – зварений матеріал

Зварювання розплавленим прутком. За технологічними параметрами зварювання розплавленим прутком ідентичне екструзійному зварюванню і виконується із застосуванням нагрівальних пристроїв прямоочного типу, а присадковий матеріал у вигляді прутка змотується з бухти і за допомогою роликів безперервно подається в нагрівальний циліндр, звідки розплавлений матеріал видавлюється на кромки деталей, що з'єднуються (рис. 2).

Для покращення процесу зварювання розплавом присадкового полімерного матеріалу запропоновано вдосконалена конструкцію пристрою для зварювання розплавом із трубчастим прутком і соплом із внутрішнім дорном [4].

Удосконалена конструкція дозволяє пришвидшити процес нагрівання та зробити більш рівномірним розподіл температур завдяки двосторонньому нагріванню прутка, а також дає можливість регулювати подачу розплаву.

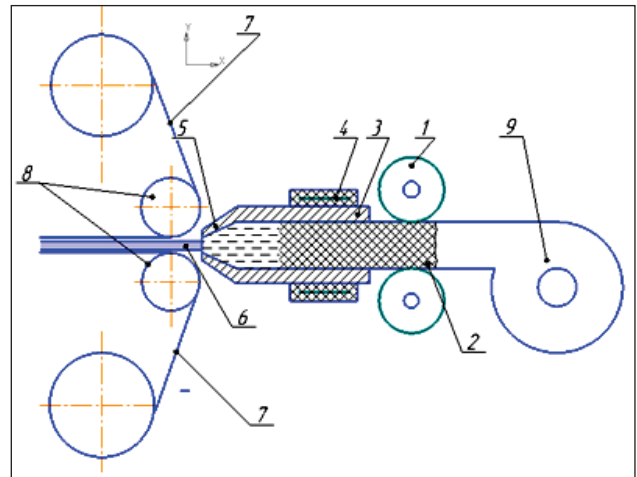


Рис. 2. Схема зварювання розплавленим прутком: 1 – подавальний механізм; 2 – полімерний пруток; 3 – канал для плавлення полімерного прутка; 4 – нагрівальний блок; 5 – сопло; 6 – розплав полімеру; 7 – рулони пакувального матеріалу; 8 – притиски роликів; 9 – бухта

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу геометричних параметрів і технологічних режимів на енергетичні затрати й розподіл температур у полімерному присадковому матеріалі, а також обґрунтування їхніх раціональних значень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Загальна математична модель процесу. Проблема потоку рідини визначається законами збереження маси, імпульсу й енергії. Ці закони виражаються в термінах диференціальних рівнянь із частковими похідними, які дискретизуються з використанням методу на основі кінцевих елементів. Оскільки форма розрахункової області є циліндричною, рівняння доцільно розглядати в циліндричних координатах [5, с. 88–96].

Із закону збереження масового закону впливає рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \cdot v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho v_\Theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0,$$

де v_r , v_Θ і v_z – компоненти вектора швидкості в напрямках r , Θ і z відповідно; ρ – густина; r , Θ і z – координати в циліндричній системі; t – час.

Для нестисливої рідини $\rho = \text{const}$, тому рівняння нерозривності запишеться у вигляді:

$$-\rho \operatorname{div}(v) = 0.$$

Рівняння руху в циліндричних координатах:

Проекція на напрям r :

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\Theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \Theta} - \frac{v_\Theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \sigma_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\Theta}}{\partial \Theta} - \frac{\sigma_{\Theta\Theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

Проекція на напрям Θ :

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

Проекція на напрям z:

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

У лівій частині рівнянь перший складник являє собою сили інерції, що зв'язані зі зміною швидкості в даній точці (локальні), а інші складники – сили інерції, зв'язані зі зміною швидкості в просторі (конвективні). У правій частині рівнянь записана сума сил тиску і в'язкості. Рівняння руху може бути спрощене шляхом виключення членів, що враховують інерційні, конвективні і масові сили внаслідок малості останніх порівняно із силами тертя під час течії полімерів, що відрізняються високою в'язкістю.

Дане рівняння для випадку стисливої рідини, нехтуючи роботою сил в'язкості та тиску, в'язкою дисипацією і кінетичною енергією:

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = -(\nabla q) - (\tau : \nabla v) - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \times (\nabla \cdot v),$$

де q – тепловий потік, що визначається за законом Фур'є: $q = -\lambda \nabla T$; C_p – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; T – абсолютна діюча температура.

Для замикання системи рівнянь необхідне ще й рівняння стану.

Для рідин рівнянням стану є залежність напруження зсуву від швидкості деформації (швидкості зсуву):

$$\tau_{rz} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right), \quad \tau_{r\theta} = \eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right],$$

$$\tau_{z\theta} = \eta \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right).$$

Для речовин, які не підкорюються ньютонівському закону, в'язкість не є сталою величиною. Її залежність від умов течії можна описати степеневим законом.

Степеневий закон з урахуванням температурної залежності в'язкості для різних класів рідин має вигляд:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = K (\lambda \dot{\gamma})^{n-1} H(T),$$

де K – величина середньої в'язкості рідини, Па·с; λ – період релаксації, с; $\dot{\gamma}$ – другий інваріант \mathbf{D} , с^{-1} ; n – показник ступеня, який визначає клас рідини (згідно з фізичною моделлю $n < 1$, оскільки матеріал належить до класу псевдопластиків); $H(T) = \exp \left[\frac{E_a}{RT_a} \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right) \right]$;

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.

Розглянемо розплав полімеру під дією перепаду тиску уздовж осі каналу Oz із радіусом R і довжиною l ($l/d > 10$). Тиск на вході в канал дорівнює p , а на виході – p_0 . Оскільки течія усталена, то приймаємо, що $\partial p / \partial z = \text{const}$, тобто початкова вхідна ділянка каналу не розглядається.

Перепади тиску за іншими координатами дорівнюють нулю:

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{\partial p}{\partial r} = 0.$$

Отже, швидкості і напруження зсуву також дорівнюють нулю:

$$v_r = v_\theta = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0; \quad \tau_{\theta z} = 0.$$

Оскільки течія розплаву усталена, то швидкість уздовж осі z і в часі не змінюється:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = 0.$$

Гравітаційні сили не враховуємо, оскільки вони набагато менше сил, зумовлених напруженням зсуву, тому:

$$\rho g_r = \rho g_\theta = \rho g_z = 0.$$

Інерційні сили дорівнюють нулю:

$$\rho \frac{dv}{dr} = \rho \frac{dv}{d\theta} = \rho \frac{dv}{dz} = 0.$$

Початкові та граничні умови:

$$\partial T / \partial r = 0; \quad \partial v_z / \partial r = 0 \quad \text{при } r = 0;$$

$$T = T_0 = T_{cm}; \quad \partial T / \partial r = 0 \quad \text{при } z = 0.$$

Умова ковзання (тертя) визначається залежно від температури:

$$\dot{\Delta}_s = -F_{\text{slip}}(T) v_s, \quad \text{за умови } T < T_{\text{fluid}};$$

$$v_s = 0, \quad \text{за умови } T \geq T_{\text{fluid}},$$

де v_s – тангенціальна швидкість рідини; F_{slip} – параметр матеріалу.

Температурна залежність:

$$H(T) = \exp \left[\frac{\alpha}{T - T_0} - \frac{\alpha}{T_a - T_0} \right].$$

Рівняння збереження енергії для даного випадку набуває вигляду:

$$\frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \varepsilon v_z \frac{\partial P}{\partial z} + k \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^{n-1} = 0,$$

де ε – коефіцієнт стисливості; k – коефіцієнт консистенції.

Числове моделювання процесу. Проведено серію числових експериментів для запропонованої конструкції за різних швидкостей подачі. Густина сіткової області для всіх дослідів підбиралася з умови збіжності температури на виході порівняно з попередньою в межах 1 К.

Приклад розподілу тиску (а) та температури (б) у присадковому матеріалі за діаметру дорна

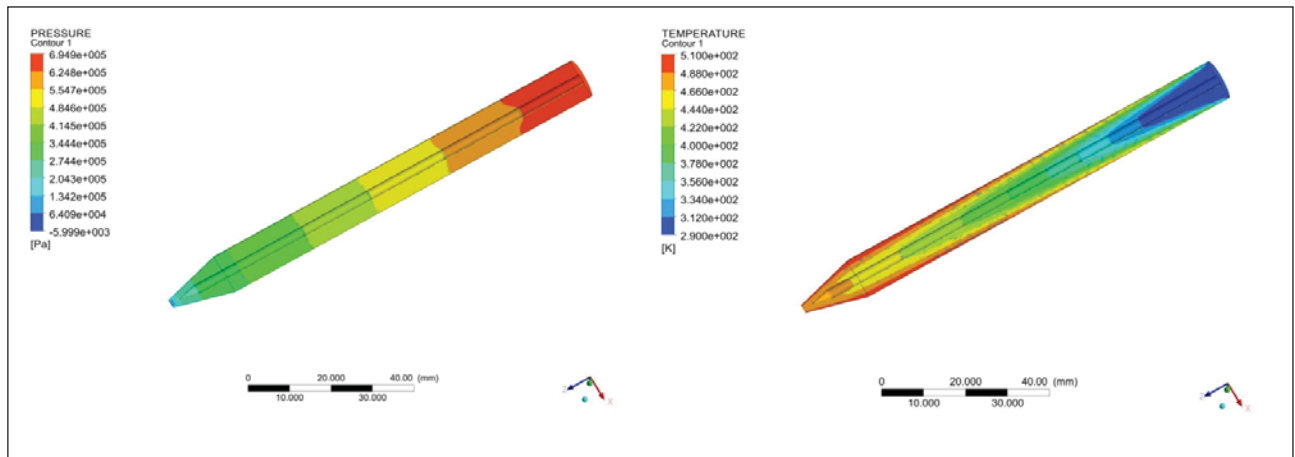


Рис. 3. Розподіл тиску (а) та температури (б) у присадковому матеріалі за діаметра дорна 2,5 мм

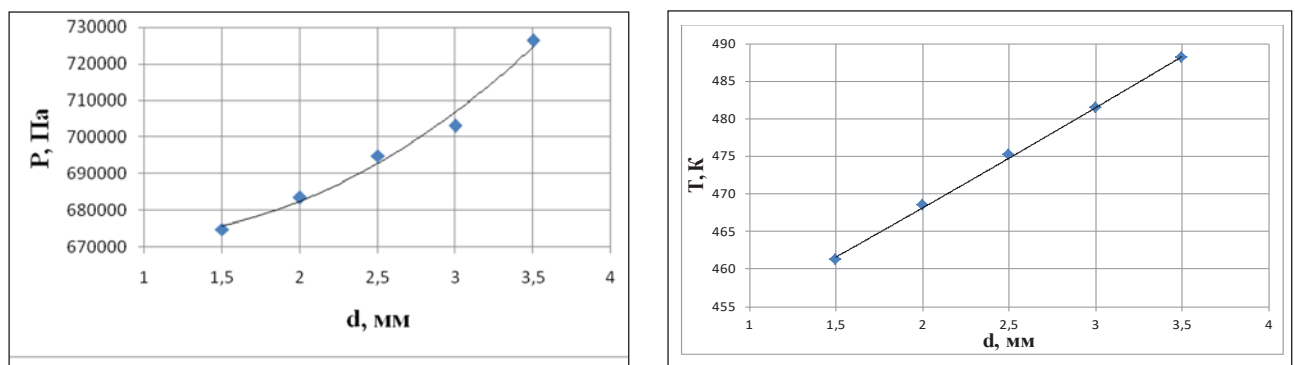


Рис. 4. Залежність тиску на вході в нагрівний канал (а) та температури на виході із сопла (б) від діаметра дорна

2,5 мм та вхідної швидкості 4 мм/с показано на рис. 3, а залежність тиску на вході в нагрівний канал (а) та температури на виході із сопла (б) від діаметра дорна – на рис. 4.

З рис. 3 а видно, що градієнт тиску майже постійний по довжині каналу й рівномірний по радіусу, тоді як плавлення матеріалу в основному відбувається ззовні (рис. 3 б), а його температурна гомогенізація – у проміжку між дорном і виходом із сопла.

Рис. 4 а, б показує майже лінійне зростання необхідного тиску для просування присадкового матеріалу та температури на виході із сопла зі збільшенням діаметру дорна. Причому зі збільшенням внутрішнього діаметра від 1,5 мм до 3,5 мм збільшення тиску є незначним (7,5%), а підвищення температури розплаву становить майже 25°C, що показує вищу ефективність плавлення за цієї геометрії. Подальше збільшення внутрішнього діаметра отвору може бути недоцільним внаслідок зменшення жорсткості полімерного стрижня під час його просування в нагрівному каналі.

На рис. 5 показано змодельований розподіл температур розплаву по довжині сопла від переходу із циліндричного каналу до виходу для різних кутів загострення дорна. Кут загострення сопла в усіх випадках становив 15°.

З рис. 5 випливає, що максимум температури досягається завдяки дисипації в місці з найменшою площею перерізу між дорном і соплом. Найдоцільнішою геометрією з міркувань однорідності температур та енергетичних витрат є така, де кут дорна й сопла становить 15°.

Найбільш доцільною температурою розплаву на виході із сопла є 450К. Розрахунки показують, що такої температури за традиційної конструкції можна досягти за швидкості подачі 3,6 мм/с, а для запропонованої конструкції з діаметром дорна 2,5 мм – 4 мм/с. Для першого випадку необхідна витрата потужності на подачу матеріалу становить 0,266 Вт, а для другого – 0,213 Вт, тобто на 16% менше. Потужність нагрівачів вважалась однаковою. Результати моделювання доводять доцільність застосування запропонованої

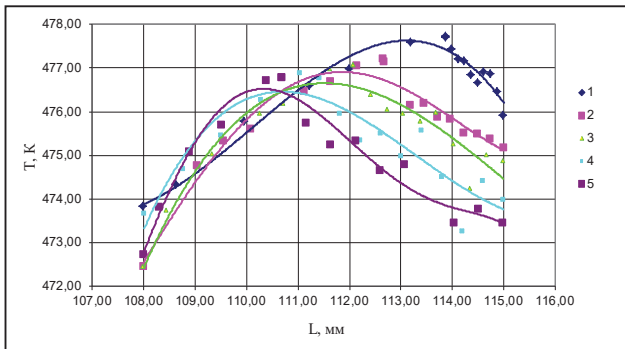


Рис. 5. Розподіл температури по довжині сопла для різних кутів загострення дорна α :
 1 – $\alpha=12^\circ$; 2 – $\alpha=15^\circ$; 3 – $\alpha=17^\circ$; 4 – $\alpha=20^\circ$; 5 – $\alpha=25^\circ$

конструкції пристрою для зварювання розплавом.

Висновки. Складено математичну модель процесу плавлення полімерного прутка в пристроях

для зварювання розплавом. Сформульовано початкові та граничні умови для застосування в числовому моделюванні.

Запропоновано вдосконалену конструкцію пристрою для зварювання розплавом із трубчастим прутком і соплом із внутрішнім дорном.

Виконано числове моделювання процесу плавлення для традиційної й удосконаленої конструкцій. Встановлено розподіл тиску на вході в канал та температури на виході із нього для різних швидкостей подачі прутка. Враховано дисипативні ефекти під час просування полімерного матеріалу в каналі в твердому та розплавленому станах.

Визначено доцільні геометричні параметри пристрою зварювання та технологічні параметри процесу. Підтверджено енергетичну ефективність запропонованої конструкції порівняно з наявними.

Список літератури:

1. Шестопад А.Н., Васильев Ю.С., Минеев Э.А. и др. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс. Киев: Техника, 1986. 192 с.
2. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. Сварка пластмасс. Москва: Машиностроение, 1978. 222 с.
3. Тростянская Е.Б., Комаров Г.В., Шишкин В.А. Сварка пластмасс. Москва: Машиностроение, 1967. 252 с.
4. Пристрій для нанесення термоклею: Патент № 117252. Україна. № у 201612809, заявл. 16 грудня 2016 р.; опубл. 26 червня 2017 р. Бюл. № 12/2017.
5. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). Москва: Химия, 1977. 464 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ПРУТКА В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

Составлена математическая модель процесса плавления полимерного прутка в устройствах для сварки расплавом. Предложена усовершенствованная конструкция устройства для сварки расплавом. Выполнено числовое моделирование процесса плавления для традиционной и усовершенствованной конструкций. Установлено распределение давления на входе в канал и температуры на выходе из него для различных скоростей подачи прутка. Подтверждена энергетическая эффективность предложенной конструкции по сравнению с существующими.

Ключевые слова: плавление, полимер, сварка, присадочный материал, моделирование.

MODELING OF MELTING OF POLYMERIC BAR IN THE WELDING PROCESS WITH FILLING MATERIAL

A mathematical model of the process of melting polymer rod in devices for welding with a melt is made. An improved design of the melt welding device is proposed. Numerical modeling of the melting process for traditional and improved designs is performed. The distribution of the pressure at the inlet to the channel and the temperature at its outlet for different feed rates of the rod are established. The energy efficiency of the proposed design is confirmed in comparison with the existing ones.

Key words: melting, polymer, welding, filler material, modeling.