

III МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 66.03:678.05

Канд. техн. наук Плескач В. М.

Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУВАЛЬНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи. Розроблення методики теплового розрахунку при проектуванні енергозаощаджувальних прес-форм для виготовлення виробів з композиційних матеріалів.

Методи дослідження. Аналіз наявних теплових розрахунків прес-форм; аналіз теорії теплообміну і теплопровідності та розрахунків на їх основі.

Отримані результати. У процесі роботи з'ясовані та описані процеси конвективної тепловіддачі з бічної поверхні прес-форми; розроблена методика розрахунку втрат енергії шляхом тепловіддачі при певній температурі на зовнішній поверхні прес-форми. З метою заощадження втрат енергії запропоновано застосовувати на поверхні тепловіддачі прес-форми шар з теплоізоляційного матеріалу; на підставі законів теплопровідності запропоновано методику розрахунку його товщини для досягнення оптимальної температури на поверхні тепловіддачі ізольованої прес-форми.

Наукова новизна. У літературних джерелах не трапляються подібні методи розрахунку температури на ізольованій поверхні прес-форми і зменшених у зв'язку з цим втрат енергії шляхом тепловіддачі.

Практична цінність. Запропонований метод розрахунку може бути використаний при проектуванні енергозаощаджувальних прес-форм для виготовлення виробів з композиційних матеріалів.

Ключові слова: прес-форма, енергозаощаджування, тепловіддача, теплопровідність, конвекція

Виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) прямим пресуванням вимагає значних енергетичних втрат, пов'язаних з плавленням вихідних матеріалів і витримкою виробів у прес-формі на час формування і полімеризації. Проблема заощаджування енерговтрат при пресуванні є завжди актуальною. Розрахунок тепловіддачі прес-форми з теплоізоляційним шаром на поверхні тепловіддачі дозволяє обрати оптимальні матеріал і товщину теплоізоляційного шару, чим заощаджується втрата енергії.

Повні втрати тепла при пресуванні виробу розраховуються за залежністю [1–4]:

$$Q_n = Q_{км} + Q_{сн} + Q_{бн} + Q_i, \text{ Вт}, \quad (1)$$

де $Q_{км}$ – теплота нагрівання композиційного матеріалу у прес-формі, Вт; $Q_{сн}$ – втрата теплоти у стіл преса, Вт;

$Q_{бн}$ – віддача теплоти з бічної поверхні у довкілля, Вт;

$Q_{бз}$ – втрати теплоти крізь болтові з'єднання, Вт;
 Q_i – інші втрати (Вт).

Конструктивно знизити втрати тепла шляхом теплоізоляції можна було б у місці закріплення прес-форми на столі преса. Але під періодичною дією зусилля пресування цей шар теплоізоляції напевно з часом швидко зруйнується. Тому варто розглянути можливість теплоізоляції бічної поверхні прес-форми.

Принципово при аналізі теплообміну між бічною поверхнею і довкіллям прес-форму можна розглядати як прямий циліндр (з вертикальною стінкою) з круговою або некруговою основою. Процес теплообміну між стінкою прес-форми і газом довкілля (повітрям) здійснюється шляхом вільної конвекції, тобто газами, які нагріваються від гарячої поверхні і рухаються по ній вгору, постійно змінюючись.

Інтенсивність тепловіддачі при конвективному теплообміні можна оцінити за формулою Ньютона – Рихмана [5]:

$$Q = \alpha F(t_c - t_2), \text{ Вт}, \quad (2)$$

де F – площа поверхні тепловіддачі, м^2 ; t_c – температура стінки, $^{\circ}\text{C}$; t_2 – температура газу доквілля, $^{\circ}\text{C}$; α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Проте складність практичних розрахунків пов'язана з тим, що коефіцієнт тепловіддачі залежить від багатьох чинників, які характеризують власне процес теплообміну, і визначити його непросто.

При конвективному русі вздовж вертикальної стінки прес-форми температура повітря змінюється від t_c до t_2 на певній відстані від стінки, а швидкість руху – від нуля до максимальної величини у її верхній точці. Спочатку товщина прилеглого шару повітря дуже мала, і рух у ньому має ламінарний характер. При подальшому русі вгору товщина шару збільшується, а характер руху стає нестабільним і за певних умов переходить у турбулентний. Переважання того чи іншого режиму руху залежить як від температурного напору ($\Delta t = (t_c - t_2)$), так і від часу руху вздовж стінки (її висоти). Форма тіла (поперечний переріз) практично не впливає на зміну характеру руху повітря, більше значення має протяжність поверхні, вздовж якої здійснюється рух. З початком руху ламінарний потік має плівковий характер, який поступово переходить у власне ламінарний. Турбулентний рух починається з хвильового, локоноподібного руху і з часом переходить у вихровий з відривом вихрів від стінки. Проте на нижній ділянці стінки довжиною 0,2...0,3 м ламінарний режим зберігається навіть при великих температурних напорах.

На сьогодні у літературних джерелах [1–4] пропонуються різноманітні емпіричні формули для визначення коефіцієнта тепловіддачі. Однак для обґрунтованого розв'язання задачі незалежно від форми, розмірів і матеріалу виробу, що охолоджується, необхідно виконати умови подібності теплових процесів, які мають універсальний вигляд на основі теорії подібності. Згідно з нею інтенсивність тепловіддачі визначається числом Нуссельта Nu , яке при вільній конвекції має вигляд:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (3)$$

де Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля.

Число Грасгофа Gr характеризує відносну ефективність підйомної сили, яка викликає вільноконвективний рух газу доквілля вздовж охолоджуваної поверхні, і має вигляд [4–6]:

$$Gr = g\beta\Delta t \frac{l^3}{\nu^2}, \quad (4)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення газу до-

квілля, $1/^{\circ}\text{C}$; Δt – температурний напір, $^{\circ}\text{C}$; l – характерний лінійний розмір поверхні, м ; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості газу доквілля, $\text{м}^2/\text{с}$.

Число Прандтля Pr – це теплофізична характеристика теплоносія.

Постійні C і n у рівнянні (3) різні для різних значень аргументу ($Gr \cdot Pr$) наведені у таблиці 1 [5, 6].

Таблиця 1 – Значення C і n у рівнянні (3)

| № поз. | Число $Gr \cdot Pr$ | C | n |
|--------|---|-------|-----|
| 1 | $10^{-3} < Gr \cdot Pr \dots 10^{-3}$ | 0,450 | 0 |
| 2 | $< Gr \cdot Pr < 5 \cdot 10^2$ | 1,18 | 1/8 |
| 3 | $5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$ | 0,540 | 1/4 |
| 4 | $2 \cdot 10^7 < Gr \cdot Pr \dots$ | 0,135 | 1/3 |

Позиції аргументу в таблиці відповідають згаданим вище чотирьом режимам руху повітря вздовж поверхні теплообміну (плівковому, ламінарному і т. д.).

Розрахунок втрат тепла при тепловіддачі за даними таблиці, наведеної вище, не дає точного результату, оскільки рекомендовані значення аргументу ($Gr \cdot Pr$) для кожного режиму руху мають дуже широкий діапазон значень. Детальні рекомендації з розрахунку числа Нуссельта Nu з урахуванням умов тепловіддачі, теплофізичних властивостей і розмірів поверхні тепловіддачі та теплофізичних властивостей охолоджувального газу наведені у [5]. За звичай бічна поверхня прес-форми на ділянці, яка конструктивно доступна для теплоізоляції, розташована вертикально і не перевищує 0,3 м за висотою, тому можна впевнено вважати, що тепловіддача з неї у доквілля відбувається за умови конвективного ламінарного руху повітря. У такому випадку число Нуссельта Nu знаходиться за формулою:

$$Nu = 0,76 (Gr_c \cdot Pr_c)^{0,25} \cdot (Pr_c / Pr_c)^{0,25}, \quad (5)$$

де Gr_c , Pr_c , Pr_c – числа Грасгофа і Прандтля газу (повітря) і стінки відповідно.

Остаточний коефіцієнт тепловіддачі знаходиться за формулою [4, 5]:

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{h} Nu, \quad (6)$$

де λ_c – коефіцієнт теплопровідності повітря при температурі доквілля, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

h – висота бічної поверхні тепловіддачі прес-форми, м .

Аналізуючи формули (2), (4) і (5), можна зробити висновок, що при інших рівних умовах домінуючим чинником величини коефіцієнта тепловіддачі є тепловий напір Δt , і знизити його можна за рахунок теплоізоляційного шару на бічній поверхні прес-форми.

Досвід експлуатації свідчить [1–3], що за звичайної для полімерних композиційних матеріалів температури пресування 170...180 °С температура зовнішньої однорідної металеві стінки прес-форми без теплоізоляції становить 165...170 °С, а зовнішньої поверхні теплоізоляції має бути 50...80 С. Щоб досягнути бажаної температури на поверхні теплоізоляції, з якої відбувається тепловіддача, необхідно обрати матеріал теплоізоляційного шару з низьким коефіцієнтом теплопровідності та провести розрахунок достатньої товщини ізоляційного шару, користуючись законами теплопровідності.

Для цих розрахунків матриця прес-форми розглядається як металевий порожнистий циліндр. Щоб унезалежити розрахунки від висоти конкретної прес-форми, кількість теплоти, яка проходить через стінки матриці, варто віднести до одиниці її висоти:

$$q_h = \frac{2\pi\lambda_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (t_1 - t_2), \quad (7)$$

де λ_1 – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки матриці, Вт/(м·°С); d_1 і d_2 – діаметри внутрішньої та зовнішньої стінок матриці відповідно, м; t_1 і t_2 – температури внутрішньої та зовнішньої стінок матриці відповідно, °С.

У двошаровому циліндрі (сталеві стінка матриці та шар теплоізоляції) через усі шари проходить одна й та сама кількість тепла. Тому тепловий напір у другому, теплоізоляційному шарі можна записати як:

$$t_2 - t_3 = \frac{q_h}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}, \quad (8)$$

де λ_2 – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційного матеріалу, Вт/(м·°С); d_3 , і t_3 – діаметр і температура зовнішньої стінки теплоізоляційного матеріалу відповідно, м і °С.

Звідси шукана температура зовнішньої стінки теплоізоляційного матеріалу, яка визначає тепловий напір тепловіддачі:

$$t_3 = t_2 - \frac{q_h}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}. \quad (9)$$

Як приклад використання запропонованої методики теплового розрахунку прес-форм можна розглянути тепловий розрахунок сталеві матриці прес-форми (ко-

ефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = 50$ Вт/(м·°С)) з внутрішнім діаметром $d_1 = 50$ мм, зовнішнім діаметром $d_2 = 80$ мм і висотою $h = 200$ мм. Виріб з ПКМ пресується за температури $t_1 = 170$ °С, при цьому температура зовнішньої стінки матриці $t_2 = 165$ °С. Температура повітря довкілля – 30 °С. За цих умов втрати тепла через неізольовану металеву стінку матриці становлять 68,04 Вт.

Якщо на бічну поверхню нанести ізоляційний шар з композиційного матеріалу на керамічній основі (коефіцієнт теплопровідності $\lambda_2 = 1,35$ Вт/(м·°С)) діаметром $d_3 = 100$ мм, то на його зовнішній поверхні встановиться температура $t_3 = 77$ °С. Втрати тепла через ізольовану бічну поверхню матриці за таких умов становлять 22,74 Вт. Тобто заощадження тепла на нагрівання прес-форми становитиме 66 %.

Отже запропонований порівняно простий метод теплового розрахунку може бути ефективно використаний при проектуванні енергозаощаджувальних прес-форм для виготовлення виробів з ПКМ.

Список літератури

1. Производство изделий из полимерных материалов : Учеб. пособие. / Крыжановский В. К., Кербер М. Л., Бурлов В. В., Паниматченко А. Д. – СПб : Профессия, 2004. – 464 с.
2. Басов Н. И. Расчёт и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов : учебник / Басов Н. И., Брагинский В. А., Казанков Ю. В. – М. : Химия, 1991. – 352 с.
3. Сокольський О. Л. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас: Навч. Посібник / Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Мікульонюк І. О. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 130 с.
4. Основы конструирования деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления : учеб. пособие / Мирзоев Р.Г., Кугушев И.Д., Брагинский В.А и др. – Л. : Машиностроение, 1972. – 416 с.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи / Михеев М. А., Михеева И. М. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
6. Энциклопедия физики и техники. Грасгофа число. URL: www.femto.com.ua/articles/part_1/0872html

Одержано 04.11.2019

Плескач В. М. Расчет энергосберегающих пресс-форм для изготовления изделий из композиционных материалов

Цель работы. Разработка методики теплового расчета при проектировании энергосберегающих пресс-форм для изготовления изделий из композиционных материалов.

Методы исследования. Анализ существующих тепловых расчетов пресс-форм; анализ теории теплообмена и теплопроводности и расчетов на их основе.

Полученные результаты. В ходе работы выяснены и описаны процессы конвективной теплоотдачи с боковой поверхности пресс-формы; разработана методика расчета потери энергии путём теплоотдачи при определенной температуре на внешней поверхности пресс-формы. С целью экономии расхода энергии предложено применять на теплоотдающей поверхности пресс-формы слой из теплоизоляционного материала; на основании законов теплопроводности предложена методика расчета его толщины для достижения оптимальной температуры на теплоотдающей поверхности пресс-формы.

Научная новизна. В литературных источниках не встречаются подобные методики расчета температуры на изолированной поверхности пресс-формы и уменьшенных в связи с этим потерь энергии путём теплоотдачи.

Практическая ценность. Предложенный метод расчета может быть использован при проектировании энергосберегающих пресс-форм для изготовления изделий из композиционных материалов.

Ключевые слова: пресс-форма, энергосбережения, теплоотдача, теплопроводность, конвекция.

Pleskach V. Calculation of energy-saving press-forms for the manufacture of products from composite materials

Purpose. Development of a method of thermal calculation in the design of energy-saving press-forms for the manufacture of products from composite materials.

Research methods. Analysis of existing thermal calculations of press-forms; analysis of the theory of heat transfer and thermal conductivity and calculations based on them.

Results. In the course of the work, the processes of convective heat transfer from the lateral surface of the press-forms are clarified and described; a method of calculating the losses of energy by heat transfer at a certain temperature on the outer surface of the press-form has been developed. In order to reduce energy consumption, it is proposed to apply a layer of thermal insulation material on the heat-transfer surface of the press-form; on the basis of the laws of thermal conductivity, a method for calculating its thickness is proposed to achieve the optimum temperature on the outer surface of the press-form.

Scientific novelty. There are no similar methods in the literature for calculating the temperature on the insulated surface of the press-form and the reduced heat transfer in this connection.

Practical value. The proposed calculation method can be used in the design of energy-saving press-forms for the manufacture of products from composite materials.

Key words: press-form, energy saving, heat transfer, thermal conductivity, convection.
