

УДК 621.762:536.24

- Плескач В. М. канд. техн. наук, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vmpayzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6182-4332
- Акімов І. В. канд. техн. наук, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kafedra_t_met@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6076-0149
- Кирилах С. В. аспірантка кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: lanakirilaha@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5688-5616

ВИБІР ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи. Полягає у розробленні методики теплового розрахунку прес-форм для виготовлення виробів з композиційних матеріалів, яка дозволяє обрати ізоляційний матеріал, що забезпечує ефективне заощаджування витрат тепла.

Методи дослідження. При дослідженні проведений теоретичний аналіз існуючих теплових розрахунків прес-форм; проведений аналіз теорії теплообміну на основі теорії подібності, використовуючи безрозмірні критерії Нуссельта, Грасгофа та Прандтля; проведений аналіз довідкових даних про властивості ізоляційних матеріалів.

Отримані результати. З'ясовані та описані процеси конвективної тепловіддачі з бічної поверхні прес-форми; розроблена методика розрахунку витрат енергії шляхом тепловіддачі при певній температурі на зовнішньої поверхні неізольованої прес-форми; встановлено вирішальну роль для вибору ізоляційного матеріалу є температура стінки, з якої власне здійснюється тепловіддача; визначена методика зниження енерговитрат шляхом застосування на поверхні тепловіддачі прес-форми шару з теплоізоляційного матеріалу, досягаючи на ізольованій поверхні прес-форми заданої температури; на прикладі прес-форми конкретних розмірів, обрані оптимальні матеріали і визначена їх ефективність у зниженні витрат тепла.

Наукова новизна. Розроблена методика оцінювання ефективності теплоізоляційного матеріалу шляхом розрахунку температури на ізольованій поверхні прес-форми; зменшення у зв'язку з цим витрат тепла шляхом тепловіддачі досягається за допомогою обраного оптимального теплоізоляційного матеріалу, які мають відповідні теплофізичні і технологічні властивості.

Практична цінність. Наведені відомості про вплив конструкції матриці прес-форми та довідкові відомості про теплопровідність теплоізоляційних матеріалів; запропонований метод розрахунку може бути використаний при проектуванні енергозаощаджувальних прес-форм для виготовлення виробів з композиційних матеріалів.

Ключові слова: прес-форма, тепловіддача, теплопровідність, конвекція, теплоізоляційний матеріал, коефіцієнт тепловіддачі.

Вступ

Полімерні композиційні матеріали мають різноманітні властивості, цінні в експлуатації: висока міцність за різних умов навантажування, достатня теплостійкість, висока хімічна стійкість у різних середовищах. Тому попит і номенклатура виробів з композиційних матеріалів з кожним роком збільшується. Звідси виникає нагальна необхідність проектування і розрахунку технологічної оснастки (формотвірних інструментів). Адже власне оснастка відповідає як за якість виробів і продуктивність виробництва, так і за енергетичні виробничі витрати, які суттєво впливають на собівартість продукції.

Для виготовлення виробів з композиційних матеріалів використовуються дуже різноманітні технології залежно від їх форми, розмірів і призначення. Проте найпоширенішим є пресування.

Пресування – найпоширеніший процес виготовлення виробів головним чином з термоактивних полімерів, рідше – з термопластів [1–4]. Суть методу полягає у тому, що вихідний прес-матеріал у твердому стані завантажується в оснастку (матрицю, завантажувальну камеру), де плавиться і під тиском заповнює порожнину оснастки. За час витримки у виробі проходять певні процеси, які забезпечують стабільність і точність розмірів виробів.

Особливість виготовлення виробів з полімерних матеріалів полягає у тому, що в оснастці одночасно формується і склад матеріалу виробу, і його конфігурація. Перероблення полімерних композиційних матеріалів ґрунтується на фізичних і хімічних процесах, що відбуваються під час виготовлення виробу [1]. Фізичні процеси (нагрівання, плин полімерної маси, охолодження і т. п.) забезпечують заповнення форму-

вальної оснастки вихідним матеріалом. Хімічні процеси визначають швидкість формування молекулярної мережі та її щільність.

Прес-форми – основна оснастка для виготовлення виробів пресуванням. Вони виготовляються для кожного виробу індивідуально, у зв'язку з чим їх конструкція, робота та особливості використання надзвичайно різноманітні. Всі вони складаються з технологічних деталей, які контактують з прес-матеріалом і надають йому певну конфігурацію (матриця, пуансон, стрижень), і конструктивні (болти, колонки, упори тощо).

Обов'язковою для всіх прес-форм є система обігрівання.

Система обігрівання служить для створення настільки можливо рівномірнішого температурного поля для матеріалу виробу і забезпечення мінімальної витрати часу на нагрівання і твердіння виробу [4, 5]. Вона створює повноцінну передачу тепла ззовні в робочу зону пресування. Одночасно система повинна правильно реагувати на робочий цикл пресування: нагрівання, охолодження і наступне відновлення нагрівання за мінімальний час.

Тепло, яке надає система обігрівання, витрачається не лише на здійснення необхідних фізичних і хімічних процесів у композиті. Значна частина його безперервно витрачається назовні: у елементи обладнання, з яким контактує прес-форма, у навколишнє середовище – постійно з бічної поверхні і періодично у зазор між пуансоном і матрицею в момент закінчення пресування.

У даній статті аналізується характер витрат тепла з бічної поверхні, спосіб їх оцінювання, а також можливість їх зниження за рахунок використання теплоізоляційних матеріалів. На підставі аналізу наводиться методика вибору оптимального теплоізоляційного матеріалу.

Аналіз досліджень та публікацій

Теплові процеси при експлуатації прес-форм

Роль нагрівання прес-форми і виробу в ній під час експлуатації є провідною, оскільки необхідний для формування тиск залежить від в'язкості розплавленого у формі композиційного матеріалу, а отже й від його температури. Робоча температура, яку нагрівач створює всередині прес-форми, залежить від технологічних властивостей прес-матеріалу і визначається робочою температурою пресування. Саме ця температура є основою для розрахунків витрат тепла при експлуатації прес-форм.

Загальні втрати тепла прес-формою $Q_{\text{заг}}$ (Вт), що відбуваються при стаціонарному процесі пресування, визначається за формулою [1, 5–6]:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{дов}} + Q_{\text{бз}} + Q_i, \quad (1)$$

де $Q_{\text{ст}}$ – втрати тепла у стіл преса; $Q_{\text{дов}}$ – втрати тепла у довкілля прес-форми; $Q_{\text{бз}}$ – втрати тепла через болтові з'єднання; Q_i – інші теплові втрати.

Втрати тепла у стіл преса і через болтові можна знайти порівняно просто, оскільки тепловіддача відбувається шляхом теплопровідності, яка залежить від сталих теплофізичних характеристик відповідних матеріалів.

Тепловіддача у стіл преса визначається площею контакту між столом і прес-формою і дещо стримується за рахунок низького коефіцієнта теплопровідності матеріалу теплоізоляційної прокладки між ними. Втрати тепла через болтові з'єднання аналогічно залежать від поперечного перерізу болтових з'єднань і коефіцієнта теплопровідності матеріалу болтів.

Конструктивно знизити втрати тепла у стіл і через болти шляхом теплоізоляції можна було б у місці закріплення прес-форми на столі преса. Але внаслідок періодичної дії зусилля пресування цей шар теплоізоляції напевно з часом швидко зруйнується.

Згадані вище літературні джерела наводять таку оцінку часток окремих видів втрат теплової енергії на підставі досвіду експлуатації: 8...18 % витрачається в стіл преса, 3...6 % через болти і 18...20 % припадає на інші втрати. Ці втрати сумарно становлять меншу частину загальних втрат теплової енергії прес-формою. Тому найбільший інтерес становлять втрати тепла через бічну поверхню прес-форми.

Мета роботи

Задачею даної роботи є описати характер і теоретичні закономірності тепловіддачі через бічну поверхню прес-форми, розглянути можливості зменшити їх за допомогою теплоізоляції і розробити з цією метою методику вибору оптимального теплоізоляційного матеріалу.

Матеріал і методика досліджень

Предметом даного дослідження є аналіз характеру і закономірностей тепловіддачі через бічну поверхню прес-форми. Теплообмін між твердою (металевою) поверхнею прес-форми і газоподібним середовищем навколо неї відбувається дуже складно і залежить від багатьох чинників.

З точки зору тепловіддачі через бічну поверхню прес-форму можна розглядати як вертикальний циліндр, поперечний переріз якого залежить від конфігурації виробу. За літературними даними [4, 6–8] найбільша тепловіддача з бічної поверхні такого циліндра у докілья здійснюється шляхом конвективного теплообміну.

Конвективний теплообмін складається з двох процесів, які діють одночасно – теплопровідність і конвекція. За рахунок теплопровідності тепло передається від розплавленого у формі матеріалу, до зовнішньої поверхні стінки матриці прес-форми і створює температурний напір відносно сусіднього газового середовища Δt (різниця температур стінки і газового середовища докілья). Одночасно передане теплопровідністю тепло безперервно переноситься від нагрітої поверхні стінки у докілья разом з рухом самого газового середовища за рахунок конвекції.

Інтенсивність тепловіддачі характеризується коефіцієнтом тепловіддачі α (Вт/(м²·°C)), який дорівнює щільності теплового потоку, віднесеної до площі поверхні розділу і температурному напору Δt .

Коефіцієнт тепловіддачі α , який характеризує інтенсивність конвективного теплообміну, важко визначити однозначно. Його величина змінюється по висоті (або довжині) нагрітої поверхні, від її положення у просторі та від відстані від поверхні стінки (рис. 1).

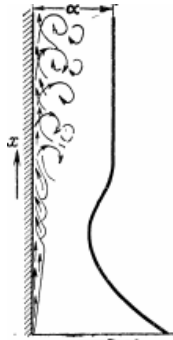


Рисунок 1. Зміна характеру руху газу і коефіцієнта тепловіддачі по висоті нагрітої стінки

Процеси теплообміну між вертикальною стінкою матриці і довір'ям безпосередньо пов'язані з рухом газового середовища вздовж неї. Рухаючись вгору вздовж стінки за рахунок конвекції, газ все більше і більше нагрівається, збільшується товщина прилеглого шару і швидкість його руху, а разом з цим змінюється характер руху газу. Спочатку товщина прилеглого шару дуже мала, елементарні частинки газу рухаються «шарувато» з приблизно однаковою швидкістю; такий режим руху називається *плівчастим*. Далі швидкість руху збільшується, рух газу набуває струменистий характер, коли його окремі шари рухаються з різними швидкостями, але ще не перемішуються, тобто мають доволі плавний, спокійний характер. Такий режим руху називається *ламінарним*. При подальшому переміщенні газу вгору рух прилеглого шару стає нестабільним, окремі струмені закручуються, перемішуються з іншими. За його зовнішнім виглядом такий режим називається *локоноподібним*. При подальшому нагріванні рух газу стає неупорядкованим, окремі частинки газу переміщуються хаотично; напрямки і швидкості їх безперервно змінюються. Внаслідок цього утворюються вихри, які час від часу відриваються від нагрітої поверхні. Товщина прилеглого шару теплообміну значно збільшується. Такий режим руху називається *турбулентним* [7, 9].

Переважання того чи іншого режиму руху залежить як від температурного напору між стінкою і газом Δt , так і від часу руху вздовж стінки (її висоти). Проте на нижній ділянці стінки висотою 0,2...0,3 м ламінарний режим зберігається навіть при великих температурних напорах. Форма тіла (поперечний переріз) практично не впливає на зміну характеру руху

повітря, більше значення має протяжність поверхні, вздовж якої здійснюється рух.

Методика дослідження і визначення коефіцієнта тепловіддачі α ґрунтується на *теорії подібності*, за допомогою якої розмірні фізичні величини об'єднуються у нові змінні – безрозмірні комплекси, що у теорії подібності називаються *критеріями (числами) подібності* [7–9]. Вони відбивають вплив на процес теплообміну не окремих фізичних величин, а їх сукупності. Це дозволяє легше визначити фізичні зв'язки у процесі, що розглядається. Для розрахунків при конвективному теплообміні використовуються наступні критерії подібності.

Критерій Нуссельта Nu характеризує теплообмін на межі стінки – газ (повітря). Його можна розглядати як відношення щільності двох теплових потоків: переданого внаслідок тепловіддачі і такого, що пройшов через шар газу за рахунок теплопровідності.

Критерій Грасгофа Gr [11] характеризує співвідношення між підйомною силою, яка виникає внаслідок температурного напору $\Delta t = (t_c - t_g)$, і в'язкістю газу, тобто відносною ефективністю підйомної сили. Критерій Грасгофа може служити незалежним аргументом, величину якого можна розрахувати, знаючи властивості газу, що рухається вздовж стінки.

Критерій Прандтля Pr – це фактично теплофізичні характеристики носіїв тепла – газу і стінки. Вони залежать від температури газу і стінки прес-форми, але при спільній температурі мають приблизно однакову величину.

Результати досліджень

Інтенсивність *тепловіддачі* при конвективному теплообміні можна оцінити за тепловіддачі з бічної поверхні формулою Ньютона – Рихмана [7]:

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

де F – площа поверхні тепловіддачі, м²; t_c – температура стінки, °C; t_g – температура газу довір'я, °C; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C).

Судячи з цієї формули, при використанні шару теплоізоляційного матеріалу на бічній поверхні прес-форми площа поверхні тепловіддачу F практично не змінюється. Суттєво зміниться температура стінки t_c , і її вплив на характер теплообміну з довір'ям. Проте головну роль у зменшенні інтенсивності тепловіддачі відіграє значне зменшення коефіцієнта тепловіддачі α з ізольованої бічної поверхні прес-форми у зв'язку з її нижчою температурою t_g . Тому дане дослідження зосередилося на методиці розрахунку коефіцієнта тепловіддачі α при конвективному теплообміні.

Першим розраховується критерій Грасгофа за формулою:

$$Gr = g\beta(t_c - t_g) \frac{l^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення газу

довкілля, $1/^\circ\text{C}$; t_c – температура стінки матриці, $^\circ\text{C}$; t_2 – температура газу доквілля, $^\circ\text{C}$; l – характерний лінійний розмір поверхні, м; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості газу доквілля, m^2/s .

Наступний критерій, що визначає коефіцієнт тепловіддачі, – це критерій Нуссельта. Розрахунок критерія Нуссельта Nu проводиться з урахуванням умов тепловіддачі, теплофізичних властивостей і розмірів поверхні тепловіддачі та теплофізичних властивостей газу доквілля. На кількісні характеристики розрахунків суттєво впливає характер руху газу вздовж бічної стінки: пливчастий, ламінарний, локоноподібний чи турбулентний. Використання формул для розрахунку критерія Нуссельта Nu залежно від характеру руху газу доквілля детально розглянуто у [7].

Звичайно бічна поверхня прес-форми на ділянці, яка конструктивно доступна для теплоізоляції, розташована вертикально і найчастіше 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 критерій Нуссельта Nu знаходиться за формулою:

$$Nu = 0,76 (Gr_r \cdot Pr_r)^{0,25} \cdot (Pr_r / Pr_c)^{0,25}, \quad (4)$$

де Gr_r , Pr_r , Pr_c – критерії Грасгофа і Прандтля газу (повітря) і стінки відповідно.

Для повітря доквілля і стінки матриці прес-форми при температурі 30°C критерії Прандтля приблизно однакові і дорівнюють 0,7 [7].

Остаточний коефіцієнт тепловіддачі α знаходиться за формулою [4, 5, 7]:

$$\alpha = \frac{\lambda_r}{h} \cdot Nu, \quad (5)$$

де λ_r – коефіцієнт теплопровідності повітря при температурі доквілля, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; h – висота бічної поверхні тепловіддачі прес-форми, м.

Аналіз послідовності розрахунків тепловіддачі з бічної стінки матриці показує, що при інших рівних умовах (розміри прес-форми, товщина ізоляційного шару) вирішальним чинником для вибору ізоляційного матеріалу є температура стінки t_c , з якої власне здійснюється тепловіддача. Тому головною задачею на наступному етапі є визначення температури, яку на своїй зовнішній поверхні може забезпечити той чи інший теплоізоляційний матеріал.

Для цього проаналізовано зміни температури при проходженні потоку тепла через стінки неізольованої та ізольованої прес-форми.

Неізольована прес-форма розглядається як вертикальний циліндр з внутрішнім діаметром d_1 і зовнішнім діаметром d_2 висотою l з однорідного матеріалу (сталі) з коефіцієнтом теплопровідності λ_1 . При сталому процесі формування внутрішня стінка циліндра має температуру t_1 , яка відповідає температурі

пресування відповідного прес-матеріалу. За рахунок теплопровідності матеріалу стінки на її зовнішній поверхні створюється температура t_2 (рис. 2).

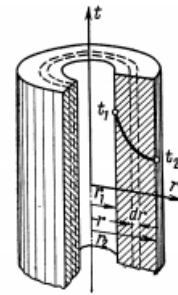


Рисунок 2. Теплопередача через одношарову циліндричну стінку

Щоб унезалежити розрахунок втрат тепла від конкретного розміру прес-форми, тепловий потік через циліндричну стінку розраховується віднесенням до одиниці її висоти [7]:

$$q_1 = \frac{2\pi\lambda_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2). \quad (6)$$

У двошаровому циліндрі (сталева стінка матриці та шар теплоізоляції) через усі шари проходить одна й та сама кількість тепла (рис. 3).

Особливість розрахунку багатошарової стінки полягає у тому що основні характеристики внутрішнього металевого шару залишаються аналогічними характеристикам одношарової стінки (d_1 , d_2 , l , λ_1). Внутрішній діаметр ізоляційного шару співпадає із зовнішнім діаметром внутрішнього шару d_2 , а його теплопровідність становить λ_2 . Зовнішній діаметр ізоляційного шару d_3 визначається розрахунком або конструктивно.

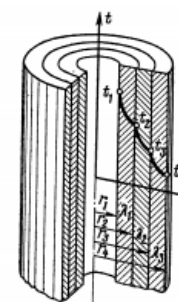


Рисунок 3. Теплопередача через багатошарову циліндричну стінку

Температурний напір у зовнішньому ізоляційному шарі визначається рівнянням:

$$t_2 - t_3 = \frac{q_1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}. \quad (7)$$

і звідси шукана температура зовнішньої стінки теплоізоляційного матеріалу t_3 , яка визначає тепловий напір тепловіддачі, становить:

$$t_3 = t_2 - \frac{q_1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \quad (8)$$

Знаючи теплопровідність теплоізоляційного матеріалу λ_2 , розміри матриці прес-форми та ізоляційного матеріалу, порівняно легко вибрати матеріал, який відповідає заданим умовам експлуатації.

Експерименти

З метою перевірки запропонованої методики оцінювання ефективності теплоізоляційного матеріалу були проведені вибір з вірогідних ізоляційних матеріалів найпридатніших для захисту прес-форми і на прикладі прес-форми конкретних розмірів, обрані оптимальні матеріали і визначена їх ефективність у зниженні витрат тепла.

Використання ефективних теплоізоляційних матеріалів сьогодні є найдешевшим способом підвищення енергоефективності конструкцій, які працюють при високих температурах. У промисловості використовують десятки різноманітних теплоізоляційних матеріалів. До них ставляться такі вимоги: достатньо низький коефіцієнт теплопровідності, необхідна технологічність при використанні, невисока середня густина, стабільність фізико-механічних і теплотехнічних характеристик та задовільна вартість.

На підставі літературних даних [1, 4–6, 12, 13] для експериментальних розрахунків були обрані матеріали, теплофізичні характеристики яких наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Теплопровідність деяких теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Густина ρ , кг/м ³	Теплопровідність λ_2 , Вт/м·°C
Кераміка шамотна	1920...2160	0,85...0,88
Скло боросилікатне	2100...2230	0,92...1,15
Кераміка динасна	1930...2100	1,16...1,18
Бетон	2200...2500	1,28...1,30
Фарфор технічний	2300...2500	1,30...1,35
Скло кварцове	2090...2200	1,38...1,40
Кераміка цирконієва	3140...3400	1,70...1,80

Об'єкт дослідження – теплоізолювана матриця – розглядається як двошаровий циліндр з такими характеристиками: внутрішній діаметр $d_1 = 100$ мм, зовнішній – $d_2 = 120$ мм, висота стінки матриці та ізоляційного шару $l = 100$ мм і теплопровідність сталеві стінки матриці $\lambda_1 = 50$ Вт/м·°C. При подальших кількісних розрахунках прийнято, що товщина ізоляційного шару становить 10 мм, тобто зовнішній діаметр матриці з ізоляційним шаром становить $d_3 = 140$ мм.

Для більшості композиційних матеріалів температура пресування становить 160...180 °C, тому при розрахунках прийнято температуру на внутрішній стінці матриці $t_1 = 170$ °C і на зовнішній – $t_2 = 165$ °C, а температура повітря навколо прес-форми – $t_e = 30$ °C.

За цими даними за формулою (6) розраховувався питомий тепловий потік через стінку матриці q_1 .

На його підставі за формулою (8), знаючи теплопровідність λ_2 обраних теплоізоляційних матеріалів, була розрахована температура зовнішньої стінки кожного теплоізоляційного матеріалу t_3 .

Досвід експлуатації прес-форм свідчить [1, 4–6], що для нормальних умов експлуатації достатньо знизити температуру на ізолюваній поверхні прес-форми до 70...85 °C. За результатами розрахунків за формулою (8) температури t_3 для обраних ізоляційних матеріалів побудована гістограма (рис. 4), на якій виділена полоса рекомендованих для нормальних умов експлуатації температур на ізолюваній поверхні прес-форми (70...85 °C).

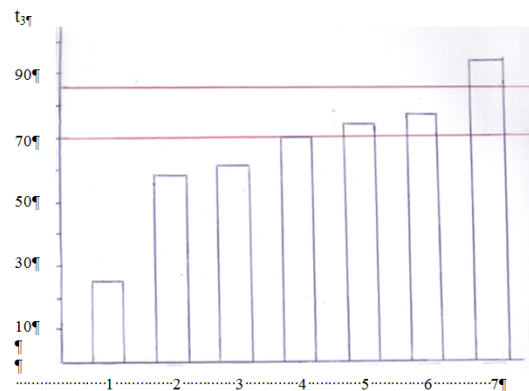


Рисунок 4. Температура ізолюваної поверхні прес-форми при використанні різних теплоізоляційних матеріалів:

1 – кераміка шамотна; 2 – скло боросилікатне; 3 – кераміка динасна; 4 – бетон; 5 – фарфор технічний; 6 – скло кварцове; 7 – кераміка цирконієва

На підставі проведеного аналізу розрахунків та з урахуванням літературних даних і досвіду експлуатації для подальшого розгляду залежно від конструктивних особливостей і виробничих можливостей обрано три ізоляційні матеріали: бетон, технічний фарфор і кварцове скло.

Обговорення

З метою оцінки ефективності виділених для подальшого розгляду ізоляційних матеріалів за формулами (3), (4), (5) був проведений розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі α і далі – за формулою (2) – розрахунок інтенсивності тепловіддачі Q при конвективному теплообміні між неізолюваною та ізолюваними стінками і довкіллям для кожного виду ізоляційного матеріалу. Кількісні розрахунки показали, що від неізолюваної стінки з температурою $t_3 = 165$ °C інтенсивність тепловіддачі становить 60,53 Вт. Обрані ізоляційні матеріали – бетон, технічний фарфор і кварцове скло – знижують температуру на ізолюваній стінці до 70...77 °C, і інтенсивність тепловіддачі знижується до 17,94...21,07 Вт відповідно. Тобто, з використанням цих матеріалів досягається економія енерговитрат 70,3...65,2 %.

Таким чином, на підставі проведеного дослідження підтвердився запропонований метод зменшення енерговитрат при пресуванні виробів з композиційних матеріалів шляхом нанесення на бічну поверхню матриці теплоізоляційного матеріалу.

Висновки

1. Проведений детальний аналіз можливих витрат енергії у процесі виготовлення виробу з композиційного матеріалу пресуванням.
2. Проведений аналіз теоретичних основ теплообміну між бічною стінкою матриці та повітрям довкілля.
3. Запропонована методика (послідовність) розрахунку тепловіддачі при конвективному теплообміні між стінкою матриці і довкіллям.
4. На підставі аналізу теплоізоляційних матеріалів і розрахунків для об'єкта дослідження вибрані та рекомендовані для використання три ізоляційні матеріали, які найбільше відповідають зменшенню енерговитрат при пресуванні виробів з композиційних матеріалів. Розрахунки показали значне зниження витрат тепла при використанні запропонованих теплоізоляційних матеріалів.

Список літератури

1. Производство изделий из полимерных материалов : учеб. пособие / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко. – СПб : Профессия, 2004. – 464 с.
2. Суберляк О. В. Технология переработки полимерных та композиционных материалов / Суберляк О. В., Баштанник П. И. – К. : Вища освіта, 2006. – 260 с.
3. Полимерные композиционные материалы в ракетно-космической технике: учебник / Джур Е. О., Кучма Л. Д., Манько Т. А. и др. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.
4. Сокольський О. Л. Проективання формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас : навч. Посібник / Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Мікульюнок І. О. – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 130 с.
5. Басов Н. И. Расчёт и конструирование формуемого инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: учебник / Басов Н. И., Брагинский В. А., Казанков Ю. В. – М. : Химия, 1991. – 352 с.
6. Основы конструирования и расчёта деталей из пластмассы и технологической оснастки для их изготовления : учеб. пособие / Мирзоев Р. Г., Кугушев И. Д., Брагинский В. А. и др. – Л. : Машиностроение, 1997. – 416 с.
7. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи / Михеев М. А., Михеева И. М. – М. : Энергия, 1987. – 344 с.
8. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Авдудевский В. С., Галицкий Б. М., Глебов Г. А. и др. – М. : Машиностроение, 1992. – 528 с.
9. Обертюх Р. Р. Теоретичні основи теплотехніки : навч. Посібник / Обертюх Р. Р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 165 с.
10. Гильчук А. В. Теория теплопроводности, ч. 1: навч. посібник. – К. : вид. КПІ ім. І. Сікорського, 2017. – 86 с.
11. Энциклопедия физики и техники. Грасгофа число. URL: www.femto.com.ua/articles/part_1/0872html
12. Коэффициенты теплопроводности основных строительных материалов. URL: <https://tehtabru/guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatConductivity/HeatConductivityBuildingMaterialsRevised/>
13. Коэффициенты теплопроводности различных материалов. URL: <http://www.xiron.ru/content/view/58/28/>
14. Швець С. В. Штампи та прес-форми, конструювання та технологія виготовлення: навч. посібник / Швець С. В., Седінкін Л. М. – Суми : СумДУ, 2005. – 110 с.
15. Композиционные материалы в машиностроении / Пименовский Ю. Л., Грудина Т. В., Самохникова А. Б. и др. – К. : Техніка, 1990. – 139 с.

Одержано 04.04.2024

Після доробки 11.04.2024

CHOICE OF THERMAL INSULATION MATERIAL PRESS FORM FOR MANUFACTURING PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS

- Pleskach V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: vmpayzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6182-4332
- Akimov I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: kafedra_t_met@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6076-0149
- Kyrylakha S. Post-graduate student of the Department “Integrated Technologies of Welding and Modeling of Structures”, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: lanakirilaha@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5688-5616

Purpose. The development of a method of thermal calculation of molds for the manufacture of products from composite materials, which allows you to choose an insulating material that ensures effective savings in heat consumption.

Research methods. A theoretical analysis of the existing thermal calculations of the molds was carried out; an analysis of the theory of heat exchange based on the theory of similarity was carried out, using dimensionless criteria of Nusselt, Grashof and Prandtl; an analysis of reference data on the properties of insulating materials was carried out.

Results. In the course of the work, the processes of convective heat transfer from the side surface of the mold were clarified and described; a method of calculating energy losses through heat transfer at a certain temperature on the outer surface of an uninsulated mold was developed; it was established that the temperature of the wall, from which the heat transfer is actually carried out, plays a decisive role in the selection of the insulating material; a method of reducing energy consumption is determined by applying a layer of heat-insulating material on the heat transfer surface of the mold, reaching a given temperature on the isolated surface of the mold; on the example of a mold of specific dimensions, the optimal materials were selected and their effectiveness in reducing heat consumption was determined.

Scientific novelty. Developed methods for evaluating the effectiveness of heat-insulating material by calculating the temperature on the insulated surface of the mold; in this connection, the reduction of heat loss through heat transfer is achieved with the help of the selected optimal heat-insulating material, which has the appropriate thermophysical and technological properties.

Practical value. Information on the impact of the design of the mold matrix and reference information on the thermal conductivity of heat-insulating materials are provided; the proposed calculation method can be used in the design of energy-saving molds for the manufacture of products from composite materials.

Key words: press-form, heat transfer, thermal conductivity, convection, heat-insulating material.

References

1. Proizvodstvo izdeliy iz polimernykh materialov: ucheb. posobiye (2004). [Production of products from polymer materials: textbook allowance]. //Kryzhanivskii V.K. and others. SPb: Professiya, 464. [in Russian].
2. Suberlyak O.V., Bashtannyk P.I. (2006). *Technologia pererobky polimernykh ta kompozytsiynykh materialiv* [Polymer and composite materials processing technology] Kyiv, Vyshcha shkola, 376. [in Ukrainian].
3. Polimerni kompozytsiyni materialy v raketno-kosmichnyiye technitsi: pidruchnyk (2003) [Polymer composite materials in rocket and space technology: a textbook]. //Dzhur Ye.O. and others. Kyiv, Vyshcha shkola, 399. [in Ukrainian].
4. Sokolskiy O.L., Sivetskiy V.I., Mikulyonok I.O. (2014). *Proyektuvannya formuyuchykh prystroyiv obladnannya dla pererobky plastmas: ucheb. posobiye* [Design of forming devices for plastics processing equipment: textbook allowance]. Kyiv, NTU "KPI", 130. [in Ukrainian].
5. Basov N.I., Braginskiy V.A., Kazankov Yu.V. (1991). *Raschyot i konstruirovaniye formuyushchego instrumenta dla izgotovleniya izdeliy iz polimernykh materialov: uchebnik* [Calculation and construction of a forming tool for the manufacture of products from polymer materials: textbook] Moskva: Khimiya, 352. [in Russian].
6. Osnovy konstruirovaniya i raschyota detaley iz plastmassy i tekhnologicheskoy osnastki dla ikh izgotovleniya: ucheb. posobiye (1997). [Basics of design and calculation of plastic parts and technological equipment for their production: textbook allowance]. // Mirzoyev R.G. and others. L.: Mashinostroyeniye, 416. [in Russian].
7. Mikheyev M.A., Mikheyeva I.M. (1987). *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer] Moskva: „Energiya”, 352. [in Russian].
8. Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i paketno-kosmicheskoy tekhnike (1992). [Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology]. // Avduyevskiy V.S. and others. Moskva: Mashinostroyeniye, 528. [in Russian].
9. Obertyukh R.R. (2009). *Teoretychni osnovy teplotekhniki: navch. posibnyk* [Theoretical foundations of heat engineering: textbook allowance] Vinnitsya: UNIVERSUM- Vinnitsya, 165. [in Ukrainian].
10. Hilchuk A.V. (2017). *Teoria teploprovodnosti, ch. 1: navch. posibnyk* [Theory of heat conduction, part.1: textbook allowance]. Kyiv: vyd. KPI im. I.Sikorskogo. 86. [in Ukrainian].
11. *Encyklopedia fiziki i tekhniki. Grashofa chislo* [Encyclopedia of physics and technology. Grashof number]. URL: www.femto.com.ua/articles/part_1/0872.html [in Russian].
12. *Koeffitsiyenty teploprovodnosti osnovnykh stroitelnykh materialov* [Thermal conductivity coefficients of basic building materials]. https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Guide_Physics_Heat_And_Temperature/Heat_Conductivity/Heat_Conductivity_Building_Materials_Revised/ [in Russian].
13. *Koeffitsiyenty teploprovodnosti razlichnykh materialov* [Thermal conductivity coefficients of various materials]. URL: <http://www.xiron.ru/content/view/58/28/> [in Russian].
14. Shvets S.V., Syedinkin L.M. (2005). *Shtampy ta pres-formy, konstruyuvannya ta tekhnologia vyhotovlennya: navch. posibnyk* [Stamps and molds, design and manufacturing technology: textbook allowance]. Sumy: SumDU, 110. [in Ukrainian].
15. Pimenovskiy Yu.L., Hrudina T.V., Samokhina A.B. and others (1990). *Kompozitsionnyye materialy v mashinostroyenii* [Composite materials in mechanical engineering]. Kyiv: Tekhnika, 139. [in Russian].