

**Гриценко О.І.**, здобувач 1-го курсу магістратури, група ПМХм-25н-1  
**Науковий керівник: Козечко В.А.**, к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства

*(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м.Дніпро, Україна)*

### **ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ КОНФОРМНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ У ФОРМОТВОРЮЮЧІЙ ОСНАСТЦІ**

Ефективний термічний менеджмент є критичним фактором у процесі лиття під тиском (ЛПТ), оскільки фаза охолодження історично становить найбільшу частину загального часу циклу, варіюючись від 60% до 80%. Неоптимальне охолодження призводить до виникнення локальних перегрівів, відомих як «гарячі точки», які спричиняють нерівномірний розподіл температур і диференціальну усадку матеріалу. Цей дефект безпосередньо погіршує якість кінцевого виробу, збільшує відсоток браку та уповільнює виробничий процес. Традиційні методи виготовлення оснастки, що базуються на механічній обробці (свердління), дозволяють створювати лише прямі канали охолодження. Це обмежує розміщення каналів, не даючи можливості слідувати складним контурам формуючої поверхні. Як наслідок, виникають термічні вузькі місця, де тепло не може бути ефективно відведене. Неспроможність традиційних систем забезпечити цільовий термічний контроль в складних геометричних зонах є головною перешкодою для підвищення продуктивності та підтримання якості у високоточному ЛПТ. Конформне охолодження (КО) є технологічним рішенням, що дозволяє розміщувати канали охолодження на оптимальній, рівномірній відстані від формуючої поверхні, незалежно від складності її контуру. Це забезпечує повний термічний контроль поверхні форми. Адитивні технології (АТ), зокрема, метод селективного лазерного плавлення (SLM) або прямого лазерного спікання металів (DMLS), є єдиними виробничими процесами, здатними створювати ці складні, вигнуті внутрішні геометрії, які є неможливими для механічної обробки. Таким чином, АТ забезпечують технологічну свободу, необхідну для реалізації КО та подолання обмежень традиційного машинобудування.

Ключова перевага впровадження КО полягає у її прямому економічному та якісному впливі на процес лиття під тиском. Аналіз показує, що впровадження КО у прес-форми забезпечує скорочення загального часу циклу лиття у діапазоні від 10% до 40%. Таке скорочення, навіть незначне, у високооб'ємних виробництвах значно підвищує рентабельність та виробничу потужність. Проте, найвищі показники ефективності досягаються при застосуванні повної інженерної ланки, що включає топологічну оптимізацію геометрії каналів. Дослідження, що порівнювали традиційні канали з оптимізованими конформними, зафіксували екстремальні випадки, коли час циклу був скорочений на 62.43%. Головною якісною перевагою КО є забезпечення рівномірного тепловідведення, що є фундаментально важливим для досягнення розмірної стабільності. Рівномірна температура формуючої поверхні мінімізує диференціальну усадку та термічний дрейф, які є основними причинами викривлення. Як приклад, на литій деталі з полібутилентерефталату (PBT) з 30% скловолокна (GF) продемонстровано, що завдяки оптимізованому контурному охолодженню викривлення деталі було знижено в діапазоні 0.30 мм, що становить значне зменшення деформації – приблизно 82%.

Вибір технології та матеріалу є ключовим для забезпечення необхідної механічної стійкості оснастки. Для виробництва металевих вставок прес-форм найбільш поширеними є технології порошкового шарового синтезу (PBF): SLM (Selective Laser

Melting) та DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Технологія SLM передбачає повне плавлення металевого порошку високоенергетичним лазером, що створює зв'язану, щільну структуру. Це забезпечує високу кінцеву щільність (зазвичай понад 99.5%), що критично важливо для прес-форм, які функціонують під значним тиском. Інженери мають можливість компенсувати помірну теплопровідність матеріалу шляхом мінімізації відстані між каналом охолодження та формуючою поверхнею, що недоступно для традиційних методів.

Процес створення ефективної системи КО вимагає інтеграції цифрових інструментів. Проектування конформних систем вимагає застосування принципів DfAM. Використовуючи ітеративні алгоритми, інженерне програмне забезпечення оптимізує внутрішню геометрію каналів (подібно до проектування високоефективних теплообмінників) для максимальної передачі тепла, мінімізуючи при цьому вагу. Такий підхід дозволяє створювати 3D-дизайни, які радикально відрізняються від традиційних і є значно ефективнішими. Чисельне моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD) є необхідним етапом для верифікації теплового дизайну. CFD-аналіз (наприклад, із застосуванням програмного комплексу ANSYS) дозволяє точно моделювати теплообмін та гідравлічний опір у складних, вигнутих каналах. Цей аналіз дозволяє порівняти різні конфігурації (спіральні, змієподібні) та визначити оптимальні параметри потоку теплоносія. Успішне застосування КО вимагає створення віртуального «цифрового двійника» оснастки. Температурне поле, отримане в результаті CFD-аналізу прес-форми, інтегрується в програмне забезпечення для моделювання процесу ЛПТ (наприклад, Moldflow). Це дозволяє точно прогнозувати кінцеву якість деталі, включаючи усадку та викривлення. Оскільки складна внутрішня геометрія, створена за допомогою АТ, не піддається простим аналітичним розрахункам, чисельне моделювання є технологічною вимогою для мінімізації ризиків та досягнення пікової ефективності, наприклад, скорочення циклу на 60% і більше. Типовий результат порівняння термічних полів (традиційного та конформного охолодження) представлено на рисунку нижче.

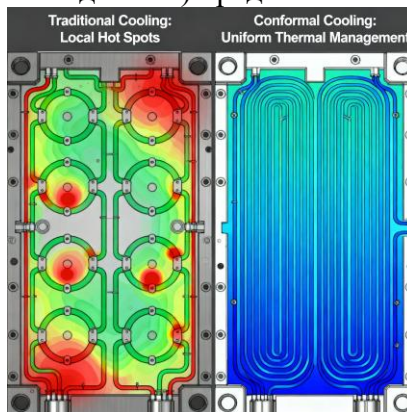


Рисунок 1 – Концептуальна різниця в розподілі температури: нерівномірне охолодження (традиційне) проти рівномірного охолодження (конформне) за результатами CFD-моделювання

#### Список використаних джерел

1. URL: <https://pti.tech/2025/08/14/how-conformal-cooling-in-injection-molds-is-improving-cycle-time-and-part-quality/>
2. URL: <https://ua.xslamps.com/news/3d-printing-optimizes-the-design-of-the-heat-e-50232638.html>