



Прийнято 11.11.2025. Прорецензовано 14.12.2025. Опубліковано 30.12.2025.

УДК 678.067:004.942

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-75-84

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА РОЗМІРНОЇ ТОЧНОСТІ ЛИТТЯ ТОНКОСТІННИХ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ CAE-МОДЕЛЮВАННЯ В MOLDEX3D

Яцков Б. В. *

студент

Хмельницький національний університет,
29016, Україна, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
<http://orcid.org/0009-0007-7983-5068>
e-mail: yatskov1905@gmail.com

Ткачук В. П.

Кандидат технічних наук, доцент
Хмельницький національний університет,
29016, Україна, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
<http://orcid.org/0000-0003-0640-2740>
e-mail: tkachukvi@khmnu.edu.ua

Милько В. В.

Кандидат технічних наук, доцент
Хмельницький національний університет,
29016, Україна, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
<http://orcid.org/0000-0002-1118-3530>,
e-mail: vlad.mylko@khmnu.edu.ua

Поліщук О. С.

Доктор технічних наук, професор
Хмельницький національний університет,
29016, Україна, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11,
<http://orcid.org/0000-0002-9764-8561>
e-mail: opolishchuk71@gmail.com

Анотація. Сучасне виробництво складної ливарного оснащення характеризується підвищеними вимогами до якості, розмірної точності та стабільності властивостей литих виробів, що зумовлює необхідність прогнозування їх поведінки ще на етапі проектування. Практика впровадження прес-форм у виробництво свідчить, що значна частина конструкцій потребує доопрацювання внаслідок складної взаємодії теплових, реологічних та усадкових процесів, які відбуваються під час лиття під тиском. У цьому контексті застосування CAD/CAE-систем для чисельного аналізу технологічних процесів є важливим інструментом підвищення

Запропоноване посилання: Яцков, Б. В., Ткачук, В. П., Мелько, В. В. & Поліщук, О. С. (2025). Підвищення якості та розмірної точності лиття тонкостінних полімерних деталей методом CAE-моделювання в Moldex3D. Науковий вісник ІФНТУНГ, 2(59), 75-84. doi: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-75-84

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

обґрунтованості конструкторсько-технологічних рішень та зменшення витрат на доведення оснастки. У статті представлено результати дослідження, присвяченого застосуванню програмного комплексу Moldex3D для аналізу та оптимізації процесу лиття під тиском тонкостінних полімерних деталей. Основну увагу зосереджено на вивченні впливу технологічних параметрів лиття та конструктивних особливостей прес-форми на формування виробів, їх якість і розмірну точність. Із використанням чисельного моделювання виконано аналіз процесів заповнення порожнини форми, допресовування та охолодження виливка з урахуванням їх впливу на виникнення деформацій, усадки та відхилень геометричних розмірів. На основі результатів моделювання визначено характерні зони концентрації дефектів, зокрема короблення та неповного заповнення, а також встановлено причини їх виникнення. За результатами серії чисельних експериментів обґрунтовано рекомендації щодо оптимізації режимів лиття під тиском і конструктивних рішень прес-форми, спрямовані на зменшення деформацій та забезпечення заданої розмірної точності виробів. Окрему увагу приділено питанням коректності застосування програмного забезпечення, зокрема впливу вибору методів моделювання, граничних і початкових умов розрахунку на достовірність кількісних результатів та їх якісну інтерпретацію. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні прес-форм для лиття під тиском тонкостінних полімерних деталей з підвищеними вимогами до якості та стабільності геометричних параметрів.

Ключові слова: лиття під тиском, тонкостінні полімерні деталі, розмірна точність, CAE-моделювання, Moldex3D, прес-форма, параметри лиття, усадка, короблення, оптимізація технологічного процесу.

Вступ

Виробництво тонкостінних деталей методом лиття під тиском супроводжується значними технологічними труднощами, пов'язаними з необхідністю забезпечення стабільного заповнення порожнини форми та мінімізації дефектів виливків. Традиційні експериментальні підходи часто виявляються трудомісткими, затратними та не завжди ефективними на етапах підготовки виробництва. У цьому контексті нагальною необхідністю виявляються методи, що дозволяють ще до запуску серійного виробництва оцінити та оптимізувати вплив параметрів лиття й конструкції прес-форми на якість виробу. Одним із сучасних інструментів вирішення цього завдання є системи комп'ютерного моделювання CAE (Computer Aided Engineering), які дають можливість віртуально аналізувати процеси заповнення, твердіння та охолодження, знижуючи ризик дефектів і скорочуючи час підготовки виробництва.

Серед провідних CAE-систем, які активно використовуються у дослідженнях та індустрії, виділяють:

Moldex3D — надає можливість моделювання тривимірного заповнення і охолодження, аналізу дефектів (наприклад, короблення, усадкові раковини тощо), а також оптимізації ливникової системи та схеми охолодження;

Autodesk Moldflow — широко застосовується для прогнозування дефектів, оцінки температурних полів форми, часу циклу, аналізу впливу технологічних параметрів;

ANSYS Polyflow — програмний комплекс для моделювання течії полімерів у складних тонкостінних структурах, що дає змогу аналізувати залишкові напруження та короблення.

Вищезазначені CAE системи дозволяють вирішувати складні практичні задачі виробництва, зокрема при отриманні тонкостінних деталей, що часто супроводжується низкою проблем, пов'язаних із специфікою виробу. Так, використання Autodesk Moldflow для оптимізації ливарних систем і технологічних параметрів тонкостінних виробів допомогло зменшити усадку на 11,7 % та точково скоротити відхилення форми до $<2\%$ [1].

Можливості таких CAE-систем, як **Moldex3D** та **Moldflow**, забезпечують високу точність аналізу дефектів і короблення. Вони дають змогу ефективно моделювати процеси охолодження, проектувати ливникові системи та проводити багатокритеріальну оптимізацію для мінімізації деформацій і підвищення якості готових виробів [2]. Ще одним успішним прикладом практичного застосування цих систем є оптимізація технологічних параметрів лиття, зокрема налаштування характеристик сопла та шнека. Моделювання процесів поведінки розплаву, заповнення й охолодження дає змогу мінімізувати розбіжність між результатами комп'ютерного аналізу та натурного експерименту [3].

Попри значні переваги, CAE моделювання має і суттєві обмеження.

Насамперед, це складність самого процесу моделювання. Для адекватного результату моделювання необхідно мати точні вхідні параметри процесу, такі як в'язкість, P-V-T криві, характеристики охолодження, теплопровідність форми та матеріалу тощо. По-друге, моделювання все одно потребує експериментального підтвердження, якого наразі не вдається уникнути, якими би натуралістичними не були моделюючі експерименти, оскільки симуля-

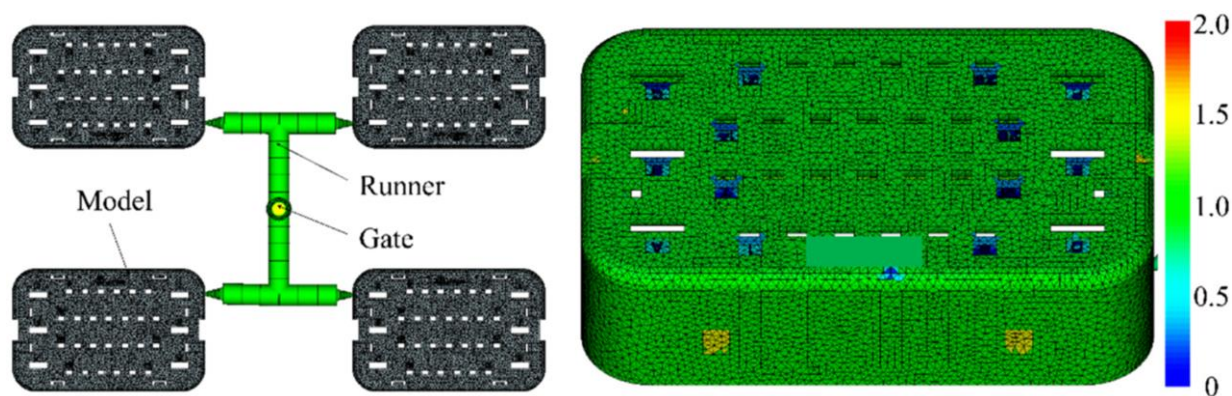


Рисунок 1 – Сітка моделі в «Autodesk Moldflow»

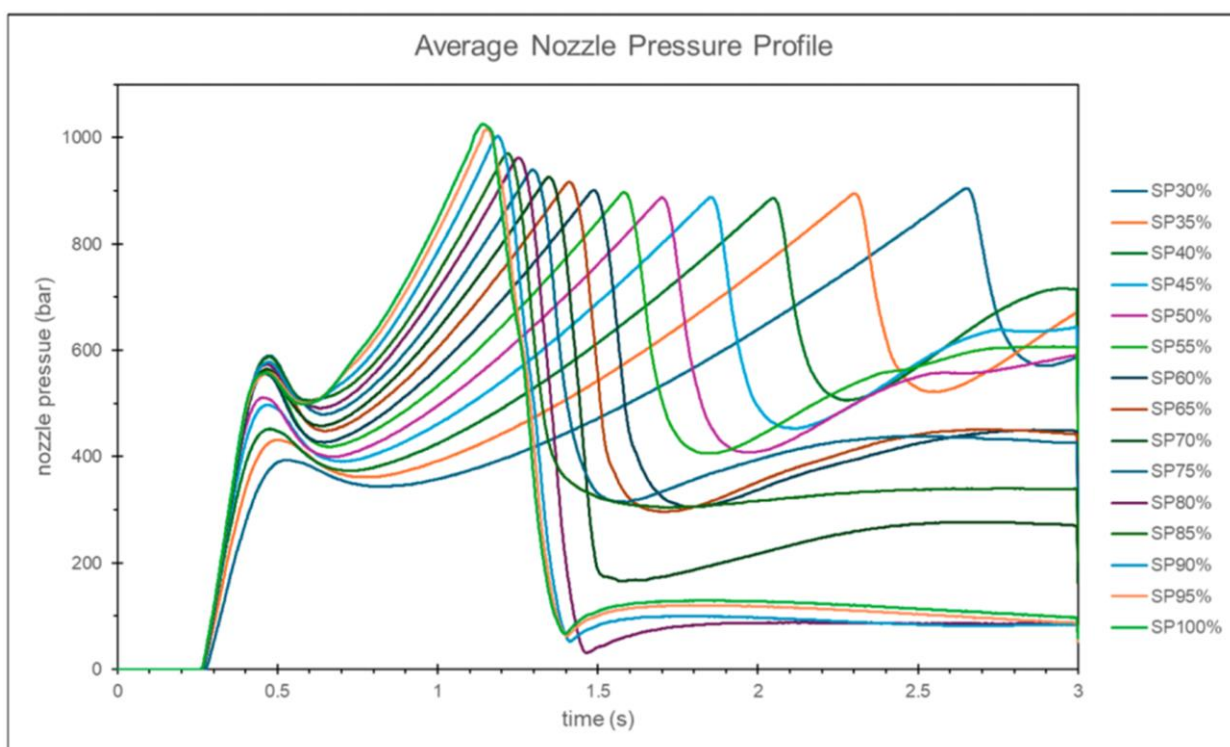


Рисунок 2 – Експериментальні криві тиску в соплі при різних швидкостях впорскування

ційні програми не завжди точно передбачають дефекти тонкостінних деталей. Складність лиття саме тонкостінних деталей, зокрема через швидке охолодження та високий температурний градієнт, обмежує точність моделювання таких структур. CAE-моделі не завжди здатні врахувати всі нюанси процесу, як-от нелінійні ефекти теплообміну чи мікродефекти структури. Крім того, таке моделювання є надто ресурсомістким, оскільки необхідні обчислювальні потужності зростають експоненціально з ускладненням розрахункової сітки та моделей.

Таким чином, поєднання моделювання та фізичного експерименту наразі залишається обов'язковим для досягнення якості виробів із тонкими стінками. Тому застосування

Moldex3D при моделюванні процесу лиття тонкостінної деталі із подальшою перевіркою результатів є актуальним та потребує дослідження.

Аналіз досліджень і публікацій

У сучасному машинобудуванні та виробництві полімерних компонентів особливу увагу приділяють тонкостінним виробам, що характеризуються малою товщиною стінок і високим співвідношенням довжини до товщини (L/t). Виготовлення таких виробів дає змогу знизити витрати матеріалу, зменшити масу деталей і скоротити цикл лиття. Водночас численні наукові дослідження свідчать, що технологія лиття під тиском тонкостінних деталей супроводжується складнощами у забезпеченні

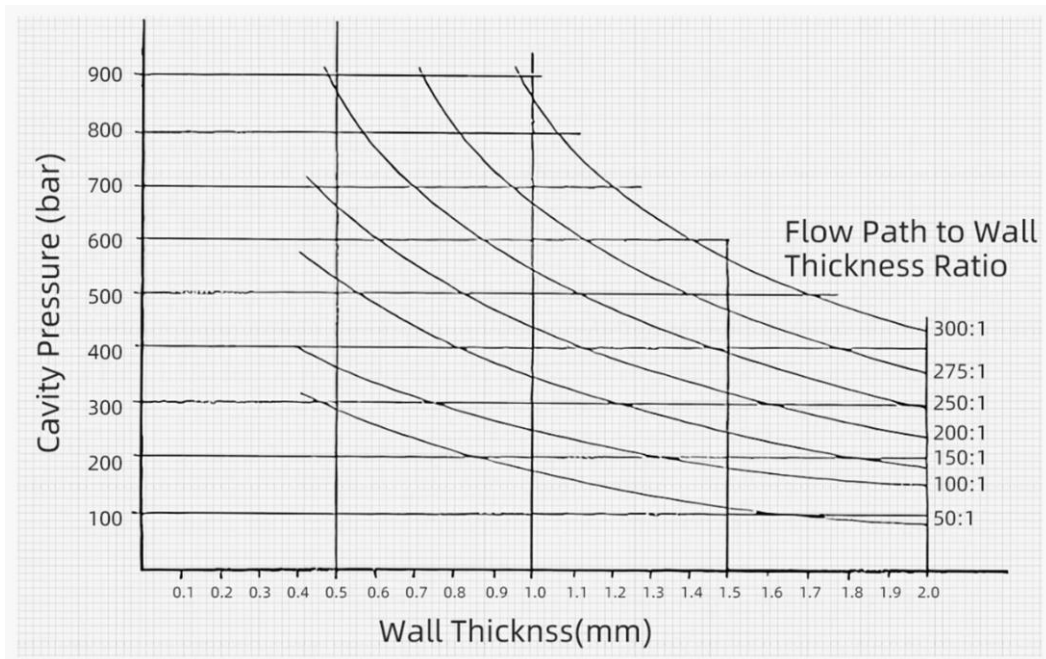


Рисунок 3 – Співвідношення між тиском у порожнині, товщиною стінки та коефіцієнтом товщини

стабільної якості. Це зумовлює необхідність удосконалення методів моделювання, контролю процесів та оптимізації параметрів лиття.

У роботі [1] розглянуто багатокритеріальний підхід до оптимізації процесу лиття під тиском тонкостінних з'єднувальних елементів із використанням інтегрованих алгоритмів оптимізації та CAE-моделювання. Автори зосередили увагу на одночасному зменшенні деформацій і підвищенні якості виробів, що дозволило встановити ефективність комплексного підходу до вибору технологічних параметрів лиття для тонкостінних деталей.

У дослідженні [2] подано систематизований огляд сучасних наукових робіт, присвячених литтю під тиском, з акцентом на використання конформних каналів охолодження, методів чисельного моделювання, сурогатних моделей та багатокритеріальної оптимізації. Показано, що саме поєднання CAE-аналізу з оптимізаційними алгоритмами є визначальним чинником зменшення дефектів, підвищення стабільності процесу та забезпечення розмірної точності, особливо у випадку тонкостінних виробів. Робота [3] присвячена науково обгрунтованому налаштуванню параметрів процесу лиття під тиском на основі аналізу тиску в соплі та положення шнека з використанням CAE-підходу. Автори довели, що контроль цих параметрів дозволяє підвищити повторюваність процесу формування та зменшити ймовірність виникнення дефектів, пов'язаних із нестабільністю заповнення порожнини форми.

Заповнення порожнини форми стає суттєво складнішим через високий опір потоку розплаву, швидке охолодження стінок і велику площу поверхні відведення тепла, що призводить до дефекту «неповного заповнення». Встановлено, що коефіцієнт заповнення у тонкостінному литві значною мірою залежить від конструктивних та технологічних параметрів, таких як товщина стінки деталі, розташування ливникової системи, швидкість упорскування розплаву, температура розплаву та форми, а також довжина та товщина ливникових каналів [4].

Тонкі стінки відливок підвищують ризик появи деформацій через нерівномірне охолодження і нестабільне твердіння. Як показано в дослідженні [5], найбільш значущим параметром впливу на короблення в тонкостінних деталях є температура форми.

Тонкостінність також стає причиною підвищеної вразливості виробів до залишкових напружень, неконтрольованої орієнтації волокон (у випадку композитних матеріалів), швів злиття та поверхневих дефектів. При товщині стінки 300-500 μm спостерігається ефект зволікання потоку і CAE моделювання за допомогою Moldex3D відтворює цей ефект з прийнятною точністю за часом фронту, але з розбіжностями у тисках [6].

При цьому точність симуляції значною мірою залежить від врахування геометрії сопла, впливу тиску на в'язкість та коефіцієнта теплообміну [7].

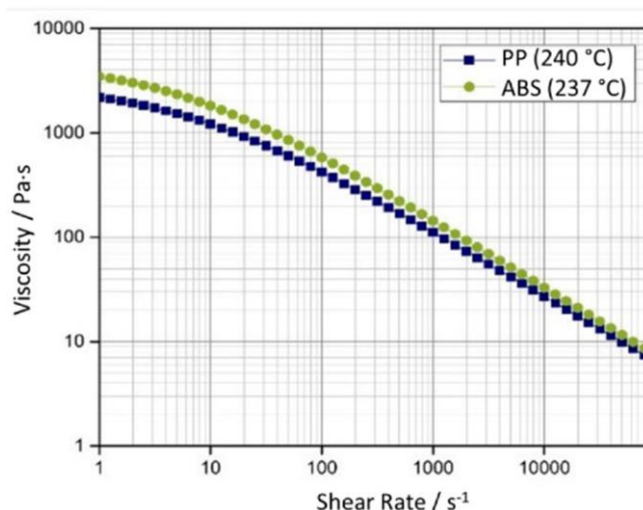


Рисунок 4 – В'язкість обраних матеріалів при температурі використовуваного сплаву

Отже, попри значний прогрес у технології лиття під тиском та математичному моделюванні, проблема забезпечення стабільної якості тонкостінних виробів залишається актуальною. До основних питань можна віднести:

- знаходження оптимального поєднання технологічних параметрів (швидкість упорскування, тиск впорскування, температура розплаву, температура форми);
- оптимізація конструкції ливарної/впорскувальної та охолоджувальної систем;
- калібрування моделей САЕ під конкретні матеріали й геометрії виробу;
- узгодження симуляції з реальним виробничим процесом та експериментальними даними.

Все це обґрунтовує необхідність подальших досліджень із застосуванням програмного забезпечення для тонкостінних деталей.

Аналіз наукових публікацій підтверджує доцільність комплексного застосування САЕ-моделювання, методів оптимізації та експериментальної валідації для підвищення якості виробів, зменшення деформацій і забезпечення заданої розмірної точності тонкостінних полімерних деталей, виготовлених методом лиття під тиском. Узагальнення наведених результатів визначає мету даної роботи, яка полягає у проведенні досліджень, спрямованих на вдосконалення конструкції прес-форми та режимів лиття з використанням програмного комплексу Moldex3D.

Виклад основного матеріалу

В процесі моделювання досліджувався вплив основних технологічних параметрів, таких як швидкість впорскування, тиск, температура розплаву та форми, час пакування та охо-

лодження, та аналізувався їх внесок у результуючі якісні характеристики отриманого виробу. Це дає можливість для подальшої оптимізації процесу лиття та обґрунтування рекомендацій щодо виробництва тонкостінних деталей.

Вигляд деталі представлено на рис. 5.

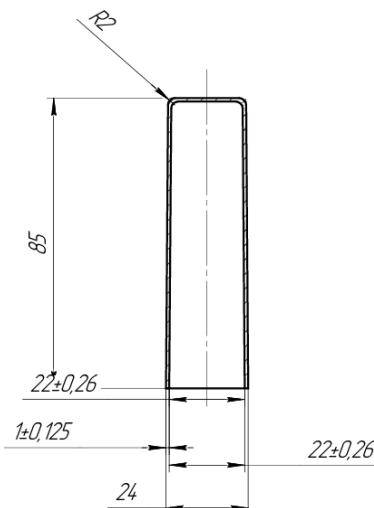


Рисунок 5 – Креслення деталі для експерименту

Матеріал виробу – PP Exxtral BMT 106. Властивості матеріалу наведено в таблиці 1. Конструкція деталі передбачає технологічні ухили для безперешкодного виймання виробу з пресформи.

Моделювання проводилося за допомогою програмного забезпечення Moldex3D.

Після завантаження 3D-моделі в програмне середовище призначають точку впуску розплаву. Її розташування на дні деталі є оптимальним з огляду на особливості її конфігурації. Наступним етапом є генерування розрахункової сітки та проектування системи охолодження.

Таблиця 1 – Механічні властивості PP Exxtral BMT 106

Тип:	PP (поліпропілен)
Назва марки:	Exxtral BMT 106
Виробник:	ExxonMobil
Матеріальні властивості:	Ізотропний чистий полімер
Модуль пружності:	$1,05 \cdot 10^{10}$ дін/см ² $\approx$ 1,05 ГПа.
Коефіцієнт Пуассона:	0,38
Коефіцієнт лінійного термічного розширення (CLTE):	$1,5 \cdot 10^{-4}$ 1/К

Було обрано стандартну двоканальну пряму систему охолодження, яка забезпечує рівномірний розподіл температурного поля та стабільне остигання виробу.

При симуляції процесу лиття ключовими параметрами є:

- час заповнення;
- температура розплавленого матеріалу;
- температура прес-форми;
- максимальне зусилля впорскування;
- час пакування;
- час охолодження.

Існуючий технологічний процес лиття передбачав час впорскування - 14 секунд та час пакування - 12 секунд. Фактичний процес заповнення тривав 18 секунд, що перевищує запланований час, що провокує виникнення дефекту деталі у вигляді порожнини. Отже, некоректно встановлений (у цьому випадку надмірний) час впорскування призводить до передчасного охолодження розплаву, що спричиняє недозаповнення форми та виникнення дефектів.

Щоб пересвідчитись у переважаючому впливі саме часу, а не температури чи тиску, було проведено моделювання із тиском впорскування 170 МПа та робочою температурою, близькою до максимально допустимої – 270 °С. Результати моделювання відображені на рис. 9.

Щоб запобігти утворенню порожнини, процес лиття було змодельовано при змінних параметрах часу. Найкращі результати були отримані за часу впорскування 5 с та часу пакування 4 с.

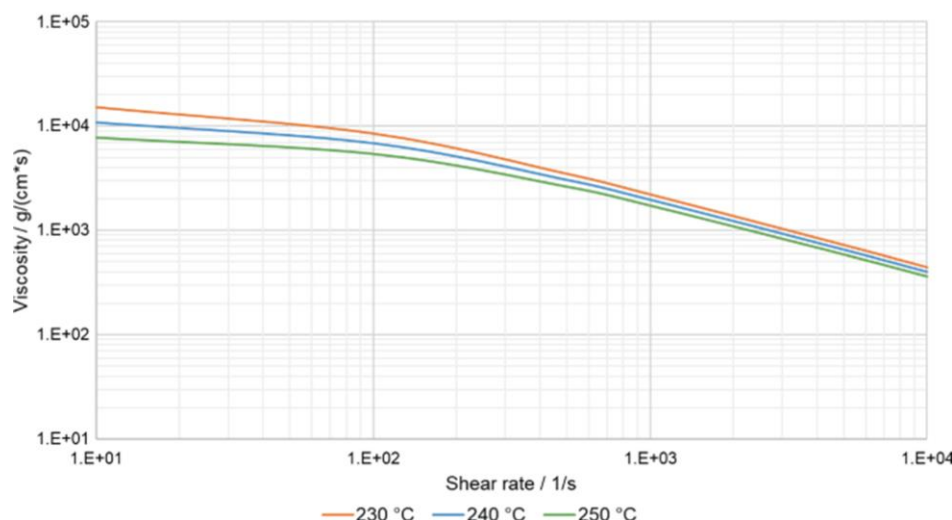
При таких параметрах виріб було сформовано без дефектів. Плавність процесу заливки представлено на рис. 10.

Аналіз кривої «Filling–Flow Rate» дає змогу виділити три основні ділянки, що відображають етапи заповнення порожнини форми.

1. Початкове різке зростання кривої. Пояснюється проходженням розплаву крізь вузький перехід від ливникової системи до порожнини форми та раптовою зміною ефективної площі потоку. Подібне явище спостерігається, наприклад, при переході з вузького впускного каналу в розширену зону форми. Крім того, короткочасне зростання швидкості може бути зумовлене інерційними характеристиками шнека або заданим профілем упорскування.

2. Горизонтальна ділянка. Відповідає періоду рівномірного заповнення стінок деталі, коли течія стабілізується і процес відбувається зі сталою швидкістю. Це свідчить про ламінарний характер потоку та відсутність значних змін у перерізі каналу заповнення.

3. Різкий спад наприкінці кривої. Відображає завершення заповнення основного об'єму або заповнення зон зі збільшеним опором (наприклад, дна чи внутрішніх ребер). У цей момент зростає протитиск у порожнині,

**Рисунок 6 – В'язкість матеріалу PP Exxtral BMT 106**

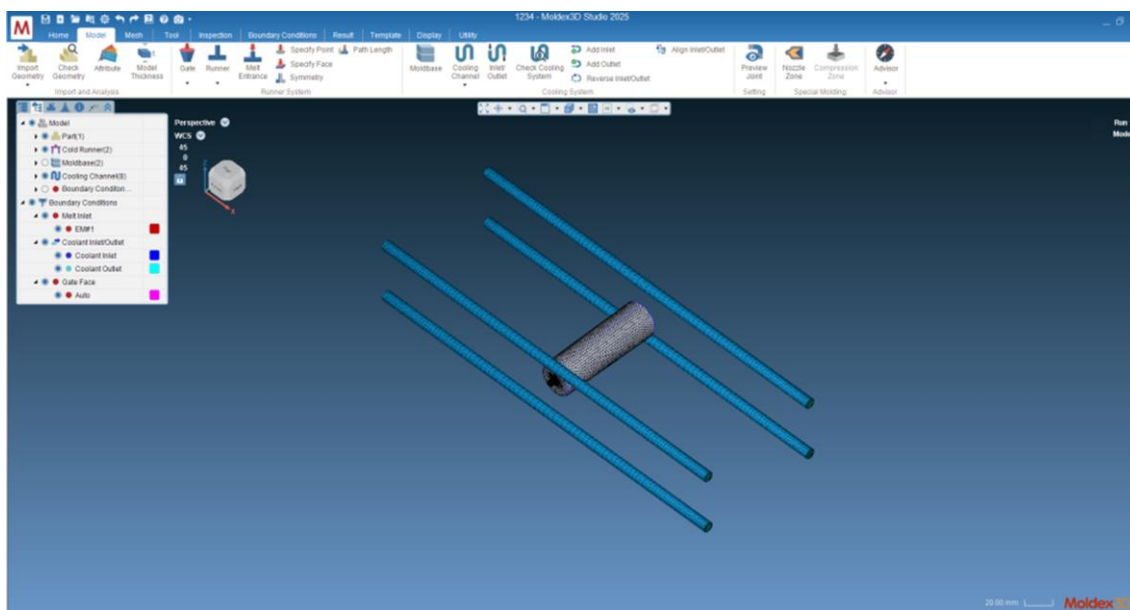


Рисунок 7 – Завантажена деталь у програму Moldex3D з обраною сіткою, точкою лиття та налаштованою системою охолодження

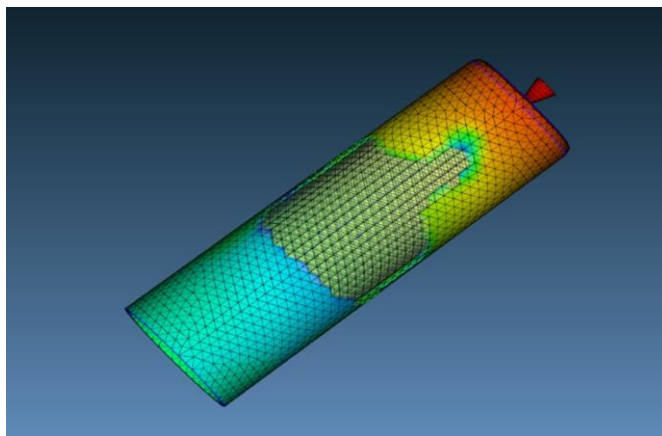


Рисунок 8 – Дефект при литті розплавленого пластику

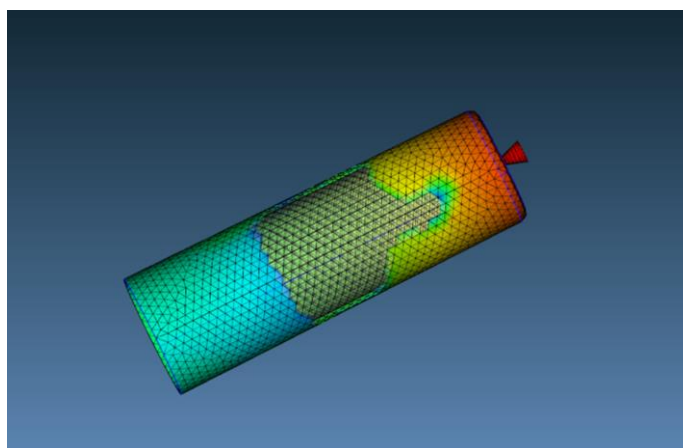


Рисунок 9 – Моделювання лиття при тиску впорскування 170 МПа та температурою 270 °С

що призводить до природного зниження швидкості потоку перед переходом до фази витримки під тиском. Схожа ситуація виникає також під час заповнення віддалених вставок або «тупикових зон» форми.

Крива «Filling–Sprue Pressure» (рис. 11) відображає зміну тиску розплаву у ливниковій системі протягом процесу заповнення форми і дозволяє оцінити рівномірність потоку, стабільність впорскування та опір течії.

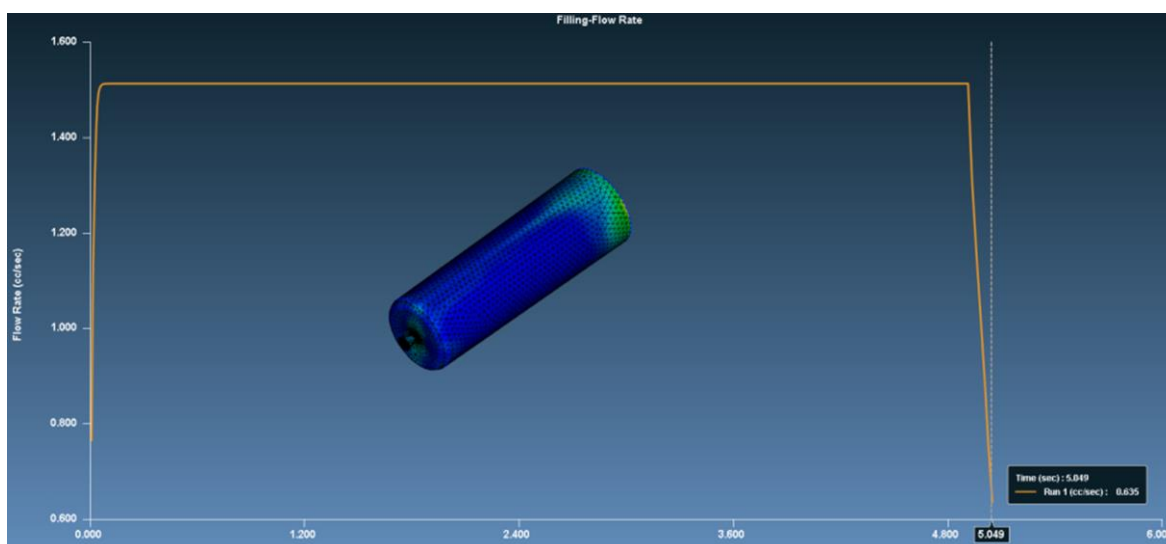


Рисунок 10 – Крива Filling-Flow Rate

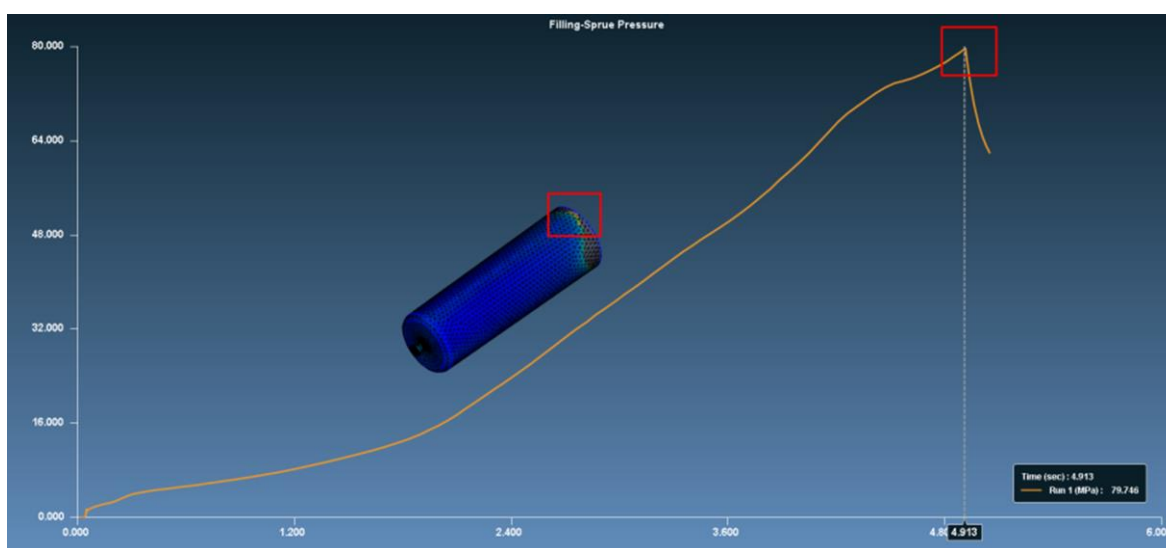


Рисунок 11 – Крива «Filling-Sprue Pressure»

На її початку спостерігається невеликий імпульсний стрибок тиску, що пояснюється особливостями геометрії ливникового вузла або дна деталі, коли розплав уперше проходить вузьку ділянку або змінює напрям руху.

У середній частині крива демонструє плавне збільшення тиску, що свідчить про стабільне рівномірне заповнення стінок та поступове подолання опору течії.

Наприкінці процесу, після досягнення максимального значення близько 80 МПа (при допустимому 140 МПа), тиск знижується через завершальне заповнення порожнини та зменшення опору потоку. Така поведінка свідчить про відсутність перевантаження форми чи нестабільності процесу.

Схожі результати наведені в дослідженні [8], де при заповненні форми велосипедного сидіння спостерігалася більша нерівномірність тиску через отвори та складну геометрію деталі.

Висновки

У цьому дослідженні показано, що аналіз тиску всередині порожнини форми є ефективним інструментом для контролю процесу лиття під тиском та виявлення можливих відхилень. Значення тиску отримували у ході моделювання, враховуючи вплив ключових технологічних параметрів (швидкості впорскування, тиску та температури розплаву) на кінцеву якість виробу.

Було розроблено методику оцінки тиску під час заповнення порожнини та визначено його взаємозв'язок із поведінкою полімерного розплаву. Особливу увагу приділено аналізу тиску на етапі переходу від заповнення до ущільнення та початковій частині кривої, що дозволяє детальніше дослідити динаміку заповнення та її вплив на якість готової деталі.

Результати свідчать, що зміни тиску в порожнині відображають не лише дефекти технологічного процесу, але й потенційні конс-

структивні проблеми прес-форми, такі як неефективна система вентиляції, зношення каналів або нерівномірне охолодження. Це підтверджує актуальність проблеми точного прогнозування та контролю параметрів лиття, адже існуючі методи часто не гарантують стабільної якості або потребують складного та високоавартисного обладнання для вимірювання тиску.

Хоча моделювання не завжди повністю відтворює поведінку матеріалу через спрощення геометрії та відсутність урахування зносу форми, результати підтвердили ефективність

використання Moldex3D для прогнозування поведінки розплаву, оптимізації конструкції прес-форми та своєчасного виявлення можливих дефектів.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. Peng, S., Tan, M., Zhang, D., & Li, M. (2025). Multi-objective optimization of thin-walled connectors in injection molding process based on integrated algorithms. *Materials*, 18(9), 1991. <https://doi.org/10.3390/ma18091991>
2. Gaspar-Cunha, A., Melo, J., Marques, T., & Pontes, A. (2025). A review on injection molding: Conformal cooling channels, modelling, surrogate models and multi-objective optimization. *Polymers*, 17(7), 919. <https://doi.org/10.3390/polym17070919>
3. Tseng, R.-H., Wen, C.-H., Chang, C.-H., Chen, Y.-H., Tsai, C.-H., & Hwang, S.-J. (2025). Nozzle pressure- and screw position-based CAE scientific process parameter setup for injection molding process. *Polymers*, 17(2), 198. <https://doi.org/10.3390/polym17020198>
4. Nguyen, H. (2023). Optimization of plastic filling's ratio into thin wall injection molded part. *The Journal of Technical Education Science*, 4(76), 84–91. <https://doi.org/10.54644/jte.76.2023.1286>
5. Demirci, U., & Altan, M. (2020). Warpage analysis of injection molded thin-walled chassis part by RSM and FEM. *Journal of Advances in Manufacturing Engineering*, 1(2), 63–70. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jame/article/1011988>
6. Regi, F., Guerrier, P., Zhang, Y., & Tosello, G. (2020). Experimental characterization and simulation of thermoplastic polymer flow hesitation in thin-wall injection molding using direct in-mold visualization technique. *Micromachines*, 11(4), 428. <https://doi.org/10.3390/mi11040428>
7. Islam, A., Li, X., & Wirska, M. (2019). Injection moulding simulation and validation of thin wall components for precision applications. In B. Gapiński, M. Szostak, & V. Ivanov (Eds.), *Advances in Manufacturing II* (Vol. 4, pp. 96–107). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16943-5_9
8. Araújo, C., Pereira, D., Dias, D., et al. (2023). In-cavity pressure measurements for failure diagnosis in the injection moulding process and correlation with numerical simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126, 291–300. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11100-1>

IMPROVING THE QUALITY AND DIMENSIONAL ACCURACY OF THIN-WALLED POLYMER PARTS BY CAE SIMULATION IN MOLDEX3D

Yatskov B. V.

Student

Khmelnytskyi National University

29016, Ukraine, Khmelnytskyi, Instytutska Street, 11

<http://orcid.org/0009-0007-7983-5068>

e-mail: yatskov1905@gmail.com

Tkachuk V. P.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Khmelnytskyi National University

29016, Ukraine, Khmelnytskyi, Instytutska Street, 11

<http://orcid.org/0000-0003-0640-2740>

e-mail: tkachukvi@khnmu.edu.ua

Mylko V. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Khmelnytskyi National University

29016, Ukraine, Khmelnytskyi, Instytutska Street, 11

<http://orcid.org/0000-0002-1118-3530>,

e-mail: vlad.mylko@khnmu.edu.ua

Polishchuk O. S.

Doctor of Technical Sciences, Professor

Khmelnytskyi National University

29016, Ukraine, Khmelnytskyi, Instytutska Street, 11

<http://orcid.org/0000-0002-9764-8561>

e-mail: opolishchuk71@gmail.com

Abstract. Modern manufacturing of complex injection molds is characterized by increased demands for quality, dimensional accuracy, and stability of cast product properties. This necessitates predicting their behavior as early as the design stage. Practice shows that a significant portion of mold designs require refinement due to the complex interaction of thermal, rheological, and shrinkage processes occurring during injection molding. In this context, the application of CAD/CAE systems for numerical analysis of technological processes is a crucial tool for enhancing the validity of design and engineering solutions and reducing mold debugging costs. This article presents the results of a study on the application of the Moldex3D software suite for the analysis and optimization of the injection molding process for thin-walled polymer parts. The primary focus is on investigating the influence of injection molding parameters and mold design features on part formation, quality, and dimensional accuracy. Numerical modeling was used to analyze mold filling, packing, and part cooling processes, considering their impact on warpage, shrinkage, and geometric deviations. Based on the simulation results, characteristic zones of defect concentration, such as warpage and short shots, were identified, and their causes were determined. A series of numerical experiments provided the basis for recommendations on optimizing injection molding parameters and mold design solutions aimed at reducing deformations and ensuring specified dimensional accuracy of the parts. Particular attention was paid to the correct application of the software, specifically the influence of simulation method selection, boundary, and initial conditions on the reliability of quantitative results and their qualitative interpretation. The obtained results can be used in the design and refinement of injection molds for thin-walled polymer parts with high requirements for quality and stability of geometric parameters.

Keywords: injection molding, thin-walled polymer parts, dimensional accuracy, CAE simulation, Moldex3D, mold, injection molding parameters, shrinkage, warpage, process optimization.