

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Орендарчук Юлія Володимирівна

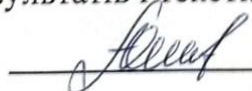
УДК 669.056

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО  
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ВІДЛИВОК  
ПОРШНІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ  
136 «Металургія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Ю.В. Орендарчук

Науковий керівник: **Акімов Олег Вікторович**  
доктор технічних наук, професор

*Ідентичність за змістом  
з іншими примірниками  
дисертації засвідчую*

*Вчений секретар УНТУ "ХНУ"  
проф. Заковороний О.Ю.*



Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Орендарчук Ю. В.* Наукові методи комп'ютерно-інтегрованого проектування технологій виготовлення відливок поршнів внутрішнього згоряння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – Металургія. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2021.

Дисертанткою вирішена науково-практична задача обґрунтування і створення технології комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів дизельних двигунів з комплексним застосуванням моделювання теплових, гідродинамічних параметрів лиття та урахуванням впливу технологічних параметрів лиття на розміри газоусадочних дефектів. Вирішення цього завдання дає можливість підняти технічний рівень, і скоротити час проектування, а також знизити витрати на виробництво двигунів.

Результати аналізування причин виникнення деформацій свідчать, що створення на етапі проектування оптимальної за розмірами й конфігурацією технологічної конструкції дозволяє знизити ймовірність появи в ній дефектів у процесі виготовлення та експлуатації. Доведено, що системний підхід до розробки конструкції поршня, як елемента циліндро-поршневої групи і двигуна в цілому, дозволяє визначати оптимальні комбінації матеріалів, технологічних прийомів і конструктивних рішень. Встановлено, що базовим показником може бути питома або відносна металоємність, віднесена до одиниці потужності машини або механізму, досягнутому рівню для даного класу деталі або еталону.

Аналізування існуючих способів лиття дозволило встановити, що: лиття в кокіль є найбільш простим технологічним процесом, котрий дозволяє використовувати поршневі сплави з низьким коефіцієнтом лінійного розширення та отримувати вилівки складної конфігурації; заготовки, котрі отримані гарячим штампуванням сплавів, що деформуються, відрізняються високою якістю, але подібні сплави у порівнянні з ливарними мають на 15...20 %

вищі значення коефіцієнта лінійного розширення, а коефіцієнт використання металу при гарячому штампуванні ще менший, ніж при литті в кокіль, оскільки метал йде у відходи ковальського виробництва; рідке штампування поршнів є кращим за наведені вище способи тому, що поєднує їхні переваги та використовується для виробництва поршнів, до яких пред'являються особливі вимоги щодо міцності.

Доведено, що для ефективного управління якістю виливків необхідні кількісні критерії для їхнього оцінювання. Встановлено, що існує пряма залежність якості виливки від її точності, чистоти поверхні та рівня механічних властивостей, і зворотна, від частоти новоутворень в ній ливарних дефектів, що правильно відображає взаємозв'язок якості виливки з її основними параметрами. Доведено, що підвищення якості виливки тісно пов'язане з вирішенням одного з головних завдань – зниженням її металоємності, при цьому для зниження маси литої виливки необхідно мати такі функціональні характеристики, як: надійність, довговічність, гарантований рівень несучої здатності, тощо.

Акцентовано, що існуючі методи чисельного моделювання, з використанням фізичних моделей ливарних процесів, які відбуваються в результаті охолодження виливка у формі, є трудомісткими, при цьому варіювання різними технологічними параметрами є практично неможливим. Зазначено, що, згідно з вимогами до конструкторсько-технологічного проектування, для створення універсальної технології спільного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів ДВЗ використовуються спеціалізовані ІКС.

На основі порівняльних рекомендацій щодо застосування прикладних інтегрованих комп'ютерних систем, призначених для моделювання процесів лиття та розрахунку теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ встановлено, що:

– для моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ обраний пакет прикладних програм комп'ютерного моделювання LVMFlow через кінцево-різницеві алгоритми розрахунку, що забезпечують стабільну роботу

розрахункової станції при відносно малому споживанні її апаратних ресурсів, зручності інтерфейсу, швидкості розрахунків і малої вартості пакета програм;

– застосування кінцево-різницевих чисельних моделей вимагає точного призначення початкових і граничних умов, а також створення звичайно розносної мережі;

– для інженерного моделювання теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ обраний комплекс ANSYS, що має високу взаємодію з існуючими CAD і CAE системами, що, у свою чергу, має повну взаємодію з Workbench Products і класичним ANSYS, а також досить велику кількість математичних рішень, що дозволяють швидко та якісно проводити розрахунки в Workbench Products.

Підсумком виконаного дослідження стало створення тривимірної моделі виливки з нанесеними на неї елементами ливниково-живильної системи. За результатами створення 3D-моделі виливки поршня Д 240-1004021 встановлено, що: тривимірне зображення складної проектованої деталі, значно полегшило сприйняття та спростило процес розроблення ливарної технології, це обумовлено тим, що добре видно особливості конструкції, термічні вузли тощо; за умови зменшення коефіцієнта габаритності виливок став більш технологічним; правильний вибір положення виливка у формі та роз'єму кокілю дозволив підвищити якість виливків і знизити трудомісткість їх виготовлення, а також збільшити стійкість кокілів; у процесі лиття поршнів доцільно використовувати бічні системи зі щільними живильниками, а також підводити знизу через кільцеві живильники, що забезпечує плавну заливку порожнини форми; існуючі раніше ливникові системи працюють неефективно тому, що конструктивне розташування традиційної ливникової системи відносно виливки перешкоджає створенню спрямованої кристалізації в литві; удосконалена ливникова система забезпечила плавність потоку і послідовність заповнення завдяки більш плавним переходам від одного елемента до іншого та відсутнього конструктивного елемента «колектор».

Доведено, що верхні системи забезпечують найбільш високу стійкість кокілів. Крім того, такі системи дуже економічні. Разом з тим, подібні системи не поступаються нижнім (сифонним) щодо зменшення у виливках неметалевих включень. Наголошено, що тривимірна модель виливка з нанесеними на неї елементами ливниково-живильної системи в подальшому буде використана для моделювання процесів, котрі протікають у ливарній формі під час її заливання та охолодження металу.

Акцентовано, що створена кінцево-різницева модель виливка поршня й технологічної оснастки, а також виконано інженерне моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ в ІКС LVMFlow. Моделювання охолодженої виливки показало, що правильний вибір положення виливка у формі створить сприятливі умови для спрямованої кристалізації. Констатовано, що аналізування динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру.

Встановлено, що невід'ємною частиною системного підходу до технології комп'ютерно-інтегрованого проектування є метод визначення місць розташування та розмірів дефектів у литому поршні двигуна із запалюванням палива від стиснення, для розроблення цього методу було: визначено, що найбільш ефективним методом прогнозування мікропористості вважається пряме моделювання процесу утворення пор під час твердіння на основі використання рівняння Дарсі, проте, необхідні для цього математичні моделі є недостатньо точними і потребують удосконалення; з'ясовано, що утворення газоусадочних дефектів відповідає моделі, котра заснована на теорії перколяції; визначені початкові і граничні умови для моделювання. Для встановлення місць розташування газоусадочних дефектів використаний критерій Niyaма, що показує напрямок руху кристалізації; аналізування результатів моделювання місць розташування дефектів показало, що найбільш схильними до усадочним явищ є: масиви бобишки під пальцевим отвором; днище поршня під камерою згоряння; область переходу від корпусу поршня до днища.

З метою уточнення розмірів і місць утворення газоусадочних дефектів в умовах виробництва для дослідної партії поршнів Д 240-1004021 дозволили встановити місця утворення і розміри газоусадочних дефектів ( $\varnothing$  0,3-1,3 мм), також були проведені експериментальні дослідження функціональності та визначення ресурсу поршнів Д 240-1004021. Для оцінювання впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадочних дефектів у місцях їх розташування було розроблено та реалізовано чисельний експеримент з використанням результатів моделювання в LVMFlow. Проведені дослідження показали, що найбільший інтерес під час вивчення процесу спрямованого твердіння мають: товщина шару вогнетривкого покриття, теплопровідність покриття, товщина стінки кокілю і початкова температура кокілю.

Здійснено математичне моделювання в результаті якого було встановлено залежність розмірів газоусадочних дефектів від технологічних параметрів лиття. Виявлені залежності дають можливість регулювати розміри газоусадочних дефектів (в допустимих технічними вимогами межах) зміною технологічних параметрів лиття. Зауважено, що в цілому випробування на моторному стенді показали, що під час досить жорстких умов навантажень на поршні Д 240-1004021 з газоусадочними дефектами вони зберігають працездатність. Констатовано, що розроблена технологія комп'ютерно-інтегрованого проектування була апробована.

**Ключові слова:** поршень дизельного двигуна, лиття, кокіль, виливки, газоусадочні дефекти, деформація, комп'ютерно-інтегроване моделювання, критерії.

## ABSTRACT

*Orendarchuk Yu.V.* Scientific methods of computer-integrated design of technologies for the manufacture of internal combustion piston castings. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of PhD in the specialty 136 – Metallurgy. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv, 2021.

The dissertation solved the scientific and practical problem of substantiation and creation of technology of computer-integrated design (CID) of pistons of diesel engines with complex application of modeling of thermal, hydrodynamic parameters of casting and taking into account influence of technological parameters of casting on sizes of gas-shrinkage defects. Solving this problem makes it possible to raise the technical level, and reduce design time, as well as reduce costs for engine production.

The results of the analysis of the causes of deformations show that the creation at the design stage of the optimal size and configuration of the technological structure can reduce the likelihood of defects in the process of manufacture and operation. It is proved that the systematic approach to the development of the piston design, as an element of the cylinder-piston group and the engine as a whole, allows to determine the optimal combinations of materials, techniques and design solutions. It is established that the basic indicator can be the specific or relative metal content, attributed to the unit of power of the machine or mechanism, the level reached for this class of part or standard.

Analysis of existing casting methods revealed that: die-casting is the simplest technological process that allows the use of piston alloys with a low coefficient of linear expansion and to obtain castings of complex configuration; blanks obtained by hot stamping of deformable alloys are of high quality. But similar alloys in comparison with foundries have 15...20% higher values of the coefficient of linear expansion, and the coefficient of use of metal in hot stamping is even lower than in die casting, as the metal goes to the waste of blacksmithing. Liquid stamping of pistons is better than the above methods because it combines their advantages and is used for the production of pistons that have special strength requirements.

It is proved that quantitative criteria for their evaluation are necessary for effective quality management of castings. It was found that there is a direct dependence of the quality of the casting on its accuracy, surface cleanliness and level of mechanical properties, and vice versa, on the frequency of casting defects, which correctly reflects the relationship between casting quality and its main parameters. It is proved that improving the quality of the casting is closely related to solving one of the main tasks – reducing its metal content, while to reduce the weight of the cast casting must have such functional characteristics as reliability, durability, guaranteed load-bearing capacity, etc.

It is emphasized that the existing methods of numerical modeling, using physical models of foundry processes that occur because of cooling the casting in the mold, are time consuming, while varying the various technological parameters is almost impossible. It is noted that, in accordance with the requirements for design and technological design, specialized CID is used to create a universal technology for joint computer-integrated design of internal combustion engine (ICE) pistons.

Based on comparative recommendations for the use of applied integrated computer systems designed to model the casting processes and calculate the thermal and stress-strain state of the cast pistons of the internal combustion engine, it is established that:

- LVMFlow package of computer simulation application programs through finite-difference calculation algorithms is selected for modeling of ICE piston casting processes;

- the use of finite-difference numerical models requires the precise assignment of initial and boundary conditions, as well as the creation of a commonly distributed network;

- for engineering modeling of thermal and stress-strain state of cast pistons of internal combustion engines the ANSYS complex is selected, which has high interaction with existing CAD and CAE systems, which, in turn, has full interaction with Workbench Products and classic ANSYS, as well as a large number of



mathematical solutions that allow you to quickly and efficiently perform calculations in Workbench Products.

The result of the study was the creation of a three-dimensional model of the casting with elements of the foundry-feeding system applied to it. According to the results of creating a 3D model of the piston casting D 240-1004021 was found that the three-dimensional image of a complex designed part, greatly facilitated the perception and simplified the process of developing foundry technology. This is due to the fact that you can clearly see the design features, thermal units, etc., with the reduction of the dimensional coefficient of castings became more technological; the correct choice of the position of the casting in the form and connector of the mold allowed to improve the quality of castings and reduce the complexity of their manufacture. A also increase the stability of the molds; in the process of casting pistons, it is advisable to use side systems with slot feeders. Also, bring from below through ring feeders that provides smooth filling of a cavity of the form; Pre-existing casting systems work inefficiently because the constructive location of the traditional casting system relative to the casting prevents the creation of directional crystallization in the casting. The improved gutter system ensured smooth flow and filling sequence due to smoother transitions from one element to another and the absence of a structural element "collector".

It is proved that the upper systems provide the highest stability of the molds. In addition, such systems are very economical. However, such systems are not inferior to the lower (siphon) in terms of reduction in castings of non-metallic inclusions. It is emphasized that the three-dimensional model of the casting with the elements of the foundry-feeding system applied to it will be used in the future to model the processes that take place in the foundry form during its pouring and cooling of the metal.

It is emphasized that the final-difference model of casting of the piston and technological equipment is created, and engineering modeling of processes of casting of pistons of ICE in CID LVMFlow is executed. Modeling of the cooled casting showed that the correct choice of the casting position in the mold would create favorable conditions for directional crystallization. It is stated that the analysis of the dynamics of cooling of the casting, phase transition, the connection of the zones that

crystallize in the last turn, allowed determining the places of possible occurrence of defects of gas-shrinkage nature.

It is established that an integral part of the system approach to computer-integrated design technology is the method of determining the location and size of defects in the cast piston of the engine with fuel ignition from compression. To develop this method was determined that the most effective method direct modeling of the process of pore formation during curing based on the use of Darcy's equation, however, the necessary mathematical models are not accurate enough and need to be improved. It was found that the formation of gas-shrinkage defects corresponds to the model based on the theory of percolation; initial and boundary conditions for modeling are defined. The Niyama criterion, which shows the direction of crystallization, was used to determine the location of gas-shrinkage defects. Analysis of the results of modeling the location of defects showed that the most prone to shrinkage are arrays of bosses under the finger hole; the bottom of the piston under the combustion chamber, the transition area from the piston body to the bottom.

For the purpose of specification of the sizes and places of formation of gas-shrinkage defects in the conditions of production for experimental batch of pistons D 240-1004021 allowed establishing the location and size of gas-shrinkage defects ( $\emptyset$  0.3-1.3 mm) experimental studies of the functionality and resource determination of pistons D 240-1004021 were also performed. To assess the impact of technological factors of casting on the size of gas-shrinkage defects in their locations, a numerical experiment was developed and implemented using the results of modeling in LVMFlow. Studies have shown that the most interesting when studying the process of directional curing are the thickness of the layer of refractory coating, the thermal conductivity of the coating, the wall thickness of the mold and the initial temperature of the mold.

Mathematical modeling was performed, because of which the dependence of the size of gas-shrinkage defects on the technological parameters of casting was established. The identified dependences make it possible to adjust the size of gas-shrinkage defects (within the limits allowed by technical requirements) by changing

the technological parameters of casting. It is noted that in general tests on the motor stand showed that during rather severe conditions of loadings on the piston D 240-1004021 with gas-shrinkage defects, they remain operational. It was stated that the developed technology of computer-integrated design was tested.

**Keywords:** diesel engine piston, casting, chill mold, castings, shrinkage defects, deformation, computer-integrated modeling, criteria.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Computer-Integrated Design Pistons with the Influence of Casting Defects./ О.В. Акімов, Ю.В. Орендарчук (Ю.В. Рябець) В.І. Альохін, К.О. Костик, Л.О. Салтиков / *DSMIE 2020: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III pp 13 –22. С. 13 – 21.*
2. Применение жидкостекольных смесей с пониженным содержанием жидкого стекла как фактор повышения качества отливок машиностроительного назначения /Ю. В. Орендарчук, П.С. Зинченко, М.П. Аксененко, А. В. Йовбак/ *Scientific Journal «ScienceRise». Харків, 2016. № 5/2(22)2016. С.6 – 9.*
3. Оптимізація складу формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей двигунів внутрішнього згорання. /Ю.В. Орендарчук, А.О. Красноухова, І. О. Ачкасов, А.С. Барсук, В.І. Головка/ *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків : НТУ "ХПІ", 2016. № 50 (1222). С. 117–121.*
4. Development of a system for organizing a modular design and technological preparation for the production of cast iron pistons for internal combustion engines /A.A. Puliaiev, J.V. Orendarchuk, O.V. Akimov, P.S. Penziev, D.V. Marynenko, A.P. Marchenko/ *Technology audit and production reserves. 2017. № 3(1). С. 23–27.*
5. Мониторинг качества отливок для использования в системах автоматизированного проектирования технологий литейного производства /Ю.В. Орендарчук, Д.В. Мариненко, С.В. Борисенко, І.О. Лоек, В.С. Ананьин/ *Scientific Journal «ScienceRise». 2017. № 4. С. 48–52.*
6. Орендарчук Ю.В. Аналіз питання, та взаємодія схем діагностування двигунів методами нерозбірного контролю. /С.Ю. Білик, Ю.В. Орендарчук (Ю.В. Рябець), О.Л. Сінческул/ *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». MicroCAD-2020; С. 182.*

7. Орендарчук Ю.В. Моделювання технологічних процесів лиття ДВЗ. / О.В. Акімов, Ю.В. Орендарчук, Глушко А.В./ *Міжнародні конференції : Литво: Металургія. Запорізька торгово-промислова палата, 2020; С. 20–21.*

8. Орендарчук Ю.В. Дослідження механізму утворення газоусадкових дефектів в литих поршнях ДВЗ з використанням комп'ютерно–інтегрованих систем моделювання. / О.В. Акімов, Ю.В. Орендарчук, Л.С. Золотар, Г. Г. Ідріс/ *Міжнародні конференції : Литве: Металургія. - Запорізька торгово-промислова палата, 2018; С. 99.*

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	17
ВСТУП .....	18
Розділ 1. Аналізування існуючих способів проектування технології та виготовлення литих поршнів.....	23
1.1 Вимоги, що пред'являються до литих поршнів.....	23
1.2 Способи виготовлення поршнів.....	27
1.3 Види дефектів литих поршнів і показники їх якості.....	38
1.4 Сучасні тенденції проектування технології лиття поршнів.....	42
1.5 Комп'ютерно-інтегровані системи аналізу теплового, напружено-деформованого стану та моделювання процесів лиття поршнів двигунів внутрішнього згорання.....	45
Висновки до розділу 1.....	49
Розділ 2. Методика створення 3D-моделі виливки поршня.....	53
2.1 Розробка конструкції виливки поршня .....	53
2.2 Вибір положення виливка у формі.....	55
2.3 Розробка ливниково-живильної системи.....	57
2.3.1 Розрахунок елементів ливникової системи.....	60
2.3.2 Конструктивний розрахунок модернізованої ливникової системи.....	63
2.3.3 Визначення розмірів живильних елементів.....	65
2.4 Проектування вентиляційних систем.....	67
2.4.1 Обґрунтування схеми вентиляційної системи.....	67
2.4.2 Розрахунок вентиляційної системи.....	68
Висновки до розділу 2.....	70
Розділ 3. Комп'ютерно-інтегроване моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття поршнів .....	72
3.1 Умови теплообміну в системі виливок – форма – навколишнє	

середовище .....	72
3.2 Методика інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення.....	74
3.2.1 Вихідні дані.....	78
3.2.2 Визначення початкових та граничних умов для моделювання.....	79
3.2.3 Результати інженерного моделювання заповнення форми розплавом.....	79
3.2.3.1 Дослідження руху розплаву в стояку.....	81
3.2.3.2 Рух розплаву на вході в форму.....	82
3.2.3.3 Рух металу в порожнині виливки.....	82
3.2.4 Результати інженерного моделювання охолодження виливки поршня.....	84
Висновки до розділу 3.....	88

Розділ 4. Комп'ютерно-інтегроване моделювання для визначення місць виникнення та розмірів газоусадочних дефектів у литих поршнях двигунів....	89
4.1 Способи досягнення проектної якості литих поршнів двигунів під час виготовлення.....	89
4.2 Інженерне моделювання щодо визначення розташування та розмірів ливарних дефектів у поршнях двигунів при моделюванні.....	90
4.2.1 Методи оцінювання та розрахунок об'ємної частки пористості.....	90
4.2.2 Визначення початкових і граничних умов.....	99
4.2.3 Результати інженерного моделювання місць розташування та розмірів ливарних дефектів.....	101
4.3 Дослідження литих поршнів Д 240-1004021.....	104
Висновки до розділу 4.....	105

Розділ 5. Визначення впливу конструктивних і технологічних параметрів литва на розміри газоусадочних дефектів в литих поршнях і впровадження у виробництво результатів дослідження.....	107
5.1 Постановка завдання дослідження впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадочних дефектів у литих поршнях методом	

планування експерименту.....	107
5.2 Вибір факторів планування.....	108
5.3 Побудова плану експерименту.....	113
5.4 Обробка результатів експерименту.....	114
5.5 Впровадження у виробництво результатів дослідження, вплив технологічних параметрів лиття на розмір газоусадочних дефектів.....	123
Висновки до розділу 5.....	125
ВИСНОВКИ.....	126
Список використаних джерел.....	131
ДОДАТКИ.....	139



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

**ДВЗ** – двигуни внутрішнього згоряння;

**ТУ** – технічні умови;

**ДСТУ** – державний стандарт України;

**ІКС** – інформаційні комп’ютерні системи;

**НТУ «ХПІ»** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

**МНК** - метод найменших квадратів.

## ВСТУП

**Актуальність роботи** пов'язана з дослідженням сучасного ливарного виробництва та розвитком передових енерго- і ресурсозберігаючих інноваційних технологій з використанням засобів комп'ютерного моделювання для отримання машинобудівних деталей, що відрізняються високою міцністю, надійністю в роботі, довговічністю, мінімальною металоємкістю і, крім того, задовольняють сучасним вимогам естетичного характеру. Розвиток проектування двигунів внутрішнього згорання характеризується прагненням підвищення потужності і економічності деталей за рахунок форсування їх роботи за швидкісним режимом та середнім ефективним тиском. Такий напрям призводить до зростання механічних і теплових навантажень: збільшується як тиск у вузлах тертя, так і температура деталей двигуна. У зв'язку з цим зростають вимоги до якості та довговічності деталей циліндро-поршневої групи, зокрема, поршнів, оскільки поршень визначає моторесурс і економічні характеристики двигуна внутрішнього згорання.

Відомо, що поршні, отримані з литих заготовок, складають більше 90 % від загальної кількості. Зростаючі вимоги до фізико-механічних властивостей виливків, деталей циліндро-поршневої групи, за умови збереження цінової конкурентоспроможності лиття спонукають розробляти нові економічні способи їх виготовлення.

Наявні публікації свідчать, що при проектуванні нових двигунів внутрішнього згорання і модернізації існуючих особлива увага приділяється технологічності деталей циліндро-поршневої групи [1–6]. Для розрахунків поршнів використовується деталь заданої геометричної конфігурації з певного конструкційного матеріалу, при цьому недостатньо враховувати вплив технологічних чинників лиття на якість поршнів. Зазначимо, що існуючі результати розрахунків недостатньо точні й вимагають додаткових досліджень, в яких будуть враховані реальні ливарні дефекти в тілі поршня.

У зв'язку з вищевикладеним, розробка технології виготовлення поршнів з використанням комп'ютерно-інтегрованого проектування, і з урахуванням

впливу технологічних факторів на розміри газоусадкових дефектів поршнів, є актуальною науково-прикладною задачею, що склала мету дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими, програмами, планами, темами, грантами.**

Тема дисертаційного дослідження була сформульована відповідно до положень Стратегії сталого розвитку «Україна – 2020», схваленої Указом Президента України від 12 січня 2015 року № 5/2015; Плану науково-дослідних робіт Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Навчально-науковим інститутом механічної інженерії та транспорту та кафедри Ливарного виробництва.

**Мета і задачі дослідження. Мета дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є наукове обґрунтування і створення технології проектування поршнів двигунів внутрішнього згоряння, з комплексним застосуванням комп'ютерно-інтегрованого проектування та інженерного моделювання із урахуванням технологічних факторів лиття. Для досягнення поставленої мети потрібно сформулювати та опрацювати сучасні технології проектування й методи моделювання процесів виробництва литих поршнів та виявити їх найперспективніші складові, а саме:

- опрацювати сучасні технології проектування й методи моделювання процесів виробництва литих поршнів та виявити їх найперспективніші складові;
- розробити універсальну технологію комплексного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів із запалюванням палива від стиснення застосовуючи моделювання параметрів лиття та з урахуванням впливу технологічних факторів на розміри газоусадочних дефектів в поршнях;
- створити чисельну модель термомеханічного впливу на литий поршень з ливарними дефектами;
- визначити вплив технологічних чинників лиття на розміри газоусадочних дефектів поршня, із запалюванням палива від стиснення при спільному термомеханічному навантаженні, на різних режимах роботи двигуна;

– сформулювати рекомендації по виготовленню нових поршнів і модернізації існуючих процесів лиття, з використанням комп'ютерно-інтегрованого проектування при розробці; впровадити рекомендації у виробництво.

*Об'єкт дослідження* – процеси проектування і виробництва литих поршнів двигунів внутрішнього згорання із запалюванням палива від стиснення.

*Предмет дослідження* – проектування литих поршнів двигунів внутрішнього згорання із запалюванням палива від стиснення з використанням комп'ютерно-інтегрованих систем.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань використано системний підхід при проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, всі теоретичні аспекти дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії формування виливків, опору матеріалів і сучасному математичному інструментарії. Для комп'ютерно-інтегрованого проектування застосовувались чисельні та чисельно-аналітичні методи: метод кінцевих різниць в тривимірній об'ємній постановці (для моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття); метод кінцевих елементів (для аналізування термомеханічного навантаження литих деталей двигуна). Теоретичні результати мають співвідношення із результатами експериментальних даних і численного результату розрахунку впливу технологічних факторів на розміри газоусадкового дефекту литих поршнів проводилося з використанням методу планування експерименту.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що дисертація є завершеним науковим дослідженням, яке безпосередньо пов'язане із розв'язанням важливого науково-прикладного завдання, спрямованого на наукове обґрунтування і створення технології виготовлення поршнів ДВЗ, з комплексним застосуванням комп'ютерно-інтегрованого проектування та інженерного моделювання з урахуванням технологічних факторів лиття. При цьому було одержано результати, що характеризуються науковою новизною:

– вперше розроблена універсальна технологія комплексного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів з модернізованою ливниковою системою із

застосуванням моделювання параметрів лиття, які відрізняються від існуючих урахуванням впливу технологічних факторів на розміри газоусадкових дефектів в поршнях, що дозволило підвищити якість технологічного процесу лиття;

– дістав подальшого розвитку метод лиття поршнів двигунів внутрішнього згоряння, який відрізняється врахуванням технологічних факторів лиття на розміри газоусадкових дефектів поршня, із запалюванням палива від стиснення на різних режимах роботи двигуна, що дозволяє при проектуванні врахувати спільне термомеханічне навантаження;

– удосконалено сучасні технології проектування та методи моделювання процесів виробництва литих поршнів, що відрізняється від існуючих урахуванням дефектів в поршнях, що дозволило виявити їх найперспективніші складові;

– запропоновано чисельну модель термомеханічного впливу на литий поршень двигунів внутрішнього згоряння із запалюванням від стиснення, що відрізняється від існуючих врахуванням дефектів газоусадочного характеру, що дозволило підвищити точність проектування.

**Практичне значення отриманих результатів** для ливарного виробництва, полягає у створенні методів комп'ютерно-інтегрованого проектування, що враховують вплив технологічних чинників лиття на розміри газоусадкових дефектів поршнів, для використання під час проведення наукових досліджень, підготовки виробництва, проектування й виготовлення інших литих деталей, тощо.

Надані рекомендації по виготовленню нових поршнів та модернізації існуючих процесів лиття з використанням комп'ютерно-інтегрованого проектування під час розробки.

Результати дисертаційного дослідження апробовані та впроваджені в навчальний процес на кафедрі ливарного виробництва НТУ «ХП» (Додаток Б).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційне дослідження виконано здобувачем самостійно, викладені положення, що виносяться на захист, розроблено особисто автором. Серед них:

– розроблено метод визначення місць розташування та розмірів ливарних дефектів зі спільним використанням комп'ютерно-інтегрованих систем моделювання і результатів експериментальних досліджень;

– визначено вплив технологічних чинників лиття на розміри газоусадкових дефектів поршнів;

– створені рекомендації й впроваджені для практичного застосування нової технології проектування поршнів, з урахуванням результатів аналізування впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадкових дефектів поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення, у виробництві.

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати досліджень були повідомлені, обговорені та позитивно оцінені на професійних конференціях різних рівнів, а саме Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» — (Харків, 2020); Міжнародні конференції: Литво: Металургія: Міжнародна науково–практична конференція, (Запоріжжя, 2018, 2020); *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III* (Харків, 2020).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 8 наукових публікаціях, з них: 5 в наукових фахових виданнях України, 3 в матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків. Загальний обсяг роботи становить 141 сторінку, з них: 22 рисунки по тексту, 14 таблиць по тексту, список використаних джерел складається з 91 найменувань на 8 сторінках, 2 додатки на 3 сторінках.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗУВАННЯ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ ПОРШНІВ

### 1.1. Вимоги, що пред'являються до литих поршнів

Поршень є однією з найбільш відповідальних деталей сучасного двигуна. Конструкцією поршня та його якістю визначають довговічність і надійність, потужність, економічність й екологічність двигуна, а також рівень шуму при його роботі. Основні функції поршня – ущільнення внутрішньо-циліндрового простору за допомогою днища і канавок з поршневыми кільцями та передача сил тиску в циліндрі на кривошипно-шатунний механізм. Ці функції повинні реалізовуватись протягом всього ресурсу двигуна в широкому діапазоні режимів по частоті обертання й навантаження та в умовах високої теплової напруженості, що визначають ступінь форсування двигуна. Крім того, слід враховувати, що чим вище ступінь стиснення, максимальна частота обертання й краще наповнення циліндрів, тим більше потужність і тим вище рівень теплової напруженості поршня, а також вимоги до його конструкції, технології виробництва та застосовуваних матеріалів [1–6].

Поршні представляють технологічно складну вилітку. Вони відрізняються великою різнотонністю, мають різкі переходи від товстих перетинів до тонких. Виокремимо загальні вимоги до відливок:

- виліток повинен бути в максимальному ступені близький до контуру деталі;
- виліток виготовляють зі сплаву, що забезпечує необхідний хімічний склад, структуру, механічні та експлуатаційні властивості литого виробу;
- відсутність у вилітках зовнішніх і внутрішніх дефектів;
- висока точність розмірів;
- мала шорсткість поверхонь;
- наявність спеціальних експлуатаційних властивостей (стійкість проти зносу, корозії тощо).

Враховуючи, що поршні працюють в умовах високої теплової і механічної напруженості, до них пред'являють підвищені вимоги щодо: теплопровідності; статичної, динамічної й втомної міцності; антифрикційним властивостям; зносостійкості; корозійної стійкості; а також питомої ваги та коефіцієнту лінійного розширення [7].

Необхідно також зважати на те, що умови роботи дизельного поршня набагато жорсткіші, ніж бензинового поршня. Наприклад, температура прогріву бензинового поршня приблизно 220 °С, а температура дизельного – вище приблизно на 20 °С; має місце детонація при вибуху суміші, повітряне охолодження при стаціонарно працюючому двигуні, а також чотиритактний режим роботи одноциліндрового двигуна. Для забезпечення необхідного коефіцієнта теплового розширення поршень повинен бути без нерезистової вставки [1–6].

Взаємозв'язок виконуваних поршнем основних функцій і способів їх забезпечення представлений в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Функціональні вимоги до матеріалу поршня [8]

№ п/п	Виконувана функція	Характеристика поршня
1	2	3
1	Передача тиску газів до колінчастого валу за допомогою шатуна	Високі міцність і жорсткість конструкції. Висока твердість матеріалу поршня.
2	Висока зносостійкість, відсутність задирів при роботі в режимі максимальної потужності	Відсутність ліквіційних зон. Швидке і однорідне відведення тепла для усунення точок місцевого перегріву
3	Розсіювання теплоти згорання, переданої на днище поршня	Мала величина теплопоглинання, висока теплопровідність і велика теплоємність матеріалу поршня



## Продовження таблиці 1.1

1	2	3
4	Безшумність при роботі і відсутність клінення, мала емісія вихлопних газів	Низький коефіцієнт теплового розширення матеріалу поршня. Правильно спрофільований тронк поршня, що забезпечує рівномірний тиск на стінки циліндра
5	Механічна надійність при всіх режимах роботи, включаючи «холодний» запуск	Жорсткість конструкції для зменшення напруги до мінімуму. Застосування сплаву з високими механічними показниками як при кімнатній так і при високих температурах. Висока втомна міцність матеріалу поршня

Серед основних вимог, що пред'являються до литих деталей ДВЗ, слід виділити:

- вимоги до геометричної точності;
- вимоги до технологічності;
- зниження металоємності литої деталі.

Геометрична точність виготовлення литого поршня має наступні параметри:

- точність виконання основних розмірів і криволінійних поверхонь;
- відповідність технологічного розсіювання товщини стінки та геометричних розмірів литої деталі конструктивних відхилень;
- точність розташування поверхонь один до одного;
- шорсткість (чистота поверхні) литої поверхні;
- точність виконання оболонкових елементів (тонких стінок, оболонкових лопаток тощо)
- технологічна конструкція заготовки.

Багато в чому точність виготовлення залежить від складності конфігурації, габаритних розмірів, способів лиття та складу сплаву. Як правило, чим вище складність і габаритні розміри виливки, тим нижчою є точність вироблення через

зниження точності виготовлення ливарних форм і модельного оснащення, неможливості досягти стабільності температурних режимів при охолодженні та затвердінні.

Зазначимо, що деформацію (зміну форми і розмірів) викликають численні фактори. Основні з них – внутрішня напруга, що виникає в литві в процесі охолодження форми; під час зберігання, транспортування та механічній обробці, а також за наявності деформації модельного оснащення. Акцентуємо, що деформація часто зустрічається при відливанні виробу:

- з різними товщинами стінок;
- з протяжними площинами;
- з неправильно розташованою ливниковою системою;
- з неправильним використанням холодильників.

Аналізування причин виникнення деформацій дозволило зробити висновок, що створення на етапі проектування оптимальної за розмірами, конфігурацією, технологічної конструкції дозволяє знизити ймовірність появи в ній дефектів в процесі виготовлення та експлуатації. При цьому слід враховувати також, що усадка металу, яка залежить від його складу і температури, від швидкості заливки, від конфігурації, товщини стінок і положення виливки у формі, в значній мірі визначає об'ємне та лінійне розширення рідкого металу, швидкість охолодження виливки, зокрема, окремих її частин.

Технологічність литої деталі передбачає наявність властивостей, які проявляються у можливості досягнення мінімальних витрат на засоби, матеріали, час виготовлення, а також забезпечення технологічності виготовлення із заготовки деталі. Впровадження сучасних технологічних процесів, що забезпечують найкращий компроміс між споживчою якістю виробу і його собівартістю, – є однією з основних вимог ринкової економіки. Крім того, зниження металоємності литої деталі за умови збереження її міцності та стабільності геометричних розмірів, є, поряд з вищевказаними критеріями, одним з важливих умов конструювання литих деталей. Тому необхідно прагнути

до зниження питомої металоємності та підвищення показників характеристик надійності й довговічності.

Про це свідчать ті факти, що маса деталей, машин і обладнання, котрі виготовляються литтям, становить 50...80 %. При цьому вартість матеріалів (в основному металу) в собівартості машин становить у верстатобудуванні 25...40 %, а у виробництві двигунів до 65 % від загальної суми виробничих витрат [9]. Слід враховувати, що на металоємність також впливають такі фактори, як:

- раціональність розробленої конструкції;
- повнота та наукова обґрунтованість дослідних робіт;
- рівень властивостей матеріалу і стабільності прийнятих механічних властивостей,
- способи виготовлення деталей;
- умови експлуатації і ремонту машин.

Встановлено, що базовим показником може бути питома або відносна металоємність, віднесена до одиниці потужності машини або механізму, досягнутому рівню для даного класу деталі або еталону.

Показано, що системний підхід до розробки конструкції поршня, як елемента циліндро-поршневої групи і двигуна в цілому, дозволяє визначати оптимальні комбінації матеріалів, технологічних прийомів і конструктивних рішень.

## **1.2 Способи виготовлення поршнів**

В даний час для виготовлення поршнів застосовується декілька технологій, кожна з яких має свої переваги і недоліки, серед цих технологій: лиття в кокіль з використанням ливарних поршневих сплавів; гаряче штампування сплавів, що деформуються; рідше застосовується штампування в рідкій фазі; лиття під низьким тиском та ізотермічне пресування [7]. Вибір того чи іншого виду лиття для виготовлення конкретного поршня визначається рівнем вимог до його якості (механічними властивостями, точності розмірів, чистоти поверхні); технічними

можливостями кожного із способів лиття та економічними міркуваннями (необхідністю виготовлення виливки з мінімальними витратами праці, матеріалів і мінімальною собівартістю) [10].

Схема технологічного процесу отримання литої заготовки поршня в разовій піщано-глинистій формі складається зі значної кількості операцій, серед яких:

- приготування формувальних і стрижневих сумішей;
- виготовлення форм і стрижнів;
- заповнення виготовлених форм металом;
- руйнування форми;
- очищення виливки;
- вибивка стрижнів;
- охолодження;
- відріз прибутку (ливника);
- груба механічна обробка різанням;
- відпал і т.д.

Аналізуванню наукових праць та практичних напрацювань було встановлено, що недоліками лиття в разові піщано-глинисті форми є:

- низький відсоток якісних виливків;
- пористість;
- газові та усадочні раковини;
- викривлення і ін.

Поряд із цим, науковцями акцентовано, що під час заповнення ливарної форми рідким металом виділяється волога, котра знаходиться в формувальній суміші; вигорають сполучні речовини з форм і стрижнів; виділяються гази з фарб, якими часто покривають поверхні форм і стрижнів. Гази можуть перебувати в металі у вільному стані або розчинитися в ньому, утворюючи оксиди, гідриди, нітриди і газотворні продукти. Крім того, гази, які розчинені в металі, часто погіршують його механічні властивості і сприяють утворенню ливарних дефектів – газових раковин і пор [11].

Зауважимо, що тип кокільного лиття визначається такими факторами як:

- програма випуску;
- розміри поршня;
- матеріал, який використовується;
- вимоги до механічних властивостей виробу.

Слід зупинитись на тому, що гравітаційним методом виготовляється більшість автомобільних і легко-промислових поршнів. Він дозволяє зробити велике число виливків в одній і тій же ливарній оснастці. Внутрішня поверхня поршня формується стрижнем, який може бути цілісним (моноклінним) або складатися з 3...7 частин (клинів). Зовнішня поверхня поршня формується матрицею, утвореною декількома частинами (як правило, двома). Іноді використовується стрижень, який формує днище з камерою згоряння. Гнучкість форми дозволяє вносити зміни в конструкцію відливання деталі та дозволяє додавати у вилівок інші деталі, такі як нерезисторні вставки або стрижні, які руйнуються. Готові поршні мають гарні механічні властивості та постійні розміри [10].

В даний час існує два принципово різних способи лиття поршнів в кокіль: лиття днищем вгору і лиття днищем вниз. Більшість поршнів отримують литтям днищем вниз. У цьому випадку постачання металу до поршня забезпечується з масивного бічного додатку. Сумарна маса додатків становить, зазвичай, 40...60% від маси поршня, і залежить від його конструкції та матеріалу. У великих поршнях кільцевий додаток ставиться і на тронку.

У процесі лиття поршнів зі значно потовщеними днищами застосовують кантовку кокілю під час його заливання. Спочатку кокіль нахилиється в бік ливника і здійснюється заливка. Потім кокіль відхиляється в протилежний бік – відбувається перерозподіл рідкої маси, що кристалізується, в результаті чого виключається утворення концентрованих раковин у днищі. Пристрій для лиття поршнів з алюмінієвого сплаву включає лінію подачі розплаву, кокіль і підкокільну плиту. Лінія подачі розплаву оснащена живильником підведеним до отвору в бічній частині кокілю. Підкокільна плита оснащена приводом, який

після заливки кокілю забезпечує її обертання навколо горизонтальної осі на кут  $16...20^\circ$  від вертикалі за  $30...40$  с. [12, 13].

Німецькими ливарниками запропонована технологія виготовлення поршнів, згідно з якою метал у кокіль подається знизу, після заливки форма обертається на  $180^\circ$  і, одночасно, метал ущільнюється в нижній частині та в бобишках, спеціальним пуансоном гальмування [12].

Перевагами лиття в кокіль можна визначити такі, як:

- підвищена розмірна точність виливків;
- висока продуктивність процесу;
- багаторазовість використання ливарних форм;
- можливість автоматизації процесу;
- економне використання виробничих площ;
- можливість комбінованого використання кокілів і складних піщаних стрижнів;
- стабільність щільності і структури виливків;
- високі механічні та експлуатаційні властивості виливків.

До недоліків лиття в кокіль, для отримання виливки поршня, на переконання деяких авторів, слід визнати:

- високі трудомісткість виготовлення і вартість металевої форми;
- підвищена схильність до виникнення внутрішніх напружень в литві, внаслідок більш складної усадки, а також меншого інтервалу, порівняно з литтям в піщану форму та інтервалу оптимальних режимів лиття, що забезпечує отримання якісної виливки;
- ущільнення залитого металу засобами додатку з ливника, маса яких набагато більше виливки, а велика витрата металу не усуває об'ємну усадку, викликаючи появу дефекту виливки у вигляді раковин і пор;
- металеві форми практично газонепроникні, гази видаляються через дрібні отвори, а також через літник і додаток, що неминуче формує в литві дефекти у вигляді диспергованих пор;

– висока швидкість охолодження призводить до прискорення кристалізації виливка, котре сприяє недостатньому заповненню форми металом; виникають усадкові, термічні і фазові напруги, що утворюють гарячі і холодні тріщини [10, 14, 15].

Науковцями зазначалося, що литтям під низьким тиском отримують виливки, які піддаються випробуванню на герметичність; складної конфігурації з товстими і тонкими стінками; великогабаритні з декількома масивними тепловими вузлами. Крім примусового заповнення ливарної форми, в цьому методі ефективно використовується живлення твердого виливку рідким металом з природним прибутком – металопроводу. Останнє є можливим за умови організації спрямованого тепловідведення та затвердінні виливка зверху вниз.

Металева форма, що складається з двох напівформ, нагрівається до температури 70...90 °С, встановлюється металевий стрижень, нагрітий до температури 150...180 °С, потім змикаються напівформи. Всередині форми створюється розрідження. Розплавлений метал з печі під низьким тиском по металопроводу вичавлюється в порожнину форми. Після кристалізації виливки, форма розкривається і витягується відливка. Металевий стрижень виконується збірним способом з бічних і центральної частин, а з'єднання стрижня виконується магнітами. Забезпечивши отримання виливків без раковин і пористості та зі дрібнозернистою структурою [16].

Іншими науковцями зверталася увага на те, що необхідність в складних системах ливника відпадає, але зростає значення температурних режимів лиття і, особливо, теплових режимів роботи прес-форми і верхньої частини металопроводу. Крім того, значно зростає обсяг; з форми витісняється повітря за рахунок порожнини металопроводу, що змушує особливу увагу приділяти вентиляції ливарної форми [14].

Литтям під тиском виготовляють складні по конфігурації тонкостінні виливки, максимально наближені за розмірами до готової деталі. Цей спосіб лиття високопродуктивний, з високим рівнем автоматизації процесу. Прес-форма швидко відводить теплоту від невеликої маси виливки, яка в результаті

оохолоджується дуже швидко, структура її виходить дрібнозернистою, а механічні властивості більш високими.

Однак, в процесі заповнення разом з рідким металом в форму потрапляє повітря, котре потім утворює в литві газову пористість, що в багатьох випадках ускладнює механічну і термічну обробку виливків. Для зменшення пористості виливків науковці пропонують застосовувати вакуумування порожнини прес-форми, та зауважують, що це ускладнює роботу машини та знижує її продуктивність [17].

Слід враховувати, що область застосування лиття під тиском обмежується специфічними вимогами технологічності конструкцій литих деталей (труднощі виконання виливків зі складними порожнинами) і вартістю прес-форм, а виправдовується тільки у процесі виробництва великих партій виливків [15].

Ще одна технологія, схожа на лиття під тиском, називається рідким штампуванням. Пресовка в цій технології проводиться дещо пізніше. Це робиться в процесі кристалізації та застигання розплаву, коли частина металу вже стала твердою. Тиск усуває мікропорожнини, покращує структуру матеріалу поршня, а, значить, і властивості виробу. Як доведено науковцями, процес лиття поршнів у кокіль з кристалізацією сплаву під тиском застосується для порівняно нескладних товстостінних виливків, що не мають піщаних стрижнів [12].

Наголосимо на тому, що метод лиття з кристалізацією під тиском забезпечує високу щільність виливків, близьку до щільності, що деформують заготовку, і досить однорідну структуру. Науковцями встановлено, що за умови застосування високого тиску:

- кристалізується вилівка внаслідок пластичних деформацій;
- відбувається процес, який зменшує міжкристалічні пори та стиснення газоповітряних пор;
- розчинені гази практично не виділяються з металу при кристалізації;
- вилівок виходить більш щільним [17].

Зазначимо, що рідке штампування зручне тим, що дозволяє «залити» різні вставки та металеві деталі. Воно легко забезпечує з'єднання тіла поршня з



іншими металами, наприклад, з нерезистивими вставками під верхнє компресійне кільце. Такі поршні, в основному, використовуються для дизельних двигунів, вони більш довговічні та витримують великі навантаження. Температурні режими аналогічні режимам лиття в кокіль, хоча зростає небезпека приварювання металу до матриці при нагріванні прес-форми до температур вище 400 °С. Для алюмінієвих сплавів температура матриці не повинна перевищувати 300 °С, робоча температура пуансона – 350 °С.

Слід враховувати, що тривалість технологічних операцій має бути мінімальною. Особливо це є важливим під час заливання і витримки металу в прес-формі до моменту початку пресування. Силовий характер взаємодії пуансона і прес-форми визначає високі вимоги, що пред'являються до складу та якості мастил і покриттів, що наносяться на робочі поверхні прес-форми [15].

Деякими авторами пропонується виготовляти заготовки поршня двигуна з алюмінієвого сплаву, що відрізняється підвищеною теплостійкістю. Заготовки поршнів з цього сплаву виготовлялися штампуванням рідкого металу (розплаву) на гідравлічному пресі в прес-формі з використанням принципу поршневого пресування. У подальшому отримані заготовки поршнів зі сплаву АЛ-25 піддавали термообробці за режимом:

- загартування в гарячій воді після витримки протягом трьох годин при температурі 495 °С;
- старіння при 195 °С з витримкою протягом шести годин;
- охолодження на повітрі [18, 19].

Досить відомим є спосіб виготовлення поршня двигуна внутрішнього згорання, що включає його формоутворення штампуванням заготовки з алюмінієвого сплаву зі структурою, котра містить частки, які впливають на міцність і подальшу термообробку. За цим способом здійснюють штампування заготовки з алюмінієвих сплавів з об'ємним вмістом часток, які зміцнюють на 25...60 %, та їх середньому розміру менше 15 мкм<sup>2</sup>, зі швидкостями  $5 \times 10^{-2} \dots 5 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  в звичайному режимі або режимі дуже високої пластичності, найкраще, за один перехід. Технічним результатом є виготовлення

штампуванням поршнів із силумінів, що наділені широким спектром механічних властивостей в залежності від вихідної структури і структури, що отримується в результаті деформаційної обробки [20].

На переконання науковців сучасний гнучкий і високоефективний технологічний процес виробництва поршнів включає автоматизовану підготовку виробництва із застосуванням CAD/CAE – систем і технологій швидкого виготовлення прототипу, технологічний процес ізотермічного штампування і оригінальну технологію безкопіювальної обробки поршнів різанням [9, 21].

Одним із відомих способів виготовлення поршня двигуна внутрішнього згоряння слід визнати той, який пов'язує між собою не тільки технологічні операції та їх послідовність, а ще й з характеристиками конкретного типу двигунів для яких даний поршень виготовляється. Спосіб полягає в тому, що в процесі лиття передбачено такі послідовні операції:

- встановлюють контейнер з матрицею;
- в матрицю поміщають заздалегідь підготовлену вставку;
- заливають мірну дозу розплавленого алюмінієвого сплаву,
- прикладають тиск і витримують його весь період кристалізації сплаву, причому додатковий тиск до дзеркала розплаву здійснюють шляхом первісного осьового переміщення знімача з пуансоном;
- тільки після торкання знімачем матриці здійснюють додаток тиску за рахунок осьового переміщення поршня, причому величина прикладеного до розплаву тиску залежить від літрової потужності двигуна [22].

Альтернативою методам лиття слід визнати ізотермічне штампування твердої заготовки. У цьому процесі заготовку поршня отримують не відливанням розплавленого металу в кокіль, а формуванням під тиском не розплавленої, але сильно нагрітої заготовки, що легко деформується. Саме за цією дорогою технологією робить свої ексклюзивні поршні відома фірма Mahle. Вихідним матеріалом є алюмінієві сплави з великим вмістом кремнію АК12Д і АК18Д, для дизелів застосовують гранульований сплав 1379П. Перший з них, розроблений для моторів військового призначення, котрий сьогодні широко застосовують в

цивільних двигунах. У цьому доєвтектичному, як кажуть фахівці, сплаві кремній розчинений в металі рівномірно, що покращує якість виробу. З наявних сплавів методом кування вдається зробити поршні, твердість яких в півтора – два рази вище, ніж литих.

Зупинимось окремо на цій технології. Заготовки для штампування вирізалися з алюмінієвого дроту, виготовленого особливим способом. Метал для нього був відлитий у форму заввишки трохи більше метра і діаметром 40 см, а зовнішній шар з литими мікродефектами обідраний на кілька сантиметрів. Після цього виливок продавили через отвір – філь'єру діаметром 8...8,5 см, тобто піддали екструзії (видавлюванню) з десятикратним зменшенням площі поперечного перерізу.

За такої обробки спочатку дендритна кристалічна мікроструктура виливки сильно змінюється: вона руйнується при продавлюванні; натомість утворюється дрібнозерниста волокниста структура, зерна якої витягнуті уздовж осі прутка. При цьому всі ливарні пори металу сильно ущільнені, стиснуті. Після різання шматки дроту поміщаються в спеціальну матрицю і пересуваються пуансоном. Це робиться при підвищеній температурі, коли заготовка стає досить м'якою та легко змінює форму під тиском. Штампування відбувається ізотермічно, тобто при фіксованій температурі 480...490 °C, що приблизно на 100 градусів нижче температури плавлення алюмінію.

Потім заготовка охолоджувалася, проводилася її термообробка і загартування. Один з важливих етапів термообробки називається старінням. Тут для зняття внутрішніх напружень і надання йому потрібної твердості заготовка витримується при заданій температурі в печі протягом 8...10 годин [23].

Ще один відомий спосіб виготовлення поршня, що полягає в формоутворенні штампуванням заготовки з алюмінієвого сплаву в режимі звичайної гарячої деформації. Цей спосіб дозволяє підвищити механічні якості силумінів, а поршні використовувати в потужних, форсованих двигунах. Через низьку пластичність силумінів під час гарячої деформації штампуванням отримують поршні невеликих розмірів і відносно простої форми, а елементи, які

армують, застосовують тільки у вигляді накладок, що кріплять болтами до корпусу поршня, котрий додатково ускладнює конструкцію і робить більш економічно не вигідним даний процес виготовлення.

Крім того, як визначено науковцями, температурно-швидкісні режими штампування не оптимізовані, в залежності від кількості та розмірів частинок кремнію та інших часток, які впливають на зміцнення як з точки зору забезпечення необхідної пластичності матеріалу для отримання необхідної форми поршня без руйнування, так і з точки зору досягнення в сплаві максимального рівня механічних властивостей [24].

Більш сучасним науковцями визначено спосіб, в якому штампування поршнів двигунів внутрішнього згорання проводять в штампі, пуансон якого відповідає внутрішній конфігурації поршня. Недоліком даного способу є те, що при штампуванні поршнів з циліндричної заготовки на кільцевій поверхні видавленого металу виникають значні розтяжні тангенціальні напруження яких збігається з напрямками дотичних до концентричних колах кілець. У зв'язку з тим, що для виготовлення поршнів використовуються сплави з високим вмістом кремнію, що мають низьку технологічну пластичність, при штампуванні можливе руйнування деформованого металу через що виникає висока напруга [25].

Відомо, що процес кування призводить до пластичної деформації алюмінієвого сплаву і створення дуже щільної дрібнозернистої структури з підвищеною міцністю. В середньому міцність матеріалу після кування стає вищою на 20...30 %, ніж після лиття. Проте, кованим поршням притаманні і недоліки. Це пов'язано із тим, що процес кування потребує дуже великих зусиль для деформування вихідної заготовки, що вимагає застосування багатотонних пресів. Крім того, одержувана заготовка повинна мати просту форму без складних внутрішніх отворів, інакше її не можна буде зняти з деталей штампа (пуансона або матриці). В результаті цього мінімізувати масу кованого поршня дуже важко, обсяг додаткової механічної обробки виходить надмірно великим, а коефіцієнт використання матеріалу зниженим. На додаток до всього, кований

поршень неможливо зробити з пластинами або вставками, що обмежує область його застосування. І, нарешті, процес кування менш продуктивний і значно дорожчий, що не дозволяє використовувати ковані поршні в масовому виробництві [26].

Таким чином, лиття в кокіль – це найбільш простий технологічний процес, що дозволяє використовувати поршневі сплави з низьким коефіцієнтом лінійного розширення й отримувати виливки складної конфігурації. Однак, кокільні поршневі заготовки мають два суттєвих недоліки:

- невисока якість заготовок (наприклад, через пористість в масивних частинах);
- низький коефіцієнт використання металу, оскільки значна кількість металу йде у відходи ливарного виробництва (ливникова система та напуски від ливарних ухилів).

Заготівки, отримані гарячим штампуванням сплавів, що деформуються, відрізняються високою якістю, але ці сплави в порівнянні з ливарними мають на 15...20 % вищі значення коефіцієнта лінійного розширення, а коефіцієнт використання металу при гарячому штампуванні ще менший, ніж при литті в кокіль, оскільки метал йде у відходи ковальського виробництва. У даному випадку йдеться про надлишки матеріалу, що залишаються на деталі після обробки і напуски від штампувальних ухилів. Рідке штампування поршнів є кращим за наведені вище оскільки поєднує переваги обох вищезгаданих способів:

- дозволяє отримувати бездефектні, щільні заготівки з дрібнодисперсних структур матеріалу поршня;
- допускає використання ливарних поршневих сплавів з низьким коефіцієнтом лінійного розширення;
- забезпечує високі експлуатаційні властивості поршнів у порівнянні з кокільними заготівками;
- сприяє значному скороченню витрат матеріалу, тощо.

Метод гарячого штампування, зазвичай, використовується для виробництва поршнів, до яких пред'являються особливі вимоги щодо міцності. Це поршні високонавантажених бензинових двигунів (авіація, автоспорт), і тронки складових поршнів великих дизельних двигунів. Матеріал штампованого поршня має щільну структуру, котра не має пор. Для високонавантажених поршнів дизельних двигунів досить прийнятним є кокільне лиття, за умови максимально можливого запобігання пористості в масивних частинах виливків.

Решта із зазначених способів виготовлення поршневих заготовок забезпечують високу якість поршнів, але відрізняються великою складністю технологічного процесу і меншим коефіцієнтом використання металу, що значно обмежує можливості їхнього ефективного використання.

### **1.3 Види дефектів литих поршнів і показники їх якості**

На переконання вчених надійність і якість взаємопов'язані один з одним, згідно з переліком з семи аспектів процесу створення поршнів, що забезпечують зв'язок між якістю та надійністю [27, 28]:

- конструкторсько-технологічне забезпечення стійкості поршнів до зовнішніх чинників (комп'ютерно-інтегроване проектування);
- забезпечення пристосованості поршнів до умов експлуатації споживачами, встановленими в технічному завданні;
- ймовірне недотримання споживачами нормативного положення, щодо використання та проектування поршнів у розрахунку на екстремальний варіант;
- оцінка і контроль постачальників;
- вивчення цільових ринків;
- стабільність виробництва;
- виробничі процеси.

Контроль якості поршнів на початковому етапі виробництва здійснюється згідно з вимогами із урахуванням [29–33]:

- відхилення від заданої маси;
- відхилення від необхідної твердості литої термообробленої деталі;

- неприпустимість усадкових раковин в певних місцях виливки;
- наявності в тілі поршня усадкової рихлоти, що не перевищує певний рівень[31].

Поширеними причинами виникнення дефектів литих поршнів ДВЗ з алюмінієвих сплавів є нетехнологічність конструкції деталі, недосконалість технологічного процесу виготовлення і порушення технологічного процесу. Дефекти, пов'язані з нетехнологічністю конструкції деталі, є одними з найбільш поширених у виробничій практиці. Вони виникають у тих випадках, коли деталь спроектована без урахування застосовуваної технології виробництва, тобто, неузгодженості роботи конструкторського і технологічного підрозділів.

Перед запуском нової деталі у виробництво, технологія її виготовлення обирається на основі наукових принципів, що має бути змодельована із застосуванням сучасних САЕ систем, а потім випробувана під час виробництва експериментальних дослідних партій. Дефекти, що виникають в результаті порушення технології, можуть бути наслідком відступу від режимів в будь-якій технологічній операції. Науковцями виокремлено дві основні системи класифікації дефектів виливків:

- за зовнішнім виглядом, розмірами, формою, місцем їх розташування на литві;
- з причин їх утворення; по спільності фізико-хімічних явищ, в результаті яких виникає дефект [14].

Під час лиття кольорових сплавів більш широко використовують другу систему, це ґрунтується на тому, що вона, на переконання авторів [14], повніше розкриває сутність явищ і взаємозв'язок дефектів з фізико-хімічними, тепловими та гідравлічними процесами, котрі відбуваються в процесі виготовлення відливок. Усі дефекти виливків об'єднують у чотири групи:

- дефекти, що виникають внаслідок хімічної і механічної взаємодії з газами і вологою (шлакові включення, оксидний спай, газові раковини);
- дефекти усадочного походження (усадочні раковини, утяжіння, рихлоти, викривлення);

- неметалеві включення, що не викликаються взаємодією з газами та вологою (флюсові включення, засмічення; утискання, пригар, корольок);

- невідповідність складу сплаву, властивостей, структури і розмірів виливків вимогам стандарту (наприклад, ізоляція, невідповідність розмірів і конфігурації виливків кресленням, невідповідність герметичності виливки технічним вимогам, тощо).

Крім того, науковцями доведено, що у виливках можуть утворюватися такі дефекти:

- газова пористість – причиною утворення якої може бути збільшений вміст розчинених в металі газів і підвищена температура у процесі заливки;

- шлакові включення – є наслідком застосування під час плавки забруднених шихтових матеріалів; неякісне рафінування сплаву і неповний час вистоювання його після процесів рафінування та модифікування;

- невідповідність хімічного складу – може бути результатом неправильної шихтовки, забруднення шихти, неправильного ведення плавки, а також перегріву металу;

- усадочні раковини, усадочна пористість, утяжіння, недоливи, неспаї через неправильний вибір температури заливки [12].

Усадкові дефекти можуть виникнути також внаслідок порушення спрямованості затвердіння і недостатнього живлення масивних вузлів виливки. Усадкові дефекти нерідкими є в місцях, які формуються сильно розігрітими ділянками кокілю. Причиною усадочних раковин, при щільній ливниковій системі, може бути недостатній перетин живильників.

При литті деталей з алюмінієвих сплавів поява браку здебільшого залежить від ливникової системи. Тому при виборі ливникової системи рекомендується враховувати, які зміни вона вносить у процес формування виливків, та які нові дефекти може спричинити така зміна [12].

Науковцями було зазначено, що недоливи та неспаї супроводжуються багатьма причинами:

- холодним металом;



- низькою початковою температурою кокілю;
- повільною заливкою;
- великою газотворністю стрижнів
- поганою вентиляцією кокілю.

Розробка ливникової системи, що прискорює заливку, може бути, на переконання Вейника, ефективним засобом попередження недоливів і неспаїв. Також він вважає обов'язковою умовою запобігання браку виливків зниження газоутворюючої здатності стрижнів і хороше відведення газів з кокілю. Прискорення заливки, підвищення початкової температури кокілю, температур заливання і зниження теплоакumuлюючої здатності форми, як заходів попередження недоливів вважається неприпустимим без оцінювання ймовірності появи інших видів браку[12].

Виходячи зі складності, виявлення розмірів та місць їх розташувань, найбільш небезпечними вважаються приховані дефекти газоусадочного характеру. В даний час їм приділяється достатня увага, а безпосередньо процес новоутворення починається з етапів фазового переходу з охолодження рідкого металу та його подальшого процесу кристалізації. Кристалізація супроводжується зменшенням обсягу цього сплаву (усадкою). Усадка рідкого та кристалізація сплаву, обумовлює утворення у виливках незаповнених металом порожнин (усадочних раковин і пор). Наголосимо, що пористість нормується існуючими нормативними документами – ТУ і ДСТУ [29–32]. Для алюмінієвих поршнів переважним видом ливарних дефектів є газоусадкова пористість, котра впливає на якість і міцнісну надійність.

Для ефективного управління якістю виливків необхідні кількісні критерії для їхнього оцінювання. Вважається, що існує пряма залежність якості виливки від її точності, чистоти поверхні та рівня механічних властивостей, і зворотна, від частоти новоутворень в ній ливарних дефектів. Ця позиція правильно відображає взаємозв'язок якості виливки з її основними параметрами, однак, є тільки якісною. Підвищення якості виливки тісно пов'язане з вирішенням одного з головних завдань – зниженням її металоємності. Для зниження маси литої

вилівки необхідно мати такі функціональні характеристики, як: надійність, довговічність, гарантований рівень несучої здатності, тощо.

Якість відливання проявляється в ефективності виконання нею своєї функції, пов'язаної з передачею або сприйняттям деяких дій завданих іншими елементами системи. З огляду на це, науковці пропонують в якості системної характеристики якості вилівки прийняти її ресурс, протягом якого поршень не досягає граничного стану із заданою ймовірністю. Під граничним мається на увазі стан, в якому виріб уже не може виконувати свої технічні функції [34]. Із такою позицією слід погодитись.

Значимість і універсальність даного параметра чітко простежується в тому, що ресурс вилівки визначається її конструкцією, металоємністю, механічними властивостями металу, наявністю технологічних дефектів і якістю технології виготовлення, а також значенням і ступенем розподілу робочих навантажень, які впливають на деталь в режимі її нормального функціонування. Науковці доводять, що практично єдиним ефективним методом дослідження ресурсу литої вилівки є метод машинного моделювання [34], що вбачається доцільним і в нашому дослідженні.

#### **1.4 Сучасні тенденції проектування технології лиття поршнів**

На даний момент основою ливарної технології та механічної обробки є єдина 3D-модель поршня, на якій здійснюється наскрізне конструкторсько-технологічне проектування. Вона також використовується для моделювання процесів, що відбуваються при заливці, обробці та робочих режимах двигуна. У процесі модернізації конструкції поршня та технології виробництва відбувається безперервний обмін інформацією між конструктором і технологом-ливарником, що включає такі етапи:

– підготовка виробництва поршню, що є найбільш важливим етапом, під час якого:

а) визначається можливість виробництва в умовах конкретного підприємства; розробляються 3D-моделі;

б) проводиться моделювання і випробування;  
в) здійснюється доведення конструкції та технології лиття;  
г) випускається конструкторська і технологічна документація;  
– взаємодія підрозділів починається з передачі замовником вихідних даних про поршні, та їхні робочі параметри, у подальшому відбувається оцінювання технологічної можливості виготовлення поршнів, яка включає:

а) найкращий метод виготовлення;  
б) оцінювання можливості виготовлення за допомогою наявного обладнання;

в) оцінювання складності технологічної підготовки;  
– після прийняття рішення про можливість виготовлення поршня вихідна документація або експлуатаційні вимоги передаються в конструкторський підрозділ, де відбувається оброблення цієї документації або розроблення нової.

– створення 3D-моделі проводиться за допомогою САД пакетів різного рівня, безконфліктно працюють в середовищі PDM системи. Надалі 3D-модель поршня є основою, і використовується для різних розрахунків на міцність, з використанням CAE систем;

– за цим здійснюється моделювання процесу виробництва литого поршня за допомогою ІКС різного рівня, а після аналізування отриманих результатів моделювання вносяться зміни в 3D-моделі деталі та виливки. Причому, при внесенні деяких поправок, пов'язаних з ливарними дефектами, у 3D-модель деталі виробляються повторні конструкційні розрахунки поршня з подальшим внесенням поправок в конструкцію [35].

Науковці окремо наголошують, що такий метод проектування забезпечує постійну та повну взаємодію технічних підрозділів, що відповідають за випуск якісного виробу. Взаємодія здійснюється на основі 3D-моделі, в яку вносяться поправки та автоматично враховуються в електронних документах, що випускаються підрозділами. Для розрахунків на міцність поршнів, використовується певна геометрична конфігурація деталі із заданого конструкційного матеріалу, але без урахування реальних технологічних

факторів, що виникають в процесі лиття [35]. Результати існуючих експериментальних досліджень поширюються на групу фізично подібних процесів – фізичного моделювання.

Існує два найбільш відомих методів чисельного моделювання процесів затвердіння литого поршня: масштабування та аналогування [36, 37]. Як зазначено в наукових працях, для побудови математичних моделей для розрахунку охолодження литого поршня в формі раніше використовувалися методи чисельного моделювання та експериментального дослідження [36-40]. При чисельному моделюванні крайових задач числові значення критеріїв подібності та змінні задають, а значення залежних змінних обчислюють, в порівнянні з аналогуванням або масштабуванням, при якому усі величини вимірюють.

Чисельні методи фізичного моделювання затвердіння литого поршня в формі вимагають застосування спеціальних статистичних методів, за допомогою яких підвищується точність підсумкових значень вимірюваних величин. Використання для обробки результатів моделювання методами математичного планування багатofакторних експериментів надає можливість зменшити вплив випадкових похибок, представити результати розрахунку у вигляді поліноміальної математичної моделі, котра є трудомістким процесом, що займає досить велику кількість часу на обробку даних.

Слід підтримати позицію науковців стосовно того, що існуючі методи чисельного моделювання, з використанням фізичних моделей ливарних процесів, які відбуваються в результаті охолодження виливка у формі, є трудомісткими, при цьому варіювання різними технологічними параметрами є практично неможливим. Згідно з вимогами, що пред'являються до конструкторсько-технологічного проектування для створення універсальної технології спільного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів ДВЗ використовуються спеціалізовані ІКС [41-44].

## **1.5 Комп'ютерно-інтегровані системи аналізу теплового, напружено-деформованого стану та моделювання процесів лиття поршнів двигунів**

В даний час для розрахунку поршнів використовуються найбільш поширені кінцево-елементні CAE-системи, серед яких: ANSYS, ABAQUS, MSC/NASTRAN, COSMOS/M. Найбільшого поширення за кордоном і на вітчизняному ринку отримали системи ANSYS і COSMOS/M, котрі вбачаємо за доцільне розглянути докладніше.

Так, COSMOSWorks потужний і простий у використанні програмний комплекс для проведення інженерних розрахунків, створений для аерокосмічної промисловості, що дозволяє вирішувати будь-які інженерні завдання [45, 46]. Використання інтегрованого рішення SolidWorks і COSMOSWorks дозволяє ефективно вирішувати різні завдання: лінійний статичний аналіз, тепловий аналіз, спільний термостатичний аналіз, розрахунок збірок з використанням контактних елементів, нелінійні розрахунки, оптимізація конструкції, визначення довговічності конструкції. Продукт COSMOSWorks Professional не створює контактних елементів між деталями в автоматичному режимі, вимагає ставити кожен контактний елемент типу «вузол-вузол» або «вузол-поверхня» вручну.

Програмний комплекс ANSYS відноситься до числа лідерів, як і багато інших CAE-пакетів для математичного моделювання різних фізичних процесів використовує метод кінцевих елементів, що знаходить відображення у низці наукових праць [47–54]. Основним напрямом розвитку програмного коду ANSYS стала реалізація багатодисциплінарного інженерного розрахунку. В даний час програмний комплекс охоплює практично всі види інженерного аналізу:

- від механіки деформованого твердого тіла і теплового аналізу до гідрогазодинаміки та аналіз процесів горіння та вибуху;
- тепло-масообміну і фазових переходів електродинаміки;
- дозволяє вирішувати завдання спільно з розрахунком втомних характеристик і процедурами оптимізації.

До складу програмного комплексу інженерного аналізу ANSYS Workbench Products входить програмний модуль FE Modeler, що призначений для редагування сітки KE. За умови його використання з'являється можливість транслювати дані вхідного файлу NASTRAN або дані з розрахункової моделі Design Simulation в дані вхідного файлу ANSYS input file.

Для моделювання лиття поршнів двигунів внутрішнього згорання найбільш поширеними є дві моделюючі системи: ProCast і MagmaSoft. За даними виробників, на кожному з цих систем за період близько 10 років, було придбано досить велику кількість ліцензій по всьому світу [55]. Зазначимо, що у Європі найбільш популярною є система MagmaSoft, в США – більш популярна система ProCast. Крім того, певний сегмент ринку в Європі займають системи WinCast (раніше мала назву Simtec) і NovaFlow (на вітчизняному ринку ця система має назву LVMFlow). В Україні та країнах СНД лідером за поширеністю є два системних продукти: Полігон і LVMFlow. Наприклад, кількість ліцензій на Полігон перевищує усі інші ливарні системи разом узяті, включаючи ProCast, MagmaSoft й інші, менш відомі.

MagmaSoft – німецький моделюючий пакет програм, який базується на методі кінцевих різниць, один з перших комерційних пакетів, котрий вперше дозволив моделювати складні ливарні процеси на досить високому рівні. Чисельними методами в MagmaSoft вирішуються теплові, гідродинамічні та деформаційні процеси. Також чисельним методом вирішується завдання прогнозу макropористості й раковин, хоча використовувані при цьому моделі носять явно спрощений характер, що не відображає сучасні уявлення про складний і динамічний характер структурованості сплавів в інтервалі затвердіння. Прогноз мікропористої, структурної, механічної та інших характеристик литої деталі проводиться на рівні критеріального аналізу, який передбачає обробку базових полів, розрахованих чисельними методами за допомогою відносно простих критеріїв [55, 56].

ProCast – американський кінцево-елементний пакет, за об'єктивними показниками більш потужний, ніж MagmaSoft тому, що крім власне переваг

елементного підходу, в ProCast використовуються більш складні і фізично-універсальні моделі, що істотно підвищує адекватність розрахунків. У ProCast чисельними методами моделюються теплові, гідродинамічні і деформаційні процеси, а також процеси структуроутворення (кристалізаційні процеси). ProCast має власний генератор кінцево-елементних мереж, яким можна з успіхом користуватися для геометрій середньої складності. Наголосимо, що ProCAST дозволяє:

- прогнозувати мікроструктуру більшості багатокомпонентних сплавів, використовуючи модель, яка об'єднує макроаналіз процесу теплопереносу у всіх частинах виливки із зародженням і зростанням зерен;

- моделювання, що полягає в об'єднанні чисельних методів з термоаналізу для визначення граничних умов і теплофізичних властивостей виливки та форми;

- здійснювати розрахунок залишкових напруг і деформацій за спеціальним алгоритмом, що забезпечує аналізування контакту між відливанням і формою.

В результаті можна отримати інформацію про температурні поля, поля швидкостей, пористості, тріщини, внутрішні напруження у виливках. Використання програмного пакета ProCAST при моделюванні процесу отримання виливки дозволяє:

- простежувати гідродинаміку розплаву в процесі заливки при різних способах підведення металу в форму;

- досліджувати температурний режим затвердіння виливки;

- спрогнозувати появу усадочних дефектів.

Для складних геометричних моделей зазвичай доводиться користуватися спеціалізованими зовнішніми генераторами, які в даний час є на ринку [55, 56].

WinCast – чисельні рішення в даній ІКС проводяться на базі сучасного методу скінченних елементів. Незважаючи на те, що в WinCast є певні спрощення при вирішенні таких основних технологічних задач, як теплова (затвердіння) і усадочно-фільтраційна (утворення мікропористості, макропористі та раковин), коли на досить високому рівні моделюються

деформаційні процеси під час охолодження литої деталі, що для ряду ливарних виробництв є вельми привабливим.

Полігон – кінцево-елементний пакет, що почав створюватися ще на схилі 80-их років на замовлення Міністерства оборонної промисловості для заводів міністерства. В даний час він також залишається найбільш поширеним на підприємствах оборонного комплексу, однак, в останні 10-15 років став активно застосовуватися в технічних університетах. У системі Полігон чисельними методами вирішуються завдання моделювання гідродинамічних, теплових і усадочних-фільтраційних процесів. Методами критеріального аналізу вирішуються завдання прогнозу міцності, твердості, структурних параметрів, розмиву форм і т.п.

LVMFlow – пакет прикладних програм, був розроблений в кінці 80-их років, первинна назва – ЛВМ-3D; найбільш відомий вітчизняний пакет для моделювання технологічних параметрів виробництва литих деталей. В даному пакеті прикладних програм використовується метод кінцевих різниць, проте не дивлячись на всі недоліки, LVMFlow може цілком адекватно застосовуватися для моделювання технологічних процесів лиття. За такими показниками, як: швидкість розрахунків; зручність інтерфейсу і деяким іншим важливим параметрам, LVMFlow цілком може становити конкуренцію будь-яким різницеvim західним пакетам, хоча звичайно-елементні пакети типу ProCast об'єктивно мають більш широке коло застосування за складністю геометрії виливків і способам лиття [55, 56 ].

Виходячи з перерахованих вище порівняльних рекомендацій щодо застосування прикладних інтегрованих комп'ютерних систем, призначених для моделювання процесів лиття та розрахунку теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ, були зроблені наступні висновки:

– для моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ обраний пакет прикладних програм комп'ютерного моделювання LVMFlow через кінцево-різницеvim алгоритмів розрахунку, що забезпечують стабільну роботу розрахункової станції при відносно малому споживанні її апаратних ресурсів,



зручності інтерфейсу, швидкості розрахунків і малої вартості пакета програм. Застосування кінцево-різницевих чисельних моделей вимагає точного призначення початкових і граничних умов, а також створення звичайно розносної мережі;

– для інженерного моделювання теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ обраний комплекс ANSYS, що має високу взаємодію з існуючими CAD і CAE системами, що, у свою чергу, має повну взаємодію з Workbench Products і класичним ANSYS, а також досить велику кількість математичних рішень, що дозволяють швидко і якісно проводити розрахунки в Workbench Products [47, 50 52].

Жодна з перерахованих вище комп'ютерно-інтегрованих систем не дозволяє вирішити задачу моделювання теплових, гідродинамічних параметрів лиття з урахуванням технологічних факторів. Виходячи з цього потрібно застосовувати моделювання теплових гідродинамічних параметрів лиття в різних CAD і CAE системах для вирішення поставленого завдання.

## **1.6 Висновки по розділу 1**

В результаті огляду джерел, присвячених сучасним методам проектування, технологій виробництва, а також моделювання процесів виробництва литих поршнів двигунів зроблені наступні висновки:

1) Сучасні методи проектування литих поршнів двигунів з безперервною конструкторсько-технологічною взаємодією є потужним інструментом у розробці та вдосконаленні способів їх виготовлення, проте, оцінювання впливу технологічних факторів на їх якість вимагає уточнення. Аналізування причин виникнення деформацій, дозволило зробити висновок, що створення на етапі проектування оптимальної за розмірами, конфігурацією, технологічної конструкції дозволяє знизити ймовірність появи в ній дефектів в процесі виготовлення і експлуатації. Доведено, що системний підхід до розробки конструкції поршня, як елемента циліндро-поршневої групи і двигуна в цілому,

дозволяє визначати оптимальні комбінації матеріалів, технологічних прийомів і конструктивних рішень. Встановлено, що базовим показником може бути питома або відносна металоємність, віднесена до одиниці потужності машини чи механізму, досягнутому рівню для даного класу деталі або еталону.

2) Аналізування існуючих способів лиття дозволило встановити, що: лиття в кокіль є найбільш простим технологічним процесом, котрий дозволяє використовувати поршневі сплави з низьким коефіцієнтом лінійного розширення і отримувати виливки складної конфігурації; заготівки, котрі отримані гарячим штампуванням сплавів, що деформуються, відрізняються високою якістю, але ці сплави у порівнянні з ливарними мають на 15...20 % вищі значення коефіцієнта лінійного розширення, а коефіцієнт використання металу при гарячому штампуванні ще менший, ніж при литті в кокіль, оскільки метал йде у відходи ковальського виробництва; рідке штампування поршнів є кращим за наведені вище тому, що поєднує їхні переваги та використовується для виробництва поршнів, до яких пред'являються особливі вимоги щодо міцності.

3) Наголошено, що в існуючих вітчизняних і зарубіжних наукових працях досить повно досліджено новоутворення ливарних (газоусадочних) дефектів в поршнях, зокрема, в поршнях з алюмінієвих сплавів, але не висвітлено питання визначення впливу на якість поршня його розмірів і характерних місць розташування. Доведено, що для ефективного управління якістю виливків необхідні кількісні критерії для їхнього оцінювання. Встановлено, що існує пряма залежність якості виливки від її точності, чистоти поверхні та рівня механічних властивостей, і зворотна, від частоти новоутворень в ній ливарних дефектів, що правильно відображає взаємозв'язок якості виливки з її основними параметрами. Доведено, що підвищення якості виливки безпосередньо пов'язане з вирішенням одного з головних завдань – зниженням її металоємності, при цьому для зниження маси литої виливки необхідно мати такі функціональні характеристики, як: надійність, довговічність, гарантований рівень несучої здатності, тощо.

Оцінюючи якість відливання слід звернути увагу на ефективність виконання нею своєї функції, пов'язаної з передачею або сприйняттям деяких дій завданих іншими елементами системи, коли за системну характеристику доцільно прийняти її ресурс, протягом якого поршень не досягає граничного стану із заданою ймовірністю. Значимість і універсальність даного параметра чітко простежується в тому, що ресурс вилівки визначається її конструкцією, металоємністю, механічними властивостями металу, наявністю технологічних дефектів і якістю технології виготовлення, а також значенням і ступенем розподілу робочих навантажень, які впливають на деталь в режимі її нормального функціонування, а практично єдиним ефективним методом дослідження ресурсу литої вилівки є метод машинного моделювання.

4) Існуючі математичні методи інженерного моделювання литих поршнів широко застосовуються в ІКС, а результати моделювання є досить точними. Акцентовано, що існуючі методи чисельного моделювання, з використанням фізичних моделей ливарних процесів, які відбуваються в результаті охолодження вилівка у формі, є трудомісткими, при цьому варіювання різними технологічними параметрами є практично неможливим. Згідно з вимогами, що пред'являються до конструкторсько-технологічного проектування для створення універсальної технології спільного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів ДВЗ використовуються спеціалізовані ІКС.

5) На основі порівняльних рекомендацій щодо застосування прикладних інтегрованих комп'ютерних систем, призначених для моделювання процесів лиття та розрахунку теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ встановлено, що: *для моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ* обраний пакет прикладних програм комп'ютерного моделювання LVMFlow через кінцево-різницевих алгоритмів розрахунку, що забезпечують стабільну роботу розрахункової станції за відносно малого споживання її апаратних ресурсів, зручності інтерфейсу, швидкості розрахунків і малої вартості пакета програм; застосування кінцево-різницевих чисельних моделей вимагає точного призначення початкових і граничних умов, а також створення звичайно різносної

мережі; для інженерного моделювання теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ обраний комплекс ANSYS, що має високу взаємодію з існуючими CAD і CAE системами, що, у свою чергу, має повну взаємодію з Workbench Products і класичним ANSYS, а також досить велику кількість математичних рішень, що дозволяють швидко і якісно проводити розрахунки в Workbench Products. Доведено, що жодна з наведених вище комп'ютерно-інтегрованих систем не дозволяє вирішити задачу моделювання теплових, гідродинамічних параметрів лиття з урахуванням технологічних факторів. ІКС для інженерного моделювання технологічних процесів виробництва литих поршнів, є ефективними для проектування нових двигунів і модернізації існуючих. Розглянуті ІКС забезпечують достатню точність результату для оцінювання впливу технологічних факторів на розміри ливарних дефектів поршнів, але необхідне створення методу їх спільного використання в рамках комп'ютерно-інтегрованого проектування.

Аналізування сучасних методів проектування і методики аналізу міцності литих поршнів ДВЗ показав, що створення технології комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів зі спільним моделюванням теплових, гідродинамічних параметрів лиття, а також облік впливу технологічних параметрів на розміри ливарних дефектів поршнів є актуальною науково-практичною задачею.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ 3D - МОДЕЛІ ВИЛИВКИ ПОРШНЯ

Тривимірне зображення складної проектованої деталі значно полегшує її сприйняття і спрощує процес розробки ливарної технології – добре видно особливості конструкції, термічні вузли тощо. Оскільки аналізування існуючих способів виготовлення поршнів показало, що для високонавантажених поршнів дизельних двигунів досить прийнятним є кокільне лиття, створення 3D-моделі виконувалося з урахуванням вимог, котрі пред'являються до виливків, одержуваних в кокілі.

### 2.1 Розробка конструкції виливки поршня

У наукових працях теоретичного та прикладного характеру [7, 8, 10, 12, 14, 15, 17, 57] викладені загальні вимоги до відливок, які отримують в кокілях, а саме:

- габаритні розміри виливків мають бути якомога меншими, а їхня конфігурація повинна забезпечувати можливість використання кокілів з плоскими роз'ємами і металевими стрижнями, при цьому найкраще коли мінімальною є кількість роз'ємів форми і кількість стрижнів;

- потрібно передбачити обтічну конфігурацію виливків, тобто, конфігурацію без гострих кутів, різких переходів від однієї поверхні до іншої, без високих ребер і виступів, глибоких отворів і поглиблень;

- необхідно правильно вибрати товщини та ухили стінок виливків для того щоб забезпечити заливку і умови живлення всіх елементів;

- у виливках має бути передбачено таке поєднання конструктивних елементів при якому зменшується гальмування усадки і забезпечується легке розбирання форми.

З огляду на наведене, наголосимо – чим повніше конструкція виливки задовольняє перерахованим вимогам, тим вона є більш технологічною. Слід зазначити, що в якості досліджуваної деталі був узятий литий алюмінієвий поршень Д 240-1004021.

Окремо зауважимо, що конструювання виливків з алюмінієвих сплавів має свої особливості. Виливки найчастіше мають газоусадкові дефекти в стовщеннях і теплових вузлах. Тонкі фланці в поєднанні з відносно тонкою стінкою циліндричної частини деталі суперечать умовам спрямованого затвердіння.

Існують різні способи кількісної оцінки технологічності [12]. Один з них полягає у визначенні коефіцієнта габаритності:

$$K_V = V_{\text{габ}} / M_1 \quad (2.1)$$

де:  $V_{\text{габ}}$  – габаритний об'єм виливки;

$M_1$  – маса виливка.

Слід акцентувати на тому, що чим менше  $K_V$ , тим більш технологічна конструкція.

Для оцінки технологічності тонкостінної виливки використовувалося нерівність:

$$200 R_{\text{пр}} / L \geq 1 \quad (2.2)$$

де:  $R_{\text{пр}}$  – приведена товщина;

$L$  – найбільший розмір виливка.

Мінімальні товщини стінок виливків з алюмінієвих сплавів, одержуваних в кокілях, вибиралися відповідно до рекомендацій, визначених у науковій праці [12], котрі зведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Мінімальна товщина стінок виливків для виливків з алюмінієвих сплавів \* [12]

Площа поверхні виливки, см <sup>2</sup>	Мінімальна товщина стінки виливки $\delta_1$ , мм
100...250	2,2...4,0
250...900	2,5...4,5
більше 900	3,5...5,5

\* Менші значення рекомендуються для сплаву АК12, більші – для сплавів АК8МЗч та АМГ5К.

Товщини внутрішніх стінок і ребер жорсткості приймаються рівними  $0,7 \delta_1$ . Плавність переходу від одного елемента до іншого забезпечується за

умови, що:

$$\delta_1' / \delta_1'' \geq 0,8 \quad (2.3)$$

де:  $\delta_1'$  и  $\delta_1''$  – товщини сполучених стінок, а перехід здійснюється на ділянці довжиною:

$$l \geq (4 \div 5)(\delta_1'' - \delta_1') \quad (2.4)$$

Радіуси заокруглень при кутовому з'єднанні стінок приймаються рівними:

$$R = (\delta_1' + \delta_1'') / 2 \quad (2.5)$$

До формули 2.5 зауважимо, що у разі різностінного хрестоподібного зчленування  $R$  має бути не більше товщини тонкої стінки. Ухили стінок виливка з алюмінієвого сплаву обрані виходячи з наступних рекомендацій:

- ухил зовнішньої поверхні виливки повинен складати 1,0...1,5 % від висоти стінки виливки;
- для внутрішніх поверхонь (з боку металевого стержня):
  - а) при висоті стінки до 50 мм - 5,0 %;
  - б) при висоті стінки понад 50 мм – (2,0...2,5) % (для тонкостінних виливків);
- для ухилів внутрішніх стінок і ребер жорсткості, ці значення збільшені в 1,0...3,0 рази [12].

При раціональному конструктивному виконанні елементів кокілю, відпрацьованих режимах їх охолодження і переміщення ухили стінок можуть бути значно меншими.

## 2.2 Вибір положення виливка у формі

Вибір положення виливка у формі та роз'єму кокілю є важливим елементом проектування технологічного процесу лиття. Це пов'язано із тим, що від правильності вибору залежить якість виливків і трудомісткість їх виготовлення, а також стійкість кокілів. Установка виливки в кокіль і поверхні його роз'єму визначалися з урахуванням таких умов:

- затвердіння кожного елемента вилівка та нижнього положення оброблюваних і найбільш відповідальних поверхонь деталі;
- плавного заповнення порожнини кокілю розплавленим металом із дотриманням принципу спрямованого затвердіння і використання найбільш коротких елементів ливникової системи;
  - простого і надійного відводу газів з кокілю;
  - зручного для зачистки розташування заток по поверхні роз'єму кокілю;
  - зміщення гострих кромek розташування поверхні роз'єму форми;
  - зручного для обробки різанням розташованих базових і настановних поверхонь;
    - максимального використання металевих стрижнів;
    - легкого вилучення виливків з кокілю;
    - використання механізованих і автоматизованих засобів для збирання, розбирання і заливки кокілю, а також для вилучення з нього вилівка;
    - застосування найбільш стійкого, технологічного у виготовленні та ремонтпридатною конструктивного виконання кокілю.

Зазначимо, що значення кожного з наведених вище умов залежить від багатьох факторів. За умови механізованого виробництва найбільш зручним, з точки зору: вилучення вилівки з форми, заливки металу за допомогою заливальних машин, механізованого очищення та фарбування, є кокіль з вертикальною площиною роз'єму.

Вибір положення вилівки у формі, визначення меж стрижнів і призначення припусків на механічну обробку дозволило розрахувати масо-центрувальні характеристики вилівки поршня.

Отримане значення маси вилівки було використано для розрахунку ливниково-живильної системи. Для визначення геометричних розмірів живильних елементів необхідно знати значення маси, або обсягу термічних вузлів вилівка. Застосовуючи можливості програм SolidWorks і LVMFlow, вилівок розбивався на частини – термічні вузли, і були розраховані їх масо-центрові характеристики.



### 2.3 Розробка ливниково-живильної системи

Питання розробки ливниково-живильних систем для кокілів і розрахунки їх елементів відображені в наукових теоретичних та прикладних працях [10–12, 14, 15, 17, 57–63]. Проектування ливниково-живильної системи здійснюється в такій послідовності:

- вибирається тип системи;
- визначаються: конструктивне виконання обраного типу (конфігурація стояка, форма поперечного перерізу стояка, живильника та інших елементів);
- розраховуються розміри елементів системи.

У процесі проектування ливникової системи, яка використовується в кокілі, враховувалися загальні вимоги, що пред'являються до ливникових систем і спеціальні вимоги, пов'язані з особливостями технології. При цьому слід зважати на те, що конструкція ливників істотно впливає на стійкість кокілів.

Ливникова система має:

- забезпечувати спокійне, плавне надходження розплаву в порожнину форми;
- надійне уловлювання окисних полон і шлакових включень;
- запобігати їх утворенню в каналах ливникової системи і порожнини кокілю,
- сприяти спрямованому твердінню та живленню масивних вузлів вилівки.

Під час розробки систем ливників для виливків циліндричного типу з алюмінієвих сплавів (йдеться про АК12М2МгН) дотримувалися такі умови заповнення форми металом:

- відсутність завихрень в металі, що не утворюють турбулентний характер руху;
- отримання стійкого ламінарного руху, при зазначеній вище мінімальній швидкості  $V_{cp} = 0,5$  м/сек [58, 59, 60];
- уникнути заплеску металу в місцях переходу від тонких до товстих, і навпаки.

Зазначимо, що під час виконання цих умов у тілі виливка утворюється менша кількість неметалевих включень, газових раковин і дефектів усадкового характеру.

У процесі лиття днищем вгору переважно використовується верхня подача металу та установка верхнього прибутку. Це створює більш сприятливі умови для живлення потовщеної частини поршня – днища. Однак, верхня подача металу обмежується висотою виливки, оскільки під час лиття високих поршнів створюється небезпека розбризкування металу, забруднення його неметалічними включеннями і утворення завороту.

Сифонне підведення металу зменшує ефективність використання верхньої прибутку. Окремо зазначимо, що такий спосіб може бути успішно використаний тільки за умови простої конфігурації внутрішньої порожнини виливка. Як правило, його застосовують тільки для поршнів із діаметром до 100 мм [12].

Живильник, зазвичай, застосовують щілинний, котрий має висоту майже рівну висоті поршня. Іноді роблять більш низькі живильники, коли підводять метал тільки в нижню частину.

Науковцями визначено, що стояк виконується таким способом, щоб забезпечити спокійне заповнення форми металом і запобігти попаданню окисних полон. Поширеними є стояки типу «гусячої шийки», але застосовують також змієподібні та прості похили [57].

Слід враховувати, що для лиття поршнів із заевтектичних силумінів застосовується «олівцева» ливникова система. В цьому випадку стояк складається з чотирьох каналів, розташованих в половинках кокілю в шаховому порядку. З огляду на близьке розташування каналів (не більше 2 мм) охолодження в них сповільнюється. Перемички між каналами мають достатню товщину (до 14 мм), щоб протистояти викришування через розпал і тріщини. У нижній своїй частині канали з'єднуються загальним щілинним каналом з меншою площею поперечного перерізу. Метал у прибуток підводиться по дотичній, щоб створити додаткове гальмування [12].

Встановлено, що верхні системи забезпечують найбільш високу стійкість кокілів. Крім того, такі системи дуже економічні. Разом з тим такі системи не поступаються нижнім (сифонним) щодо зменшення в виливках неметалевих включень.

Врахуємо, що бічні, ярусні та нижні ливникові системи застосовують, зазвичай, при виготовленні високих (в положенні заливки) і складних виливків. Для отримання виливків з алюмінієвих сплавів можна використовувати будь-яку з ливників, призначених для кокільного лиття.

Для виготовлення з алюмінієвих сплавів виливків з розвиненою поверхнею і досить великою висотою  $h_{\text{від}}$  ( $h_{\text{від}}/\delta_1 > 50$ ) широко застосовуються ярусні системи. Такі системи забезпечують хорошу заповнюваність форми та раціональне живлення вилки завдяки подачі найбільш перегрітого розплаву в прибуткову частину. Обов'язковим елементом систем для таких виливків є наявність вертикального колодязя.

На переконання науковців у процесі лиття алюмінієвих сплавів іноді використовують ливникові системи до мінливих в часі гідравлічних характеристик [61]. До таких систем відносяться:

- системи з мішковим фільтром;
- з конічним стопором в стояку;
- з поршнем в стояку;
- з гофрованим стояком змінної висоти.

Слід наголосити, що у системі з мішковим фільтром трубка виводиться з порожнини форми у міру подачі рідкого металу, що забезпечує подачу найбільш гарячого розплаву в верхню частину вилки і очищення розплаву від включень протягом всього періоду заливки. Поряд із цим, у системах інших конструкцій створюються умови для заливки з малою початковою швидкістю і подальшого збільшення швидкості по заданому закону.

Окремо констатуємо, що у процесі лиття циліндричних деталей (поршнів, втулок) використовуються бічні системи зі щілинними живильниками. Для таких

виливків виконується також підведення знизу через кільцеві живильники, що забезпечує плавну заливку порожнини форми.

### 2.3.1 Розрахунок елементів ливникової системи

Розрахунок розмірів ливникової системи розпочато з визначення витрати металу  $Q_\phi = dV/dt$  через елементи системи і, отже, через робочу порожнину кокілю. Середні витрати за період заливки визначено зі співвідношення:

$$\bar{Q}_\phi = V_{от}/t_{зал} \quad (2.6)$$

де:  $V_{от}$  – обсяг металу, що заливається в форму;

$t_{зал}$  – період заливки.

Вибір параметрів  $\bar{Q}_\phi$  та  $t_{зал}$  в загальному випадку пов'язаний із необхідністю врахування багатьох факторів: властивостей розплаву, матеріалів форми і її покриття, режимних параметрів заливки, конфігурації виливки тощо. Облік усіх перерахованих факторів при досить суворому теоретичному підході вкрай складний. Тому для визначення шуканих величин доцільно використовувати напівемпіричні формули. Так, для визначення  $t_{зал}$  використовували співвідношення виду:

$$t_{зал} = AG_1^n \quad (2.7)$$

або:

$$t_{зал} = A_1 \delta_1^m G_1^n \quad (2.8)$$

де:  $A, A_1, m, n$  – константи, визначеними по практичним даним;

$G_l$  – маса відливки.

Необхідно зазначити, що формули (2.7) та (2.8) придатні тільки для орієнтовних розрахунків.

Зі швидкістю руху витрата розплаву  $Q_\phi$  пов'язана співвідношенням:

$$w = Q_\phi/F \quad (2.9)$$

де:  $F$  – площа поперечного перерізу елемента, що розглядається формою або ливниковою системою.

Слід враховувати, що при  $w \leq w_{max}$  забезпечується допустима ступінь турбулентності потоку і, як наслідок, виключається інтенсивне забруднення розплаву неметалічними включеннями, що утворюються в процесі заливки. А також те, що при  $w \geq w_{min}$  забезпечується надходження останніх порцій розплаву в форму досить перегрітими. Максимальна швидкість визначається гідромеханічними факторами; мінімальна – тепловими.

Згідно з експериментальними даними з наукової праці [61]  $w_{max}$  визначається значенням критерію Рейнольдса за формулою:

$$Re_{max} = \frac{4w_{max}R}{\nu} \quad (2.10)$$

де:  $R$  – гідравлічний радіус розглянутого перетину;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Тепловий фактор, що обмежує значення  $w_{min}$ , пов'язаний з процесом охолодження, рухається в формі розплаву до деякої температури, яка в граничному випадку дорівнює температурі затвердіння. Для визначення мінімальної швидкості використовується емпіричне співвідношення [62]:

$$w_{min} = \frac{0,22L^{1/2}}{\delta_1 \ln \frac{T_{зал}}{380}} \quad (2.11)$$

де:  $L$  – висота відливки;

$T_{зал}$  – температура заливки, °С.

Встановлено, що рівняння (2.11) дає надійні результати при литті в металеві форми виливків з алюмінієвих сплавів в разі, якщо  $\delta_1 = 4 \div 8$  мм. У цьому випадку під  $w_{min}$  розуміється початкова швидкість заливки.

Визначення значень  $w_{max}$  та  $w_{min}$  в порожнині кокілю, а також визначення  $t_{зал}$  є першим етапом розрахунку ливникової системи. Мета цього етапу – знайти максимальне, мінімальне та середнє значення витрати металу.

Наступний етап розрахунку ливникової системи пов'язаний з визначенням площ поперечного перерізу її елементів – стояка, ливникового ходу або шлаковика і живильників. Розміри елементів систем літників для виливків з алюмінієвих сплавів визначають, виходячи з таких положень:

– значення критерію  $Re$  для різних елементів ливникової системи не повинні перевищувати розміри, що гарантують мінімальне потрапляння окислів і неметалевих включень в форму внаслідок порушення суцільності;

– швидкість руху розплаву в формі повинна забезпечити її заповнення без утворення в литві неспаїв.

Спочатку знаходиться площа поперечного перерізу вузького перетину ливникової системи, а потім площі інших її елементів. У процесі розрахунку вертикально-щілинної системи для виливків з алюмінієвих сплавів визначається сумарна товщина всіх вертикальних щілин:

$$\sum \delta_{щ} = (0,008 \div 0,012)P_{\phi} \quad (2.12)$$

де:  $P_{\phi}$  – повний змочений периметр перетину виливка на рівні підведення металу.

Потім визначається товщина однієї щілини:

$$\delta_{щ} \leq (0,7 \div 1,0)\delta_1 \quad (2.13)$$

і необхідну кількість щілин:

$$n = \sum \delta_{щ} / \delta_{щ} \quad (2.14)$$

а також визначається ширина щілини  $l_{щ}$  і діаметр колодязя  $d_k$ :

$$l_{щ} = d_k \geq 4\delta_{щ} \quad (2.15)$$

Після цього обчислюється витрата металу з урахуванням щілин і колодязів та визначається площа поперечного перерізу стояка.

Акцентуємо також на тому, що для отримання якісних виливків швидкість руху розплаву повинна спадати від перетину стояка до живильника. Тому для виливків з алюмінієвих сплавів застосовують ливникові системи що розштрюються зі співвідношенням:

$$f_c : f_k : f_{\Pi} = 1 : 1,5 : 2 \text{ чи } f_c : f_{\Pi} = 1 : 2 \quad (2.16)$$

де:  $f_c$ ,  $f_k$ ,  $f_{\Pi}$  – площі поперечного перерізу стояка, колектора, живильника відповідно.

Під час лиття дрібних і середніх виливків в кокіль, до яких і відносяться виливки поршнів, площу поперечного перерізу стояка визначають за формулою:

$$f_c = \frac{G}{\mu \cdot \beta \cdot t \cdot \sqrt{H}} \quad (2.17)$$

де:  $G$  — маса відливки, кг;

$\mu$  — коефіцієнт опору,  $\mu = 0,6 \dots 0,7$ ;

$t$  — час заливки;

$$\beta = \gamma \sqrt{H} \quad (2.17a);$$

$H$  — статичний напір,  $H=120$ мм.

Визначивши за формулою (2.16)  $f_c$ , по співвідношенню (2.15) знаходили площі поперечного перерізів інших елементів ливникової системи. В коєлі виконують канали ливникової системи відповідно до мінімальних розрахункових розмірів, які при доведенні технології відливання, в разі необхідності, збільшують або зменшують.

### 2.3.2 Конструктивний розрахунок модернізованої ливникової системи

На підприємствах до теперішнього часу для лиття поршнів використовували ливникові системи, котрі мають такий вигляд, як наведено на рисунку 2.1.

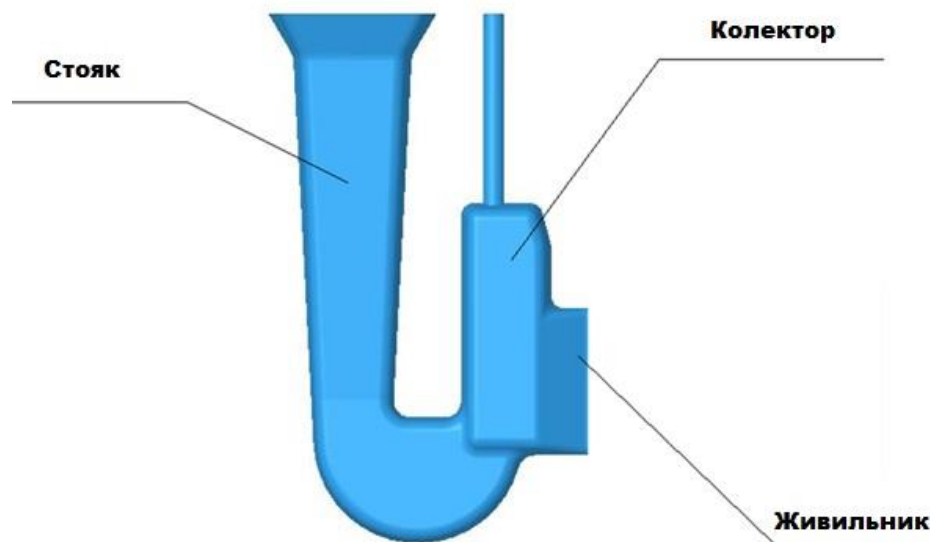


Рисунок 2.1 – Конструкція традиційної ливникової системи.

Слід наголосити на тому, що моделювання виливки в програмі LVMFlow показало, що ливникові системи, котрі існували раніше (рисунок 2.1), працювали

неефективно. Висновок про неефективність було зроблено виходячи з таких параметрів:

- ливникова система для виливків циліндричного типу з алюмінієвого сплаву є системою, котра звужується, типу ( $F_{ст} > F_{кол} > F_{жив}$ );
- рух розплавленого металу у формотворній частині набуває турбулентного характеру;
- конструктивне розташування ливникової системи, щодо виливки, перешкоджає створенню спрямованої кристалізації в литві.

Після аналізування представлених вище недоліків була використана у дослідженні нова ливникова система, розроблена на ПАТ «АВТРАМАТ» (рисунок 2.2) [63]. Відмінними ознаками розробленої ливникової системи слід визнати:

- більш плавні переходи від одних елементів до інших для забезпечення плавності потоку і послідовності заповнення;
- відсутність конструктивного елемента «колектор»;
- меншу вагу.

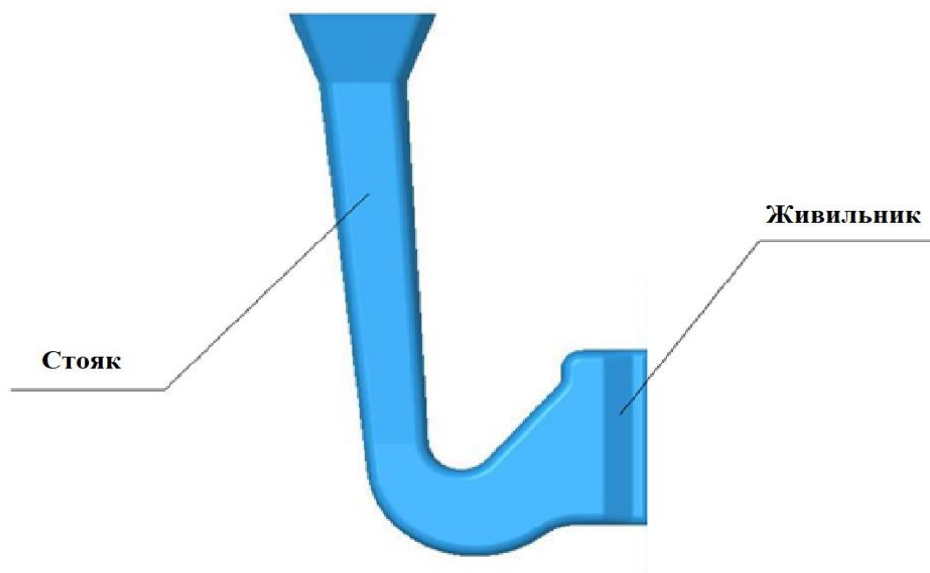


Рисунок 2.2 – Конструкція модернізованої ливникової системи.



Конструктивний розрахунок даної ливникової системи проводився за формулами (2.16) і (2.17).

### 2.3.3 Визначення розмірів живильних елементів

Розміри живильних елементів (прибутків і бобишек) визначалися виходячи з встановлених практикою умов: у будь-який момент часу обсяг рідкої фази в живильному елементі має бути не меншим, ніж дефіцит живлення  $W$  [57], котрий розраховується за формулою:

$$W = \frac{\rho_1 - \rho'_1}{\rho'_1} V_{1\text{ТВ}} = \beta_{\text{затв}} V_{1\text{ТВ}} \quad (2.18)$$

де:  $\rho_1$  – щільність твердого металу;

$V_{1\text{ТВ}}$  – обсяг затверділого металу;

$\beta_{\text{затв}}$  – коефіцієнт об'ємної усадки під час затвердіння;

$\rho'_1$  – щільність рідкого металу.

Повний дефіцит живлення обчислювався за формулою (2.18), за умови прийняття, що  $V_{1\text{ТВ}} = V_{\text{від}}$ . Дана умова є необхідною, але недостатньою, оскільки вона враховує тільки теплофізичні умови процесу живлення. Зазначимо, що під час вибору живильних елементів нами враховувалися також гідродинамічні фактори.

Визначення розмірів живильних елементів, за необхідними умовами, зводиться до побудови діаграми живлення, котра була запропонована А. І. Вейником [12]. За формулами теплової теорії лиття знаходили  $V_{1\text{ТВ}}$ , а потім, використовуючи формулу (2.18), –  $W$ . У подальшому можна було визначити криву зміни обсягу  $W_{\text{п}}$  рідкої фази і прибутку.

Окремо зауважимо, що вибір розрахункових формул виконувався з урахуванням конкретних умов охолодження прибутку з урахуванням того, що розміри елементів мають задовольняти умові  $W_{\text{п}} > W$  у будь-який момент часу, включаючи кінець затвердіння.

У процесі обчислення гідродинамічних факторів під час розрахунку живильних елементів полягав в дотриманні умови, коли:

$$\omega > \beta_{\text{ТВ}} \frac{dV_{\text{ТВ}}}{dt} \quad (2.19)$$

де:  $\omega$  – витрата рідкої фази при вільному перебігу на початковій стадії затвердіння, та при фільтрації через сітку твердого скелета на заключній стадії процесу затвердіння виливки.

Зазначена нерівність на початковій стадії завжди задовольняється, тому відповідний розрахунок полягає у використанні закону Дарсі, тобто:

$$\omega = \frac{K}{g\rho'_1} \frac{dp_1}{dx} S_c, \quad (2.20)$$

де  $K$  – коефіцієнт фільтрації;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$\frac{dp_1}{dx}$  – градієнт тиску;

$S_c$  – площа поперечного перерізу фільтраційного потоку.

Одним з показників ефективної дії живильного елемента, є глибина (дистанція) живлення, яка росте в міру збільшення критерію спрямованого затвердіння. Останній дорівнює тангенсу кута клиновидного м'якого каналу. За малих значеннях критерію, вільна течія розплаву замінюється фільтрацією.

Для наближених розрахунків з урахуванням (2.20) прийнято, що зона дії прибутку:

$$L = t_{\text{затв}} \left( \frac{A\Delta p}{2g(\rho_1 - \rho'_1)} \right)^{1/2} \quad (2.20)$$

де  $t_{\text{затв}}$  – тривалість затвердіння;

$A$  – коефіцієнт;

$\Delta p$  – перепад тиску на довжині  $L$ .

З формули (2.20) випливає, що чим довший процес затвердіння, тим більше  $L$ . В той же час, збільшення тиску в прибутку менш ефективний:  $L$  пропорційно  $\Delta p$  в ступеню  $1/2$ .

## 2.4 Проектування вентиляційних систем

Проектування вентиляційних систем є важливою процедурою при розробці технології лиття в кокіль.

### 2.4.1 Обґрунтування схеми вентиляційної системи

Зазначимо, що монолітні металеві матеріали, котрі використовуються для виготовлення кокілів, мають нульову газопроникність. Необхідність раціональної організації газового режиму металевих форм викликана підвищеною схильністю виливків до газових дефектів екзогенного походження у вигляді недоливів, газових раковин і пор, а також впливом тиску газу на процес заливки металу в кокіль.

Проектування вентиляційних систем кокілів полягає у виборі схем систем, а також у визначенні їх розмірів. Для сполучення робочих порожнин кокілів з навколишньою атмосферою широко використовуються роз'ємні та нероз'ємні стики елементів кокілю – природні зазори між формотворними частинами форми, а також зазори в знаках стрижнів і в отворах штовхачів. Вентиляційні канали, за вказаними стиками, виконуються у вигляді рисок-насічок або тонких щілин. Для вентилявання глибоких порожнин застосовуються вентиляційні пробки.

В якості вентиляційних елементів металевих форм можуть бути використані голчасті вставки-пакети голок, запресовані в наскрізні отвори форм [12]. Зазори між проволокою забезпечують вставкам підвищену газопроникність, котра вимірюється значенням коефіцієнта газопроникності  $K_g$ . Голчасті вентиляційні елементи з боку робочої поверхні форми фарбуються кокільною фарбою. Коефіцієнт  $K_g$  при цьому закономірно зменшується, проте, його значення залишається досить високим.

Найбільш ефективні в якості вентиляційних систем – випори. З їх використанням виникає необхідність у додатковій технологічній операції, пов'язаній з видаленням та зачисткою виливків. Під час конструювання кокілів, вентиляційні елементи розташовувалися у верхній (по відношенню до заливання) ділянках форми, а також в тупикових зонах. Оскільки від

вентиляційних систем всіх типів на поверхнях виливків залишаються відбитки, системи розташовувалися переважно в зоні механічно оброблюваних поверхонь виливків. Площа поперечного перерізу вентиляційних каналів повинна бути мінімальною поблизу підведення розплаву в порожнину кокілю, що пов'язано з підвищеною рідкоплинністю перегрітого металу.

#### 2.4.2 Розрахунок вентиляційної системи

Необхідно акцентувати на тому, що основними факторами, котрі впливають на зміну тиску  $\Delta p_r$ , у загальному випадку є:

- стиснення та розігрів газу металом, що заливається у форму;
- газифікація матеріалу, який покриває кокіль (фарби або облицювання);
- видалення газу з робочої порожнини форми через вентиляційні отвори, як спеціально організовані, так і мимоволі виникненні внаслідок природної нещільності сполучення елементи кокілю.

З урахуванням цих чинників, на переконання деяких авторів [64], розрахунковий апарат зводиться до складання рівняння балансу маси газу та ряду допоміжних співвідношень, які описують процеси зміни маси газу внаслідок функціонування джерел і стоків газу.

Враховуючи те, що у загальному випадку (під час змінення в період заливки масової питомої газотворної здатності одиниці поверхні покриття  $q'_{уд}$ , масової швидкості заливки  $m_o$ , температури  $T$  газу і швидкості зміни площини контакту розплаву з покриттям  $\frac{dS_\phi}{dt}$  диференціальне рівняння, котре описує газовий режим кокілю не вирішується в квадратурі, була запропонована математична модель газообміну в кокілі може бути реалізована у повній мірі за допомогою комп'ютерно-інтегрованих технологій. Зокрема, якщо  $q'_{уд}$ ,  $m_o$ ,  $T$  і  $\frac{dS_\phi}{dt}$  є постійними величинами, то:

$$p_r = \frac{(b-E_1)(1-t/t_{зал})^{E_1\rho'_1/m_o-E_2}(b+E_1)}{2a[(1-t/t_{зал})^{E_1\rho'_1/m_o-E_2}]} \quad (2.21)$$

$$\text{де } E_1 = \left(4aq'_{уд} \frac{p_H}{\rho_H} \frac{dS_\phi}{dt} + b\right)^{1/2};$$

$$E_2 = \frac{2ap_H - b + E_1}{2ap_H - b - E_1};$$

$$a = \sum_{i=1}^n \frac{K_{Гi} S_i}{X_i};$$

$$b = m_0 / \rho'_1 + ap_H$$

$t_{\text{зал}}$  – тривалість заливки;

$\rho'_1$  – щільність металу, який заливається;

$p_H$  – тиск газу в робочій порожнині кокілю у початковий момент часу ( $t = 0$ );

$\rho_H$  – початкова щільність газу;

$K_{Гi}$ ,  $S_i$ ,  $X_i$  – відповідний коефіцієнт газопроникності, площа поперечного перерізу, і довжина  $i$ -го вентиляційного отвору кокілю.

При цьому зауважимо, що параметр « $a$ » є узагальненою характеристикою вентиляційної здатності форми. Якщо припустити, що у формулі (2.9)  $q'_{уд} = 0$ , то можна отримати формулу для розрахунку тиску газу в кокілі з негасотворним покриттям. Проведений аналіз показує, що найбільше значення  $p_{Г}$  досягає до моменту закінчення заливки. Виходячи з цього отримуємо залежність, котра може бути визначена формулою:

$$p_{Гmax} = \frac{b + \left( b^2 + 4a q'_{уд} \frac{p_H dS_{\phi}}{\rho_H dt} \right)^{1/2}}{2a} \quad (2.22)$$

Отже, при допустимому збільшенні тиску газу  $\Delta p_{Г, доп} = p_{Г} - p_H$  необхідна вентиляційна здатність форми за формулою:

$$a = \frac{m_0}{\rho'_1 \Delta p_{Г, доп}} \left( 1 + \frac{1}{R_{пр}} \int_0^{X_n} q_{уд} dx \right) \quad (2.23)$$

З формули (2.23) випливає, що параметр  $a$  прямо пропорційний швидкості заливки, та площі поперечного перерізу лімітує елемент ливникової системи.

Такий висновок повністю відповідає практичному досвіду. Дійсно, на практиці користуються співвідношенням виду:

$$S_B = 1,25S_{\Pi} \quad (2.24)$$

де:  $S_{\Pi}$  – площа поперечного перерізу живильників.

Величина  $\Delta p_{r, \text{доп}}$ , необхідна для розрахунків параметрів вентиляційної системи приймається з умови подолання газом поверхневого натягу розплаву.

## 2.5 Висновки до розділу 2

Підсумком роботи на даному етапі стало створення тривимірної моделі виливки з нанесеними на неї елементами ливниково-живильної системи. За результатами створення 3D-моделі виливки поршня Д 240-1004021 зроблені такі висновки:

- 1) Тривимірне зображення складної проектованої деталі, значно полегшило сприйняття та спростило процес розроблення ливарної технології, це висвітлене тим, що добре видно особливості конструкції, термічні вузли тощо.
- 2) При зменшенні коефіцієнта габаритності виливок став більш технологічним.
- 3) Правильний вибір положення виливка у формі та роз'єму кокілю підвищив якість виливків і знизив трудомісткість їх виготовлення, а також збільшив стійкість кокілів.
- 4) У процесі лиття поршнів використані бічні системи зі щілинними живильниками, а також підведення знизу через кільцеві живильники, що забезпечило плавну заливку порожнини форми.
- 5) Існуючі раніше ливникові системи працюють менш ефективно тому, що конструктивне розташування традиційної ливникової системи відносно виливки перешкоджає створенню спрямованої кристалізації в литві.
- 6) Удосконалена ливникова система забезпечила плавність потоку і послідовність заповнення завдяки більш плавним переходам від одного елемента до іншого та відсутнього конструктивного елемента «колектор».

7) Тривимірна модель вилівка з нанесеними на неї елементами ливниково-живильної системи в подальшому буде використана для моделювання процесів, котрі протікають у ливарній формі під час її заливання та охолодження металу.

## РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ І ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛИТВА ПОРШНІВ

### 3.1 Умови теплообміну в системі виливок – форма – навколишнє середовище

Отримання якісного поршня на етапі лиття складається з двох основних процесів: заливки розплавленого металу в форму та формування литої деталі в процесі фазового переходу під час охолодження та кристалізації. Кожен з цих процесів значний за своєю суттю й широко представлений у наукових працях [8, 10, 12, 14, 15, 17, 36–40, 58–60, 65–72], автори яких є відомими дослідниками в галузях гідродинаміки, теплофізики, фізики твердого тіла, опору матеріалів тощо.

Найбільш важливою умовою у дотриманні вимог до надійності на початкових етапах виробництва є отримання якісних литих поршнів заданої геометричної конфігурації з допустимим вмістом дефектів, що виникають в процесі охолодження (наприклад: усадкова рихлота, усадкові раковини, газова пористість, гарячі тріщини, залишкові напруги та деформації). Взаємодія розплаву з формою під час заповнення, охолодження та кристалізації обумовлює формування заданих властивостей литого поршня. Ця сукупність процесів досліджувалася як на тепловому рівні, так і на теплокінетичному. Кристалізація розплаву в ливарній формі у процесі формування литої деталі була розглянута відповідно до теорії теплопровідності з урахуванням теплообміну розплаву з формою та кінетичному росту кристалів під час охолодження.

Основними параметрами, що розглядаються в даних дослідженнях, були спрямованість кристалізації та охолодження литого поршня в формі, які залежать від фізичних характеристик системи «метал – форма – навколишнє середовище», геометричних характеристик поршня, початкових умов системи і граничних умов.



У процесі дослідження теплообміну для системи «виливок – форма – навколишнє середовище» використовувалися характеристики, які описуються диференціальним рівнянням:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (3.1)$$

за умови, що  $W=0$  та  $w_x = w_y = w_z = 0$ .

Зазначимо, що у рівнянні (3.1):

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·К);

$c$  – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>.

Величини  $\lambda$ ,  $c$  і  $\rho$  задавалися функціями у залежності від температури. Додатково були введені характеристики навколишнього середовища, що визначаються граничними умовами:

а) граничними умовами I роду в рівнянні не враховувалися неоднорідності розподілу температури на поверхні виливки поршня:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = T_0 \equiv const, \quad (3.2)$$

б) граничні умови II роду не враховували неоднорідність розподілу градієнта температурного поля виливки поршня у всіх точках на поверхні. Таким чином, рівняння теплообміну виливки з навколишнім середовищем доцільно прийняти у вигляді [37]:

$$-\lambda(\text{grad}_m T)_0 = q_0(t) \quad (3.3)$$

де:  $q_0(t)$  – поверхнева щільність теплового потоку [55].

Також можливим вбачається і окремий випадок за формулою (3.3), котрий можна представити так:

$$-\lambda(\text{grad}_m T)_0 = q_0 \equiv const \quad (3.4)$$

в) граничну умову III роду отримано з (3.3) урахуванням, що функція  $q_0(t)$  представлена у вигляді, який відповідає закону тепловіддачі [37]:

$$-\lambda(\text{grad}_m T)_0 = \alpha (T_0 - T_c) \quad (3.5)$$

де:  $T_0$  і  $T_c$  – температура граничної поверхні виливки поршня і навколишнього середовища, відповідно;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Слід наголосити, що у цьому виразі крім фізичних характеристик  $\lambda$ ,  $c$  і  $\rho$  тіла передбачається завдання значення для коефіцієнта тепловіддачі, а також початкове значення функції  $T_c(t)$ .

Для відображення теплової взаємодії між двома контактуючими твердими поверхнями вбачаємо за доцільне використовувати *граничні умови IV роду*, закон теплопровідності Фур'є:

$$-\lambda_1(\text{grad}_m T_1)_0 = -\lambda_2 (\text{grad}_m T_2)_0 \quad (3.6)$$

$$(T_1)_0 = (T_2)_0 \quad (3.7)$$

Подальше рішення крайових задач з використанням чисельних методів застосовувалося для побудови математичних моделей і моделювання.

### **3.2 Методика інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення**

Процеси проектування, технологічна підготовка та виробництво литих поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення є невід'ємною частиною системного підходу, тобто сукупністю взаємопов'язаних у часі процесів послідовної зміни стану деталі. У сучасних умовах до продукції, що випускається, пред'являється ряд вимог у тому числі провідними є якість, низька собівартість і мінімальний час розробки нових виробів, що може бути досягнуто із застосуванням моделювання в рамках технології конструкторсько-технологічного проектування.

Важливим етапом розробки технологічного процесу слід вважати інженерне моделювання ливарних процесів виготовлення деталей. В якості інструментарію для інженерного моделювання процесу лиття поршнів нами була обрана ІКС LVMFlow. Як було описано вище, LVMFlow – це звичайно-різницевий комплекс програм за допомогою якого чисельними методами

вирішуються завдання математичного моделювання гідродинамічних, теплових і усадкових-фільтраційних процесів.

Окремо необхідно наголосити, що кожна з розглянутих задач має свої особливості вирішення, способи завдання початкових і граничних умов, які враховані в математичних моделях литих деталей поршнів. Математичні моделі, на основі яких відбувається моделювання процесів, що розглядаються, є аналогами відомих раніше звичайно-різницевих моделей, закладених творцями даної ІКС, і є їхньою інтелектуальною власністю.

В основі моделі фазового переходу при охолодженні сплавів ІКС LVMFlow лежить квазірівноважна теорія. Фазові переходи під час охолодження сплавів лежать в інтервалі температур від температури ліквідусу ( $T_{\text{лик}}$ ) до температури солідусу ( $T_{\text{сол}}$ ),  $T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}$ . У цій зоні, котру називають двофазною зоною, присутні як рідка, так і тверда фаза. За цих умов утворена тверда фаза знаходиться в динамічній рівновазі з рідкою фазою.

Низькі значення коефіцієнтів дифузії елементів у порівнянні з коефіцієнтом температуропровідності сплавів і слабкість конвективного змішування дозволяють знехтувати процесами дифузії як в твердій, так і у рідкій фазах. Основне припущення теорії двофазної зони – стан двофазної зони можна описати за допомогою макроскопічних функцій, аналогічно температурним полям  $T(r, t)$ , полям швидкості  $V(r, t)$ :

- $S(r, t)$  – об'ємна частка твердої фази;
- $L(r, t)$  – об'ємна частка рідкої фази;
- $P(r, t)$  – об'ємна частка порожнечі.

Усі ці функції є локальними функціями координат і часу, та приймають значення в інтервалі від 0 до 1, а їх сума дорівнює 1 [73].

$$S(r, t) + L(r, t) + P(r, t) = 1 \quad (3.8)$$

Баланс маси в тимчасових похідних виглядає наступним чином [73]:

$$\frac{\partial S(r,t)}{\partial t} + \frac{\partial L(r,t)}{\partial t} + \frac{\partial P(r,t)}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

Закон збереження маси зводиться до рівняння [74]:

$$\rho_s(T) \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_L(T)L) = 0 \quad (3.10)$$

де:  $\rho_s(T)$ ,  $\rho_L(T)$  – щільності рідкої і твердої фаз металу як функції температури.

Закон збереження маси для компонентів сплаву описується рівнянням [73]:

$$\rho_s(T)C_s^i(T) \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (C_L^i(T)\rho_L(T)L) = 0 \quad (3.11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

де:  $C_L^i$ ,  $C_S^i$  – концентрації  $i$ -й компоненти сплаву в рідкій і твердій фазах, що знаходяться в рівновазі при температурі  $T$ .

Концентрації  $C_L^i(T)$ ,  $C_S^i(T)$  були визначені з фазової діаграми станів багатокомпонентної системи, а також враховані рівняння теплопровідності з джерелами і конвективним теплопереносом [73]:

$$S\rho_s(T)\chi_s(T) \frac{\partial T}{\partial t} + L\rho_L(T)\chi_L(T) \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V\nabla T \right) - q\rho_s(T) \frac{\partial S}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T)\nabla T) \quad (3.12)$$

де:  $\rho_s$ ,  $\rho_L$  – щільності рідкої й твердої фаз сплаву, функції температури;

$\chi_s$ ,  $\chi_L$  – питомі теплоємності рідкої й твердої фаз сплаву, функції температури;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності сплаву;

$q$  – теплота кристалізації сплаву.

З урахуванням умови охолодження в ливарній формі рівняння теплопровідності буде виглядати наступним чином [73]:

$$\rho_k(T)\chi_k(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_k(T)\nabla T), \quad (3.13)$$

де: індекс  $k$  – матеріал ливарної форми.

З урахуванням обставин, що дозволяють знехтувати конвективним теплопереносом в рівнянні (3.13), рівняння (3.9 – 3.13) утворюють замкнену систему рівнянь для чотирьох функцій:  $S(r, t)$ ,  $L(r, t)$ ,  $P(r, t)$ ,  $T(r, t)$ , і являють собою теплову модель для LVMFlow.

Моделювання ливарних процесів, що протікають під час виготовлення литих поршнів, здійснювалося відповідно до цілей і завдань дисертаційного дослідження:

- виявлення місць утворення дефектів газоусадкового характеру та визначення їх розташування і можливого розміру;
- аналізування процесу фазового переходу під час охолодження виливки поршня у формі.

Послідовність етапів відповідно до методики моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття поршнів можна окреслити таким чином:

- визначення початкових умов;
- розроблення 3D моделі виливки на базі поршня Д240-1004021 з технологічною ливниково-живильною системою;
- комп'ютерно-інтегроване моделювання ливарних процесів виробництва поршня Д240-1004021;
- аналізування результатів моделювання;
- аналізування характеру заповнення форми металом і розташування ливарних дефектів;
- доопрацювання технології виготовлення литих поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення з урахуванням результатів комп'ютерно-інтегрованого моделювання;
- модернізація ливникової системи або технологічних режимів виробництва (перегрів металу в печі, збільшення або зменшення часу циклу виробництва тощо).

У якості досліджуваної деталі для комп'ютерно-інтегрованого моделювання, був узятий литий поршень Д240-1004021 (рис. 3.1).

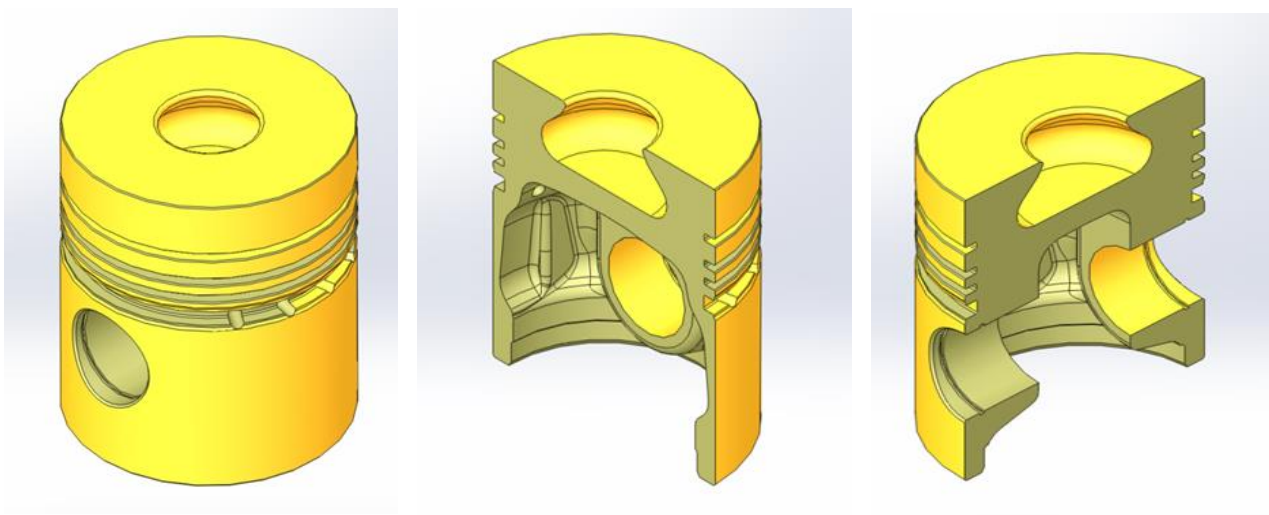


Рисунок 3.1 – 3D-модель литий деталі поршня Д 240-1004021

### 3.2.1 Вихідні дані

У спеціалізованому CAD-пакеті SolidWorks була створена 3D-модель виливка поршня з технологічною ливниково-живильною системою (рис.3.2).

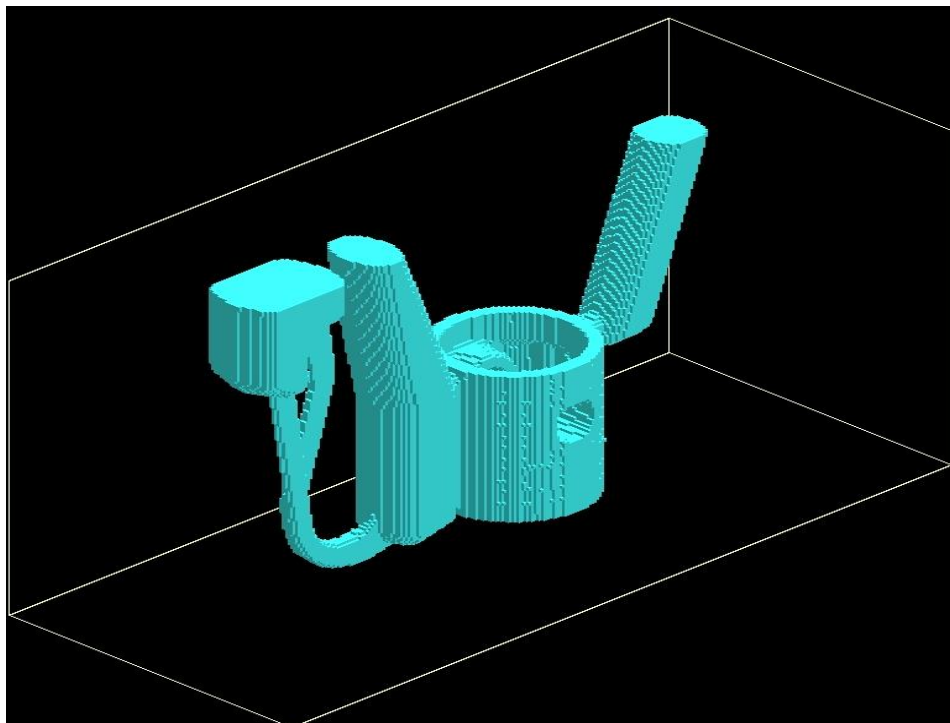


Рисунок 3.2 – 3D модель виливка поршня Д240-1004021 з ливниково-живильною системою

В роботі використовується ливниково-живильна система [63], яку відносять до системи «розширеного» типу, що забезпечує своєю конструкцією плавне і досить швидке заповнення форми металом.

### **3.2.2 Визначення початкових та граничних умов для моделювання**

Граничні умови та вихідні дані для моделювання задавалися в такій послідовності:

- 1) 3D-імпорт (конвертація файлу у формат \*.stl) і створення кінцево-різницевої моделі;
- 2) вибір і призначення матеріалу для відливання, а також технологічної оснастки, розділового покриття, що наноситься на поверхні оснастки;
- 3) визначення початкової температури розплаву і технологічної оснастки, її охолодження різними теплоносіями;
- 4) визначення загального часу циклу виготовлення однієї виливки.

За допомогою модуля 3D-імпорту, вбудованого в ІКС LVMFlow, модель поршня з ливниково-живильною системою та кокілем можна конвертувати в звичайно-різностінну модель. У процесі дослідження було встановлено параметри осередків:

- розмір осередку – 1,3 мм;
- кількість осередків – 3 563 430 шт.

Отримані результати інженерного моделювання представлені графічно у вигляді заповнення форми розплавом, спрямованості кристалізації у процесі охолодження (перехід від рідкої до твердої фази)

### **3.2.3 Результати інженерного моделювання заповнення форми розплавом**

У наукових працях зауважується, що швидкість руху розплаву у процесі заповнення форми в окремо взятих частинах не перевищувала критичних значень  $V_{кр} > 0,8$  м/с, з плавним заповненням ливарної форми, без запліскувань, і з малими завихреннями згідно з вимогами. Науковцями також зазначають, що

характер заповнюваності форми відіграє важливу роль у створенні сприятливих умов для спрямованої кристалізації [58, 59].

Для зручності аналізування результатів моделювання заповнюваність форми розглядалася поетапно по мірі заповнення розплавом окремих конструктивних частин. У загальному вигляді (див. рис. 3.3) наведена шкала, на якій чисельно та в кольорі відображено величину швидкості руху розплавленого металу, а стрілками вказано напрямок руху металу.

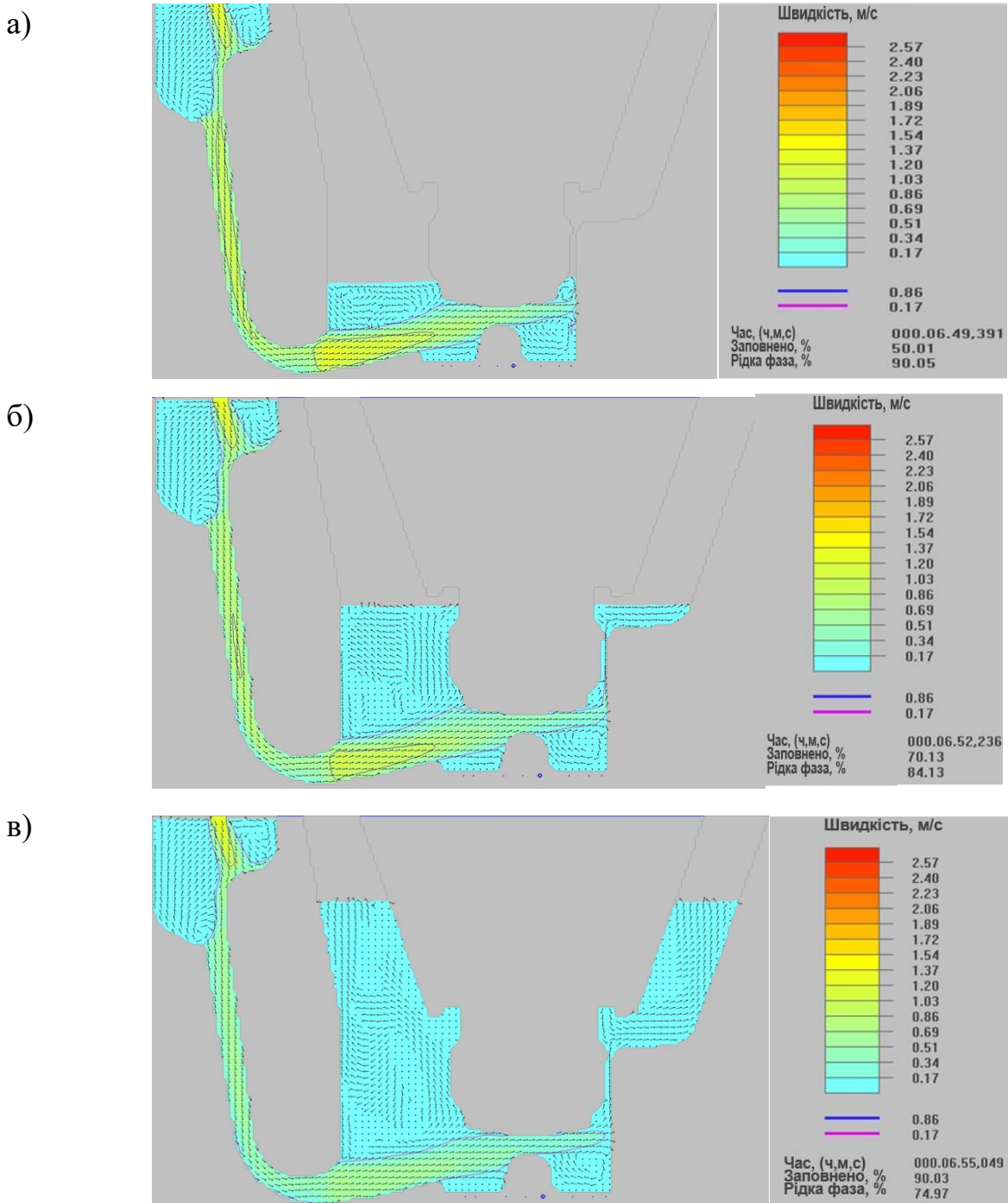


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд заповнення форми розплавом: а) на 50%; б) на 70%; в) на 90%



### 3.2.3.1 Дослідження руху розплаву в стояку

У результаті проведених досліджень було визначено, що метал у стояку рухається без зайвих завихрень (див. рис. 3.4).

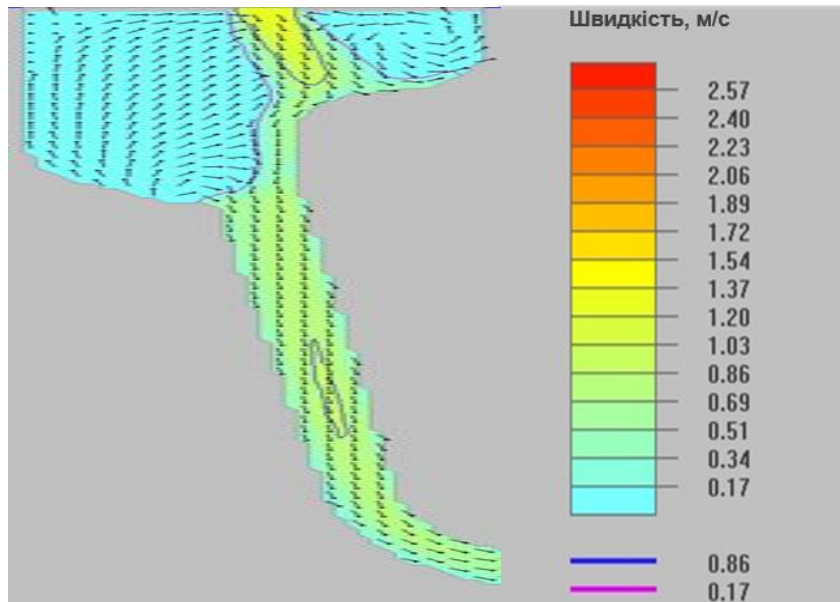


Рисунок 3.4 – Рух розплаву в стояку

Зауважимо, що під час входження металу в стояк швидкість відносно невелика, однак по мірі просування по стояку вона зростає. Підвищення швидкості на висоті стояка дозволяє уникнути втрат температур на початковому етапі заливки, що для малогабаритних деталей є істотним чинником. За таких умов метал потрапляє в наступний елемент ливникової системи з найменшими втратами.

Науковцями доведено, що на вході в стояк (див. рис 3.4) значення швидкості руху металу становить  $V=0,5$  м/с [14, 58], далі у напрямку руху, до основи стояка і далі в зумпф, розплавлений метал розвиває швидкість  $V=0,8$ м/с, що нами було враховано у процесі інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення.

### 3.2.3.2 Рух розплаву на вході в форму

Аналізування праць науковців дозволило встановити, що під час входження у форму потік металу повинен заспокоюватися [14, 58, 59]. На рис. 3.5, відображено рух розплаву на вході у форму, з якого можна побачити, що швидкість руху металу становить  $V=0,4$  м/с.

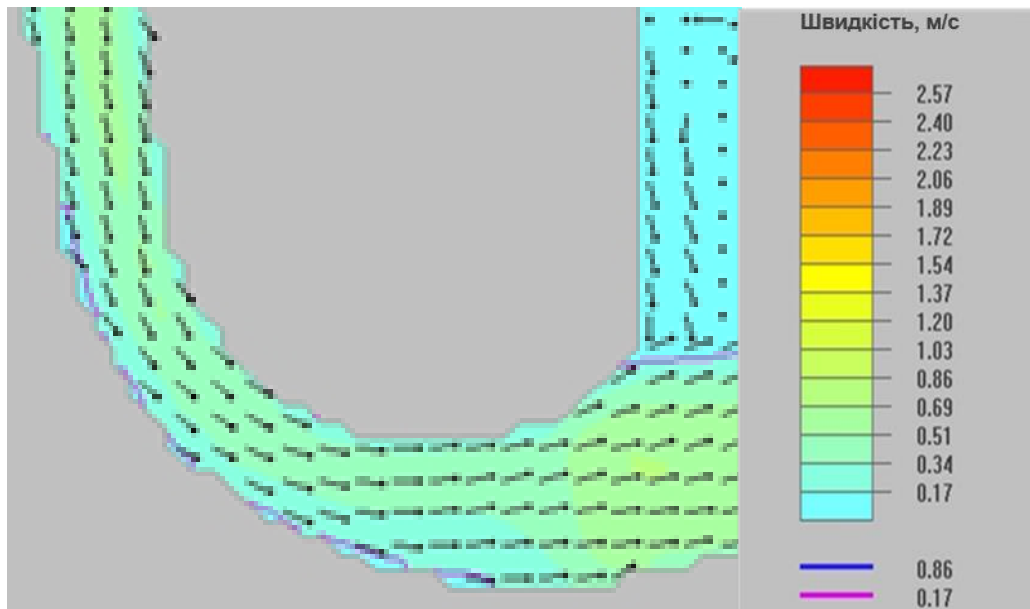


Рисунок 3.5 – Рух розплаву на вході у форму

Після цього метал надходить в колектор, площа перерізу якого дорівнює площі перетину стояка, та за рахунок цього метал поступово заповнює колектор. Швидкість металу при вході в колектор зменшується – її значення становить  $V=0,2$  м/с. Таке значення швидкості течії металу в формі в даному елементі ливникової системи, згідно з напрацюваннями науковців [14, 58, 59], вважається задовільним.

### 3.2.3.3 Рух металу в порожнині виливки

Моделювання заповнення форми показало, що швидкість руху розплаву складала  $V=0,2$  м/с, завдяки чому, при забезпеченні спрямованого заповнення, досягається ламінарний характер руху розплаву.

На рисунку 3.6 представлено розподіл температурного поля в формі

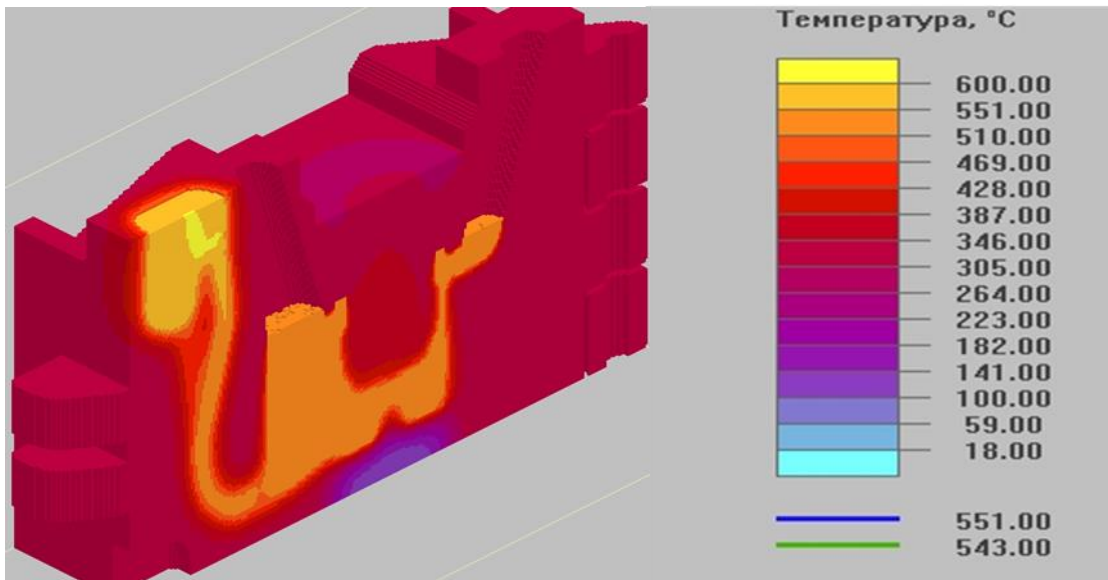


Рисунок 3.6 – Розподіл температурного поля в формі

Як видно з рисунка 3.6 на донній порожнині виливки розплав рухається від застиглих частин до більш гарячих. У той самий час створюються зустрічні потоки (див. рис. 3.7), однак, завихрення відбувається всередині виливки не переміщуючись до стінки форми.

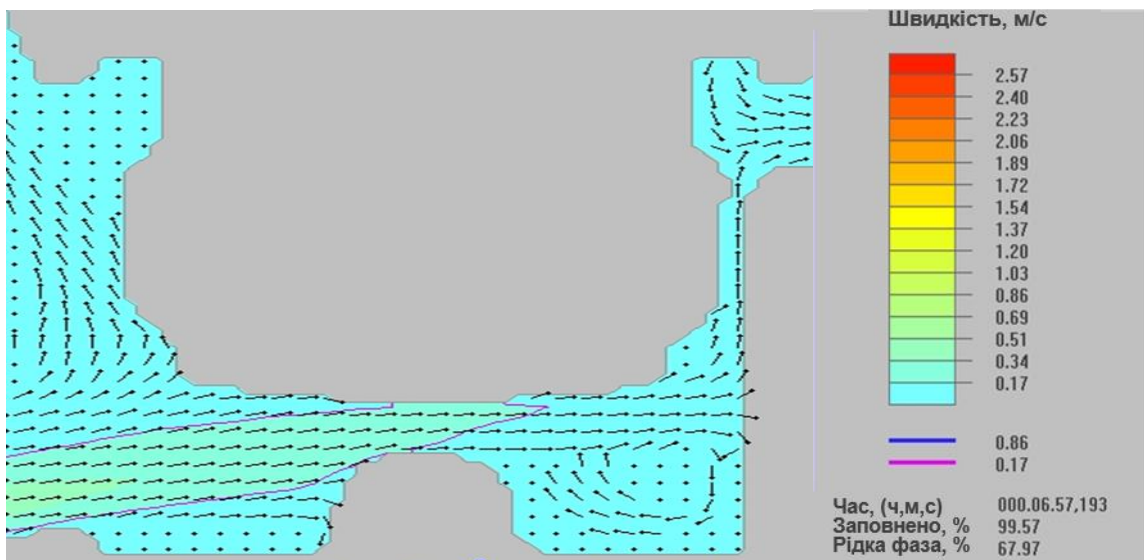


Рисунок 3.7 – Результат моделювання руху металу в формотворною частини

Аналізування результатів моделювання дозволило встановити, що рух розплаву в формі практично задовольняє вимоги, визначені науковцями раніше [58-60], а саме:

- проходячи через елементи ливникової системи, розплав не набуває турбулентний характер руху;
- заповнення форми відбувається без перевищення критичних швидкостей.

### 3.2.4 Результати моделювання охолодження виливки поршня

Результати моделювання охолодження виливки, котрі наведені на рисунку 3.8, і подальше аналізування зон рідкої та твердої фаз, дозволяють виявити характер спрямованості кристалізації виливка. Спочатку охолоджувався тонкий тронк поршня (рис. 3.8, а), далі область пальцевих отворів (рис. 3.8, б) і в останню чергу кристалізувалася головка поршня (рис. 3.8, в).

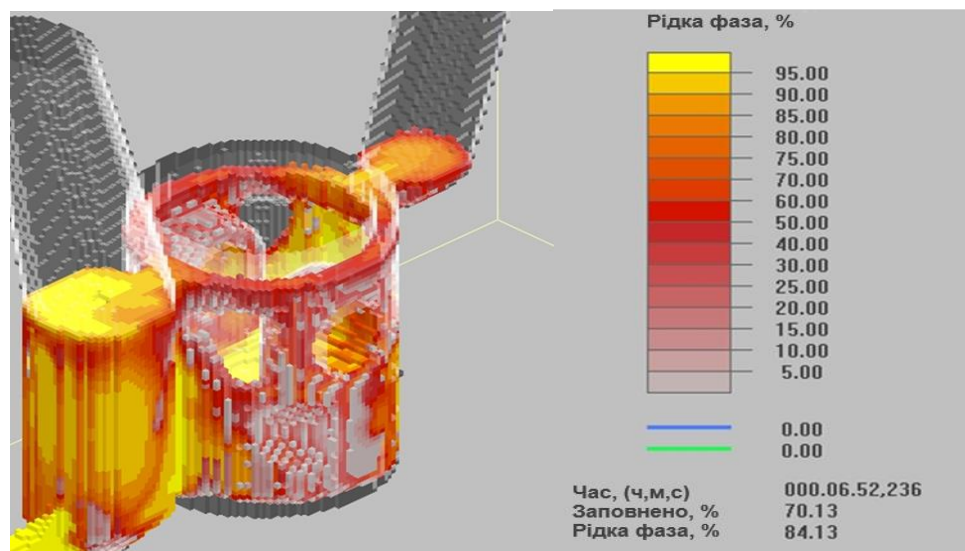


Рисунок 3.8 – Загальний характер спрямованості кристалізації виливка

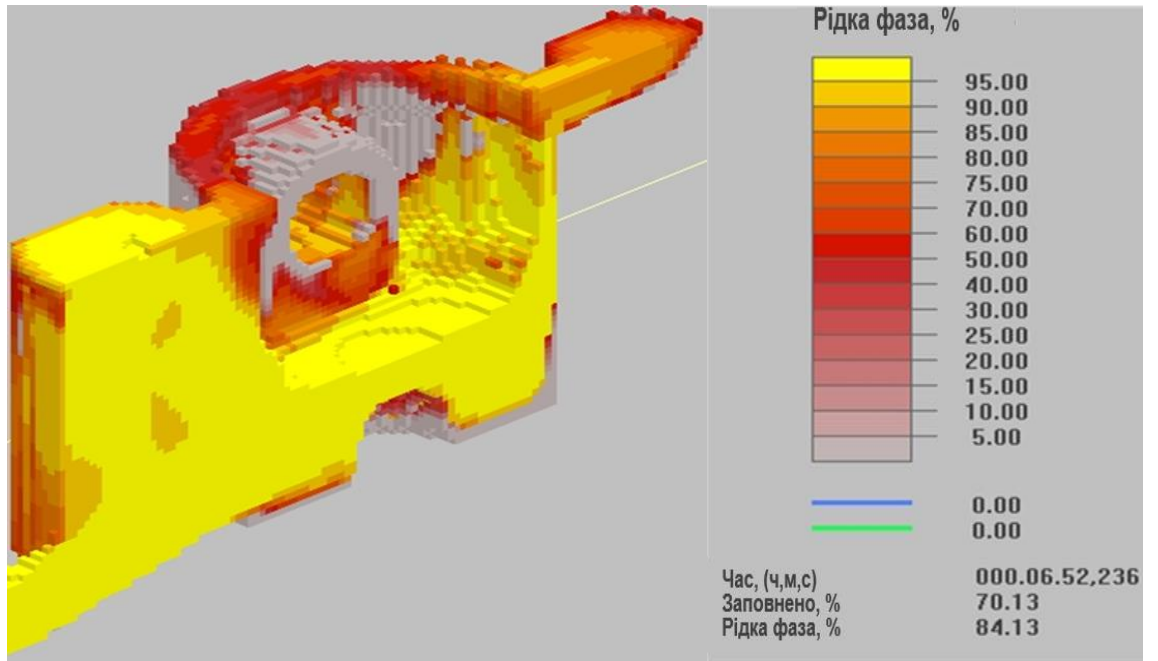


Рисунок 3.8.а – вміст рідкої фази 84 %;

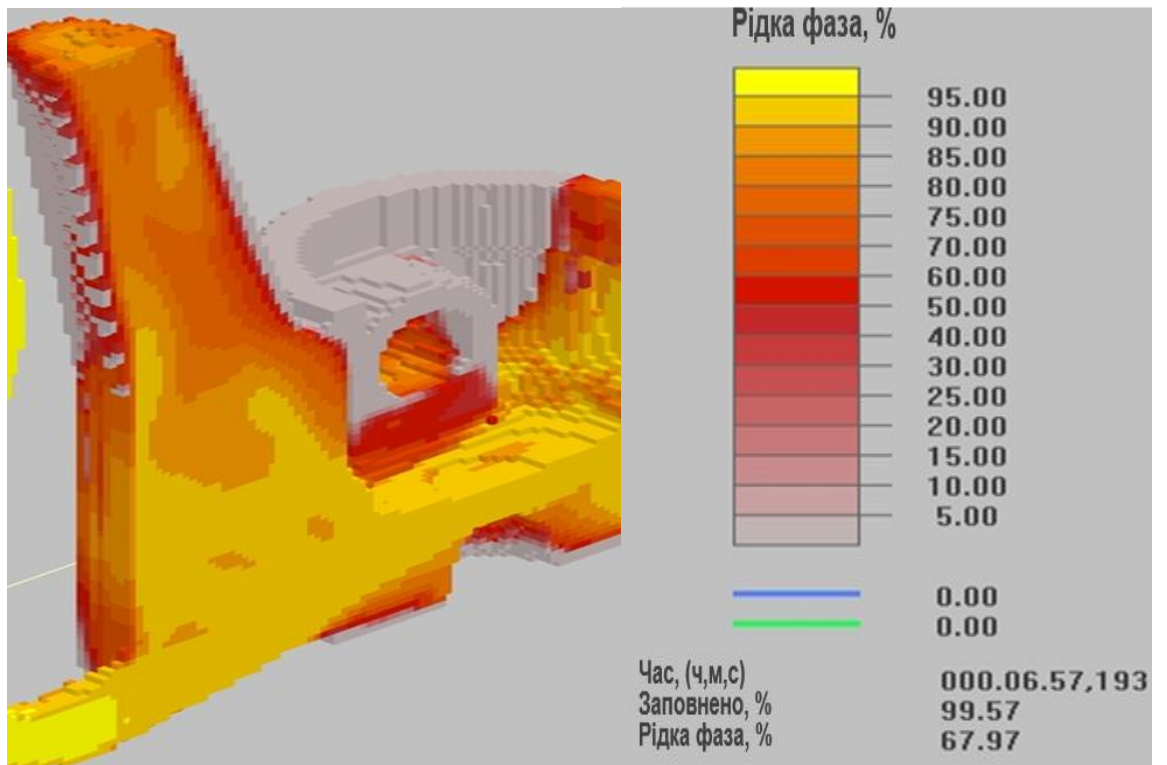


Рисунок 3.8.б – вміст рідкої фази 68 %;

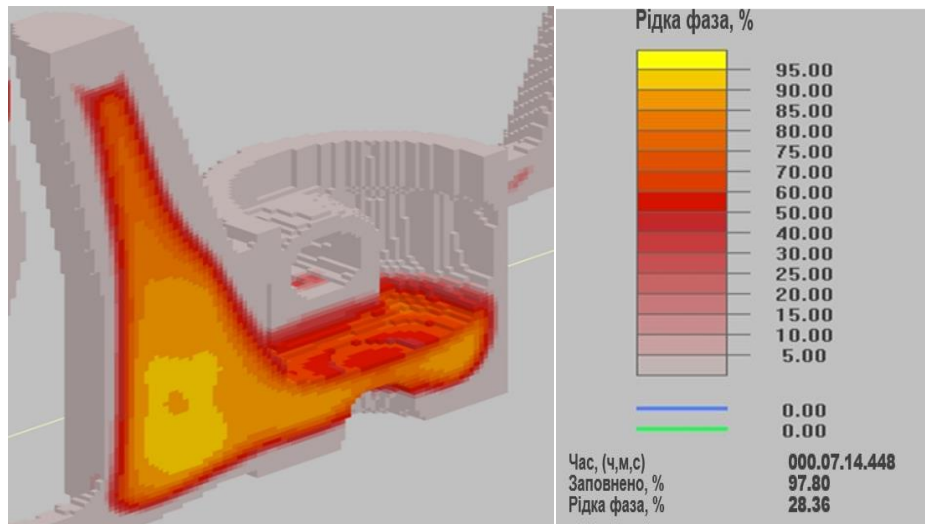


Рисунок 3.8.в – вміст рідкої фази 28 %

Результати аналізування наукових праць та власні дослідження свідчать про те, що інтервал між повним затвердіння тронку і головки обумовлює нерівномірність зростання кристалів у тілі виливка, що призводить при експлуатації до зміни механічних властивостей деталі [14, 37, 39, 40, 58, 59].

На рисунку 3.9 показані зони ізоляції: металу у процесі переходу з рідкої в твердо-рідку та тверду фази. Відповідно до теорії перколяції [73, 75] проникність металу стає менше критичного значення і, внаслідок цього, рідка фаза ізолюється від живильних частин з металом який вже набув кристалічної форми.

Слід констатувати, що аналізування динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру.

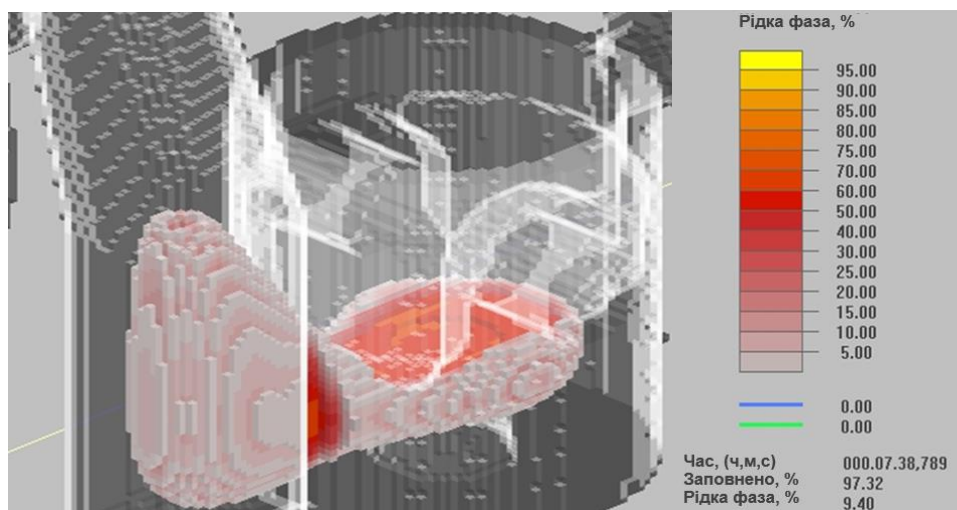


Рисунок 3.9.а – масив корпус-днище поршня

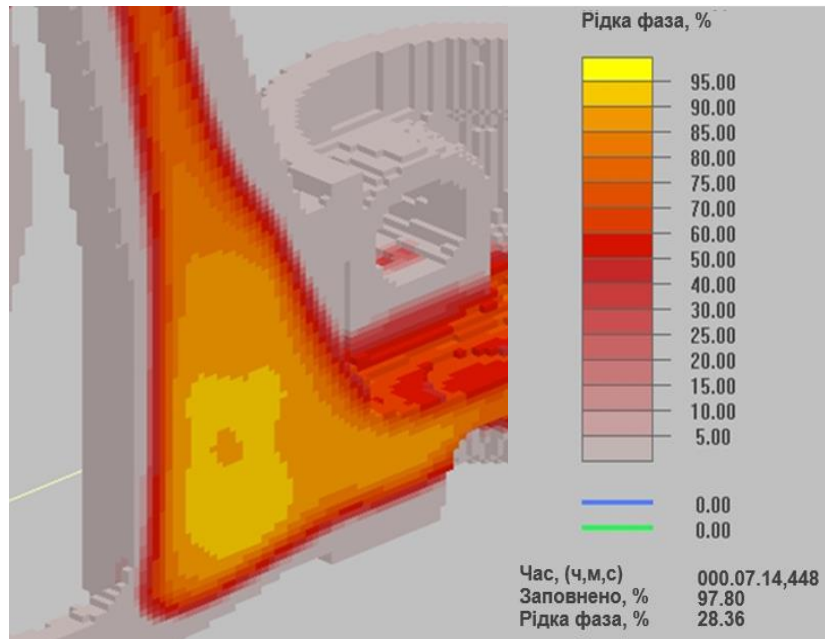


Рисунок 3.9.б – масив над пальцевим отвором

Рисунок 3.9 – Зони ізоляції: металу під час переходу з рідкої у твердо-рідку та тверду фази: а) масив корпус-днище поршня; б) масив над пальцевим отвором.

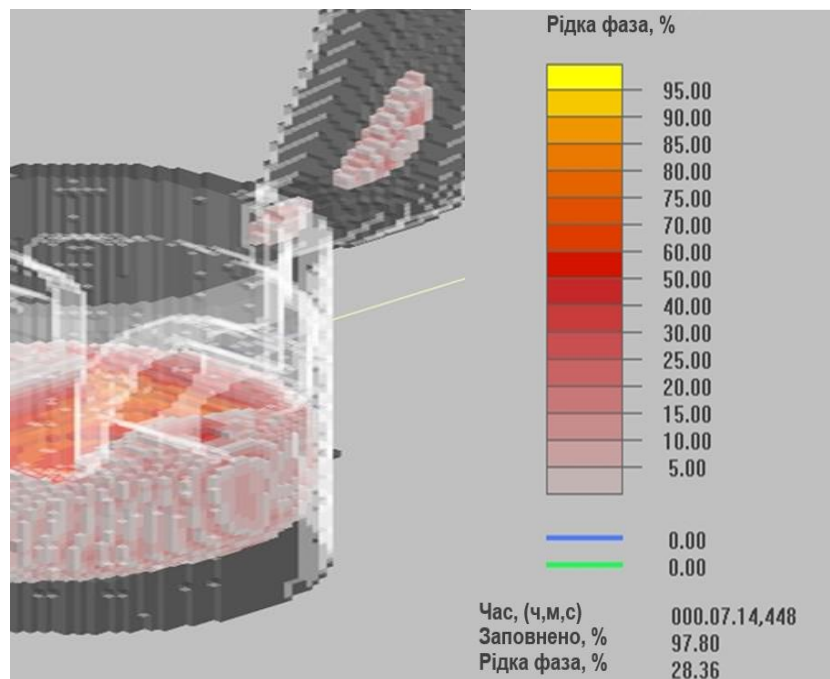


Рисунок 3.9.в – масив тронку

Закінчення рисунка 3.9 – Зони ізоляції металу під час переходу з рідкої у твердо-рідку та тверду фази: в) масив тронку

### **Висновки до розділу 3**

Створена кінцево-різницева модель вилівка поршня й технологічної оснастки, а також виконано інженерне моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ в ІКС LVMFlow. Моделювання охолодженої вилівки показало, що правильний вибір положення вилівка у формі створить сприятливі умови для спрямованої кристалізації.

Констатовано, що аналізування динаміки охолодження вилівки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру.



## РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗМІРІВ ГАЗОУСАДКОВИХ ДЕФЕКТІВ У ЛИТИХ ПОРШНЯХ ДВИГУНІВ

### 4.1 Способи досягнення проектної якості литих поршнів двигунів під час виготовлення

На переконання науковців більшість поршнів для двигунів із запалюванням палива від стиснення транспортного та спеціального призначення виготовляються методом лиття в основу проектування якого закладені технологічні чинники, що обумовлюють виникнення газоусадкових ливарних дефектів [76–78]. Розмір газоусадкової пористості і кількість пор, яке не допускається в поршнях, регламентується в конструкторській документації [29–33]. Отже, під час проектування перспективних двигунів не можна нехтувати дефектами, що впливають на їх якість і надійність.

Згідно з існуючими тлумаченнями [27] поняття «якість» слід розуміти як сукупність властивостей продукції, котрі обумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення. Надійність, у свою чергу, є невід'ємним показником якості [27, 28] і для литого поршня характеризується ймовірністю розвитку в ньому дефектів. Також основним критерієм для оцінювання якості в умовах високої конкуренції, з боку виробників поршнів, може бути використаний принцип – «якість з точки зору споживача». Цей принцип полягає в такому контролі якості готової продукції, котрий гарантує отримання споживачем тільки такі вироби, які відповідають вимогам стандартів продукції [42–44].

Для вирішення завдання взаємозв'язку між якістю і надійністю були застосовано такий метод, як аналіз допусків, і методи забезпечення технологічності при проектуванні. Конструкторсько-технологічний взаємозв'язок забезпечує стійкість системи до несприятливих впливів у процесі виробництва поршнів [28].

Вимоги до якості та надійності литих поршнів ДВЗ закладаються й реалізуються на стадії виробництва поршнів із використанням різних методик визначення технологічних дефектів. Найбільш важливою умовою у дотриманні вимог до надійності на початкових етапах виготовлення є отримання якісних литих поршнів завданої геометричної конфігурації з допустимим вмістом дефектів, таких як: усадочні рихлоти, усадочні раковини, газова пористість, гарячі тріщини, залишкові напруги й деформації.

#### **4.2 Інженерне моделювання щодо визначення розташування та розмірів ливарних дефектів у поршнях двигунів при моделюванні**

Найбільш поширеним дефектом внутрішньої структури виливків є пористість. Під пористістю, зазвичай, розуміють рівномірно або хаотично розподілені пустоти всередині виливки, що утворилися у процесі затвердіння розплаву, котрі сильно розрізняються за формою та розміром. Пористість суттєво знижує усі без винятку механічні показники виливків у зв'язку з чим завдання прогнозування об'ємної частки пористості є досить важливим.

##### **4.2.1 Методи оцінювання та розрахунків об'ємної частки пористості**

Слід наголосити, що найбільш ефективним розрахунковим методом прогнозування мікропористості вважається пряме моделювання процесу утворення пор у процесі затвердіння на основі використання рівняння Дарсі. Однак необхідні для цього математичні моделі є недостатньо точними та потребують удосконалення.

На даний момент існують різні способи оцінювання та розрахунку пористості, серед яких слід виділити такі, як:

- а) критеріальні напівемпіричні залежності (критерій Niyaма, критерій Лі та ін.);
- б) моделі течії розплаву в двофазній зоні виливки;
- в) моделі зародження та росту пори;
- г) модель клітинного автомата.

Не можна також нехтувати тим, що останнім часом увагу дослідників [79, 80] в основному зосереджено на моделюванні газової пористості.

Зауважимо, що класичною є модель двофазної зони виливки, як висвітлено у працях науковців [37, 79], в якій відбувається зростання і розвиток дендритів, коли крізь дендритний каркас відбувається фільтрація рідини до основи дендритів з метою компенсації усадки розплаву. Інтенсивність цієї фільтрації істотно залежить від параметрів двофазної зони (ширина зони, відстань між осями дендритів), і фізико-хімічних властивосте

й розплаву. У зв'язку із наявністю фазового переходу динамічний тиск рідини по мірі фільтрації до основи дендритів істотно падає. За наявності великої кількості розчинених газів відбувається також збагачення рідини газами.

Для опису процесів переносу використовується рівняння нерозривності фільтраційного потоку, що за наявності фазового переходу має вигляд:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho_L \cdot f_L \cdot \vartheta_L) \quad (4.1)$$

де:  $\bar{\rho} = \rho_L \cdot f_L + \rho_S \cdot f_S$ ,

$\rho_L$  та  $\rho_S$  – щільність рідкої і твердої фази;

$f_L$  и  $f_S$  – частка рідкої і твердої фази відповідно;

$\vartheta_L$  – швидкість фільтрації;

$\tau$  – час.

Якщо умовно розбити двофазну область, на область живлення та область припинення течії й зростання пір, то з урахуванням формул (4.2) і (4.3) можна отримати:

– для області живлення:

$$f_L + f_S = 1 \quad (4.2)$$

– для області зростання пір:

$$f_L + f_S + P_{or} = 1 \quad (4.3)$$

Враховуючи вищенаведене формула (4.1) набуває такого вигляду:

– для області живлення:

$$\operatorname{div}(\vartheta_L) = \frac{\beta}{f_L} \frac{\partial f_L}{\partial \tau} \quad (4.4)$$

– для області зростання пор:

$$\frac{\partial P_{or}}{\partial \tau} = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot \frac{\partial f_L}{\partial \tau} \quad (4.5)$$

де:  $\beta$  – коефіцієнт об'ємної усадки сплаву;

$P_{or}$  – об'ємна пористість.

У науковій праці було експериментально доведено, що для опису фільтраційної течії розплаву може бути використано рівняння Дарсі [38]:

$$f_L \cdot \vartheta_L = -\frac{K_n}{\mu} \cdot (g_{rap}P - \rho_L \cdot g) \quad (4.6)$$

де:  $K_n$  – коефіцієнт проникності;

$\mu$  – динамічна в'язкість розплаву;

$P$  – тиск у розплаві.

Слід зважати на те, що у класичній формі рівняння (4.6) використовують для опису фільтрації рідини в середовищі з постійним коефіцієнтом проникності та динамічної в'язкості. Проте, у разі лиття ці параметри не можуть бути константами і повинні істотно змінюватися по ширині двофазної зони. Зазвичай їх задають як функції долі твердої фази. В той же час, досить часто коефіцієнт динамічної в'язкості багатьма дослідниками задається як константа по усій ширині зони. За відомими даними [79] коефіцієнт динамічної в'язкості можна представити як функцію температури :

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (4.7)$$

де:  $\mu_0$  – коефіцієнт динамічної в'язкості за умови значного перегрівання;

$E_a$  – енергія активації;

$T$  – температура,

$R$  – універсальна газова постійна.

Також є відомим [81] наступний опис коефіцієнта динамічної в'язкості, а саме:

$$\mu = \mu_0 \cdot f_L^{-n} \quad (4.8)$$

де:  $\mu_0$  – коефіцієнт динамічної в'язкості за умови значного перегрівання;

$f_L$  – доля рідкої фази;

$n$  – константа.

Необхідно окремо констатувати, що залежність (4.8) непогано корелює із відомими експериментальними даними, окресленими у наукових працях [82, 83] при  $n = 1,55$ . У подальшому залежність (4.8) використовується при  $n = 1,55$ , вважаючи його першим наближенням для опису зміни в'язкості по ширині двофазної зони.

Іншою важливою складовою (4.6) є коефіцієнт проникності, котрий є площею перерізу доступною для фільтрації рідини. У разі опису фільтрації в двофазній зоні коефіцієнт проникності дендритного каркаса не може бути постійним за визначенням. Слід враховувати, що коефіцієнт проникності безпосередньо залежить від параметрів мікроструктури сплаву, а саме: відстані між первинними осями дендриту, розміру мікрозерна, тощо, що формується. Саме тому функціональна залежність коефіцієнта проникності повинна включати параметри мікроструктури відливання. Першу оцінку коефіцієнта проникності дав Флемінгс [82]. По аналогії з іншими пористими середовищами він запропонував такий вид залежності :

$$K(f_S) = (1 - f_S)^2 \cdot \gamma \quad (4.9)$$

де:  $\gamma$  – параметр кристалічної будови відливання;

$f_S$  – доля твердої фази.

Істотних вказівок щодо алгоритму знаходження постійної  $\gamma$  Флемінгс не наводив. Ймовірно, у зв'язку з цим широкого поширення ця форма залежності не отримала. Пізніше Журавльов [81] запропонував складнішу функціональну залежність коефіцієнта проникності, що пов'язана із мікроструктурою відливання :

$$K(f_S) = \frac{(1-f_S)^3 \cdot d^2}{8 \cdot f_S} \quad (4.10)$$

де:  $d$  – параметр мікробудови відливання (відстань між вторинними осями дендриту).

Найбільшого поширення для моделювання течії в двофазній зоні отримало наближення Кармана-Козени. Згідно з цим наближенням проникність двофазної зони розплавів може бути описана загальною залежністю, котра має вид :

$$K(f_L) = \frac{f_L^3}{k_C \cdot S_V^2}, \quad (4.11)$$

де:  $f_L$  – доля рідкої фази;

$k_C$  – коефіцієнт Кишені, що залежить від характеристик пористого матеріалу;

$S_V$  – питома площа поверхні твердої фази.

Для алюмінієвих сплавів експериментально було знайдено та запропоновано значення  $k_C = 5$  і апроксимуюче вираження для  $S_F$  [84]:

$$S_F = \frac{6 \cdot (1 - f_L)}{d} \quad (4.12)$$

де:  $f_L$  – доля рідкої фази;

$d$  – параметр мікробудови відливання.

З урахуванням залежності (4.12) можна отримати класичну форму вираження проникності дендритного каркаса по Карману-Козени:

$$K(f_L) = \frac{f_L^3 \cdot d^2}{180 \cdot (1 - f_L)^2}, \quad (4.13)$$

Попри те, що ця форма залежності отримана для алюмінієвих сплавів за певної будови двофазної області формули (4.11), вона активно використовується для моделювання течії різного напрямку (паралельно або перпендикулярно первинним осям дендриту) в двофазній зоні широкого спектру сплавів (від алюмінієвих до нікелевих). Для різних сплавів експериментальні оцінки коефіцієнта  $k_C$  і питомої площі поверхні  $S_F$  можуть істотно розрізнятися, у зв'язку з чим і кінцевий вид формули коефіцієнта проникності (4.13) може бути різним. На наше переконання оптимальним є отримання загальної залежності коефіцієнта проникності дендритного каркаса виходячи із строгих фізичних представлень.

При цьому слід враховувати те, що з одного боку двофазна зона обмежується ізотермічною поверхнею ліквідуса  $T(x, y, z, \tau) = T_L$ , на якій є тиск розплаву, котрий можна описати формулою :

$$P(x, y, z, \tau) = P_{Liq} = P_A + P_H \quad (4.14)$$

де:  $P_{Liq}$  – тиск на ліквідусі, що є сумою зовнішнього  $P_A$  і металостатичного тиску  $P_H$ .

З іншого боку двофазна зона обмежена ізотермічною поверхнею солідусу  $T(x, y, z, \tau) = T_S$  або евтектики  $T(x, y, z, \tau) = T_E$ . Таким чином, це межа між двофазною зоною і формою або повністю затверділим розплавом.

Між цими двома межами знаходиться інша найважливіша межа – межа припинення живлення. Цю межу визначає ізобарична поверхня, на якій тиск в розплаві досягає критичного значення  $P(x, y, z, \tau) = P_{CR}$ , внаслідок чого уривається течія розплаву та відбувається зародження пори.

Таким чином, верхня та нижня межа двофазної зони знаходяться у межах рішення «теплової» задачі, а межа припинення живлення – у межах із спільного рішення фільтраційної задачі, що включає рівняння (4.1) і (4.6). При цьому об'ємна доля пор може бути знайдена безпосередньо із урахуванням формули (4.5) таким чином:

$$P_{or} = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot f_{LCR} \quad (4.15)$$

де:  $f_{LCR}$  – доля рідкої фази в даній точці в мить, коли через неї пройшла межа припинення живлення.

Як вірно відображено науковцями [85], пористі матеріали, що зустрічаються в природі настільки сильно розрізняються за формою та особливостями будови, що неможливо створити загальне кінетичне рівняння, котре дозволяє розраховувати швидкість фільтрації в загальному вигляді. Класичним в описі кінетичних явищ в пористих середовищах є такий підхід: пористе тіло представляють системою з певної кількості однакових капілярів із деяким ефективним радіусом перерізу. Повороти струменів рідини у процесі руху та відхилення каналів від циліндричної форми враховують за допомогою коефіцієнта звивистості.

Зазначимо, що у науковій праці [86] було використано такий підхід у процесі виведення функціональної залежності коефіцієнта проникності

дендритного каркаса: в двофазній зоні узятий кінцевий об'єм протяжністю  $\Delta x$  і площею  $S$ , в межах якого в'язкість, температура і доля твердої фази вважається однаковою. За допомогою рівняння Дарсі, об'ємна витрата розплаву через виділений переріз можна описати залежністю:

$$Q = \frac{K_D}{\mu} \cdot S \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (4.16)$$

де:  $\Delta P$  – різниця тисків на межах об'єму.

З іншого боку, рівняння Пуазейля зв'язує об'ємні витрати рідини через систему з  $N$ -циліндричних каналів радіусом  $r$  і падіння тиску рідини залежністю:

$$Q = \frac{N \cdot \pi \cdot r^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L \cdot \xi} \quad (4.17)$$

де:  $\Delta P$  – різниця тисків на довжині фільтрації  $L$ ;

$\xi$  – коефіцієнт звивистості;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.

Під коефіцієнтом звивистості  $\xi$  пропонується розуміти відношення істинного шляху меніска розплаву до глибини просування фронту просочення.

Доля рідини в системі капілярів може бути вичислена по такій залежності:

$$f_L = \frac{N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \xi}{S} \quad (4.18)$$

Звідки далі слідує така залежність:

$$r^4 = \frac{S^2 \cdot f_L^2}{(N \cdot \pi \cdot \xi)^2} \quad (4.19)$$

Підставимо (4.19) в (4.16) і отримаємо:

$$Q = \left( \frac{S \cdot f_L^2}{8 \cdot N \cdot \pi \cdot \xi^3} \right) \cdot S \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (4.20)$$

Вважаючи  $L = \Delta x$  і порівнюючи (4.15) і (4.20) можна отримати для коефіцієнта проникності наступне рівняння:

$$K_{\Pi} = \frac{S \cdot f_L^2}{8 \cdot N \cdot \pi \cdot \xi^3} \quad (4.21)$$

У подальшому кількість капілярів  $N$  можна визначити виходячи з площі перерізу елементарного капіляра  $S_0$  за формулою:

$$N = \frac{S}{S_0} \quad (4.22)$$

Об'єднавши рівняння (4.21) і (4.22), отримаємо:



$$K_{\Pi} = \frac{S_0 \cdot f_L^2}{8 \cdot \pi \cdot \xi^3} \quad (4.23)$$

Знайдена залежність(4.23) пов'язує в загальному вигляді коефіцієнт проникності з долею рідкої фази, площею перерізу елементарного каналу фільтрації та коефіцієнтом звивистості.

Необхідно зазначити, що за умови течії розплаву паралельно первинним осям дендриту площа елементарного каналу фільтрації дорівнює:

$$S_0 = \lambda_I^2 \quad (4.24)$$

де:  $\lambda_I$  - відстань між первинними осями дендриту.

При цьому за умови течії перпендикулярно первинним осям дендриту для  $S_0$  отримаємо таку залежність:

$$S_0 = \lambda_I \cdot \lambda_2 \quad (4.25)$$

де:  $\lambda_2$  - відстань між вторинними осями дендритів.

Тоді за умови перебігу розплаву паралельно первинним осям дендритів коефіцієнт проникності набуде вигляду:

$$K_{\parallel} = \frac{\lambda_I^2 \cdot f_L^2}{8 \cdot \pi \cdot \xi^3} \quad (4.26)$$

Зауважимо, що для випадку течії розплаву нормально первинним осям дендритів маємо такий вигляд коефіцієнту:

$$K_{\perp} = \frac{\lambda_I \cdot \lambda_2 \cdot f_L^2}{8 \cdot \pi \cdot \xi^3} \quad (4.27)$$

За умови перебігу розплаву паралельно первинним осям дендритів коефіцієнт звивистості може бути представлений у вигляді:

$$\xi_{\parallel} = 1 + \frac{\lambda_I}{\lambda_2} \cdot (1 - f_L) \quad (4.28)$$

Враховуючи, що у вершинах дендритів вторинні осі розвинені досить слабо, можна очікувати мінімальне затікання розплаву в міжосні простори. По мірі наближення до основи дендрита вторинні осі стають все більш розвиненими, отже, коефіцієнт звивистості у вершинах дендрита повинен дорівнювати одиниці, а в основі – досягати великих значень. Для випадку течії розплаву перпендикулярно первинним осям дендритів науковці [86] пропонують апроксимувати коефіцієнт звивистості рядом, що має вид при  $K = 2$ :

$$\xi = \sum_{K=0}^I \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f_L^K} \quad (4.29)$$

Отже, в цьому випадку отримаємо таку залежність:

$$\xi_{\perp} = 1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f_L} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f_L^2} \quad (4.30)$$

В результаті стає можливим відобразити коефіцієнт проникності для випадку течії паралельно первинним осях дендритів у вигляді рівняння:

$$K_{\parallel} = \frac{\lambda_1^2 \cdot f_L^2}{8 \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (1 - f_L)\right)^3} \quad (4.31)$$

Для випадку течії перпендикулярно первинним осях коефіцієнт проникності набуває вигляду:

$$K_{\perp} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot f_L^2}{8 \cdot \pi \cdot \left(1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f_L} + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{f_L^2}\right)^3} \quad (4.32)$$

Таким чином, рівняння (4.23) можна запропонувати розглядати в якості загального вигляду функціональної залежності коефіцієнта проникності дендритного каркаса, яке для різних випадків направлення течії перетворюється або до формули (4.31), або до формули (4.32).

Науковцями доведено, що відповідно до моделі утворення усадочних дефектів, заснованої на теорії перколяції, дендритний каркас двофазної зони чинить опір потоку рідини, котрий виникає в процесі усадки [75, 87]. Крім того в наукових працях зазначено, що швидкість перколяції рідини пропорційна градієнту тиску і проникності каркаса [73] і має вигляд:

$$V = -m(S)\nabla p \quad (4.33)$$

де:  $p$  - тиск.

На рис. 4.1 показані проникність  $m(S)$ , яка є функцією твердої фази  $S(r, t)$  і, відповідно до теорії перколяції, наближається до нуля, якщо частка твердої фази більше, ніж критична частка перколяції ( $S_p$ ) [73, 75, 85].

$$m(S) = 0 \text{ якщо } S > S_p \quad (4.34)$$

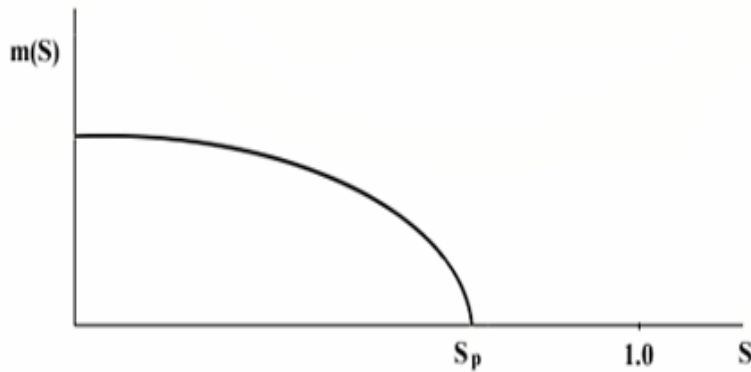


Рисунок 4.1 – Крива перколяції

З огляду на положення теорії перколяції, показник  $S_p$  для порога протікання приймається рівним  $S_p \sim 0.7$ . Значення порога протікання  $1-S_p$  вводиться в LVMFlow як параметр сплаву. Якщо рідка фаза ізольована в литві під час затвердіння, то вона оточена двофазною зоною з часткою твердої фази  $>S_p$  і не може житись рідиною під час процесу затвердіння. В результаті відбувається розрив між фазами, а також відбувається усадка. У цій ІКС сумарна усадка розраховується для кожного ізольованого рідкого вузла, після чого розподіляється по ізольованому об'єму рідини в залежності від гравітаційного поля, проникності зони і розподілу температури. Якщо локалізоване рідке ядро містить ливникову точку, то вважається, що ця зона живиться розплавом через ливникову точку і усадочні порожнини в ній не утворюються. Усадка, що утворилася в зонах, де  $S > S_p$ , не приймає участі в загальній усадці виливки і утворює розподілену пористість.

#### 4.2.2 Визначення початкових і граничних умов

Під час визначенні місць розташування та розмірів ливарних дефектів у поршнях дотримувалися наступні умови заповнення форми розплавом:

- відсутність завихрень у розплаві нетурбулентного характеру руху;
- отримання стійкого ламінарного руху при мінімальній швидкості ( $V_{cp} = 0,5$  м/сек) [58–60];

– уникнути заплескування розплаву в масивах переходу від тонких стінок до більш масивних і навпаки.

Виконання цих умов зменшує утворення в тілі виливка газових раковин і газоусадочні пористості.

У роботі нами використовувалась ливникова живильна система, що запропонована у науковій праці [63], котра є системою «розширеного» типу, яка забезпечує своєю конструкцією плавне і досить швидке заповнення форми металом. Граничні умови і вихідні дані для моделювання задавалися в наступній послідовності:

- 3D-імпорт (конвертація файлу в формат \*.stl) і створення кінцево-різницевої моделі;
- визначення матеріалу для відливання і технологічної оснастки, а також розділового покриття, що наноситься на поверхні оснастки;
- встановлення початкової температури розплаву і технологічної оснастки її охолодження різними теплоносіями;
- визначення загального часу циклу виготовлення однієї виливки.

Необхідно констатувати, що за допомогою модуля 3D-імпорту, котрий вбудований в ІКС LVMFlow, модель поршня з ливниково-живильною системою і кокілем, можна конвертувати в звичайно-різностну модель. Нами були встановлені параметри осередків, а саме:

- розмір осередку – 1,3 мм;
- кількість осередків – 3 563 430 шт.

В інтерфейсі LVMFlow призначення граничних умов для матеріалу елементів виливки та технологічної оснастки виготовляється шляхом розбиття збірки на окремі частини, кожній з яких надається свій колір:

- матеріал виливки поршня – АК12М2МГН ДСТУ 2839-94 [33];
- матеріал технологічної оснастки – сталь 20, СЧ20;
- на формотворчих частинах кокілю нанесена кокільна фарба товщиною – 0,2 мм, яка має теплопровідність  $\lambda = 190$  Вт/м·К.

Слід також виділити низку технологічних умов і вихідних даних для моделювання даного процесу:

- для запобігання попадання вологи на формоутворювальну поверхню та високій різниці температур під час заливки розплавом технологічне оснащення попередньо прогрівається до  $t = 250 \dots 280 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- температура розплаву перед заливкою в форму становила  $710 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- для спрямованості характеру фазових переходів під час охолодження центральний стрижень і стрижні, що формують отвори під палець, мали водяне охолодження з вихідною температурою води  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- виходячи із технологічних даних на підприємствах, загальний час одного циклу було обрано 62 с.

#### **4.2.3 Результати інженерного моделювання місць розташування та розмірів ливарних дефектів**

Отримані результати інженерного моделювання представлені графічно у вигляді відображення розташування газоусадочних дефектів. Наголосимо, що аналізування динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадочного характеру.

На практиці застосовують різні форми критеріїв оцінки пористості. Остаточний висновок будується виходячи з аналізування результатів розташування дефектів, виражених в ІКС LVM Flow критерієм Niyama [79], оскільки він традиційно використовується для визначення місць розташування газоусадочних дефектів і їх величин. У нашому дослідженні даний критерій застосовано для прогнозування мікропористості і газоусадочні пористості. Такий вибір обумовлений тим, що цей критерій є надійним інструментом для простих відливок, але в разі виливків зі складною геометрією його використання вимагає більш ретельного аналізування результатів моделювання.

Критерій Niyama обчислюється як температурний градієнт, поділений на корінь квадратний з швидкості охолодження в даному розрахунковому вузлі,

іншими словами він показує спрямованість процесу кристалізації. Критерій Niyama визначається виразом [73]:

$$Niyama = \frac{G}{\sqrt{\dot{T}}}, \quad (4.35)$$

де:  $G$  – це температурний градієнт в К/мм;

$\dot{T}$  – швидкість охолодження в К/сек.

Обидві величини оцінюються по закінченню затвердіння і в результаті розрахунку виходить поле значень критерію Niyama в литві.

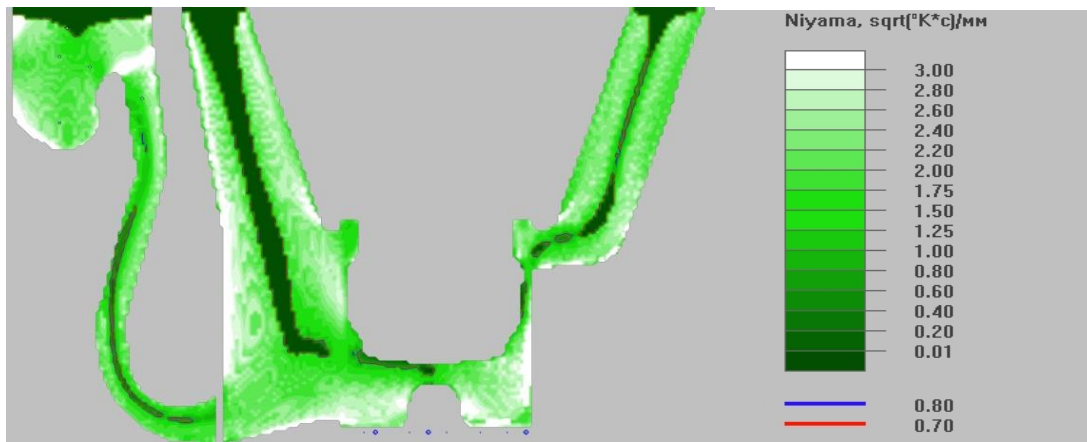
Температурний градієнт відображає інтенсивність відводу тепла. Високий температурний градієнт свідчить про значне розходження температури між двома найближчими розрахунковими точками в поточний момент часу, і навпаки, мала величина свідчить про однорідність температурного поля в локальному обсязі. Температурний градієнт обчислюється під час затвердіння в кожному вузлі виливки за умови проходження точки Niyama на кривій охолодження. Нульове значення даного параметра свідчить про відсутність спрямованої кристалізації в локальному обсязі, і підвищеної небезпеки появи тут пористості. Більш того, даний параметр зменшується практично до нуля в тих областях, де малий температурний градієнт, а саме – в центрі тонких стінок. Графічно, місця розташування дефектів, згідно даного критерію, представлені на рисунку 4.2.

Аналізування місць розташування дефектів показало, що найбільш схильними до усадочним явищ є:

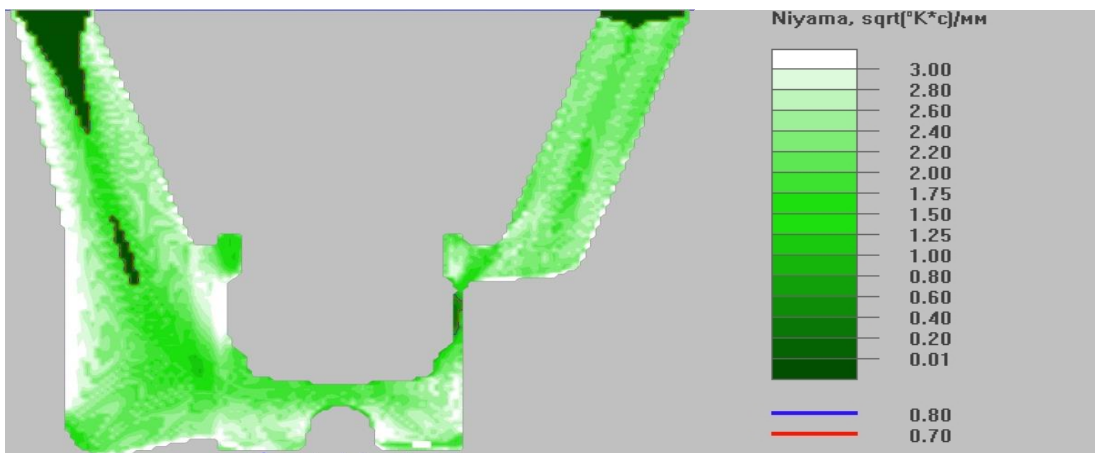
- масиви бобишки під пальцевим отвором, з величиною області розсіювання газоусадочної пористості 1...1,5 мм<sup>2</sup>;

- днище поршня під камерою згоряння, з величиною області розсіювання газоусадочної пористості 0,6...0,8 мм<sup>2</sup>;

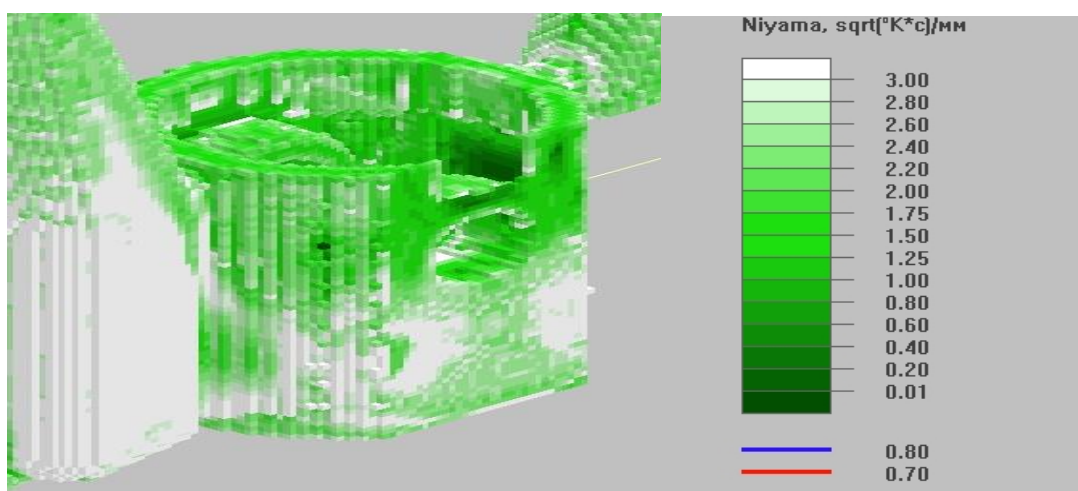
– область переходу від корпусу поршня до днища всередині деталі з величиною області розсіювання газоусадочної пористості 0,6-0,8 мм<sup>2</sup>.



а) масив днища поршня;



б) масив корпусу поршня;



в) масив бобишки

Рисунок 4.2 Місця розташування дефектів газоусадочної характеру згідно з критерієм Niyama: а) масив днища поршня; б) масив корпусу поршня; в) масив бобишки

Зазначимо, що величина розмірів дефектів, знайдених нами в зазначених зонах, становить від 0,3 мм до 1,3 мм.

З результатів інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття поршнів ДВЗ можна зробити висновок, що дефекти газоусадочного характеру можуть бути концентраторами втомного руйнування в конструктивних елементах деталі, а значить можуть вплинути на міцнісну надійність у процесі експлуатації.

### 4.3 Експериментальні дослідження литих поршнів Д 240-1004021

Експериментальні дослідження литих поршнів були проведені в лабораторії НТУ «ХП», вони є необхідними для верифікації результатів комп'ютерно-інтегрованого моделювання місць розташування та розмірів виникаючих технологічних дефектів і налагодження технологічного процесу виробництва.

Під час виготовлення дослідної партії литих поршнів Д 240-1004021 були витримані такі умови:

- температура металу перед заливкою в форму  $T_{me} = 710...720$  °С;
- час циклу  $\tau_{циклу} = 55...65$  сек;
- водяне охолодження центрального стержня, що формує внутрішню поверхню деталі.

Для алюмінієвих поршнів двигунів Д 240-1004021 переважним видом ливарних дефектів є газоусадочна пористість, яка впливає на якість і міцнісну надійність. Підтвердженням цього є результати дослідження дефектів поршня моделі 240-1004021 (див. таблицю 4.1).

Таблиця 4.1 Дефекти, отримані в результаті розбраковки дослідної партії

Тип дефекту	Місцезнаходження дефекту	Кількість вибракуваних деталей
1	2	3
Газоусадочна пористість	На юбці з протилежного боку від заливки	38
	На юбці з боку заливки	1
	У тілі днища поршня	5



Продовження таблиці 4.1

1	2	3
	Разом	44
Усадкові раковини	На юбці з протилежного боку від заливки	1
	На юбці з боку заливки	1
	Разом	2
	Всього	46

Місця розташування і розміри газоусадочних дефектів виявлено в результаті експериментального дослідження підтверджують результати комп'ютерно-інтегрованого моделювання. Спільне рішення задач моделювання та експериментального дослідження дозволяє найбільш точно спрогнозувати утворення газоусадочних дефектів під час лиття поршнів двигунів із запалюванням палива від стиснення.

Згідно з методом визначення місць розташування та розмірів дефектів у литому поршні було проведено моделювання та досліджено процес спрямованості кристалізації поршня в формі, виявлені місця розташування дефектів в різних частинах деталі, які були підтверджені результатами експериментальних досліджень на партії з 400 шт.

Наступним кроком, відповідно до створеної технології комп'ютерно-інтегрованого проектування, є урахування газоусадочних дефектів в 3D-моделі поршня і подальше удосконалення технології отримання литого поршня.

#### **Висновки по розділу 4**

Невід'ємною частиною системного підходу до технології комп'ютерно-інтегрованого проектування є метод визначення місць розташування та розмірів дефектів у литому поршні двигуна із запалюванням палива від стиснення, для розробки цього методу було виконано наступне:

1. Визначено, що найбільш ефективним методом прогнозування мікропористості вважається пряме моделювання процесу утворення пор під час затвердіння на основі використання рівняння Дарсі, проте, необхідні для цього математичні моделі є недостатньо точними і потребують удосконалення.

2. З'ясовано, що утворення газоусадочних дефектів відповідає моделі, котра заснована на теорії перколяції; визначені початкові і граничні умови для моделювання.

3. Для визначення місць розташування газоусадочних дефектів було використано критерій Ніуама, що показує напрямок руху кристалізації.

4. Аналізування результатів моделювання місць розташування дефектів показав, що найбільш схильними до усадочним явищ є: масиви бобишки під пальцевим отвором; днище поршня під камерою згоряння; область переходу від корпусу поршня до днища.

5. Спільне застосування комп'ютерно-інтегрованого моделювання та експериментального дослідження на виробництві дозволило визначити місця утворення і розміри газоусадочних дефектів ( $\varnothing$  0,3-1,3 мм).

## **РОЗДІЛ 5. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛИТТЯ НА РОЗМІРИ ГАЗОУСАДОЧНИХ ДЕФЕКТІВ В ЛИТИХ ПОРШНЯХ І ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **5.1 Постановка завдання дослідження впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадочних дефектів у литих поршнях методом планування експерименту**

Дослідження впливу розмірів газоусадочних дефектів, що виникають у процесі виробництва поршнів, є важливою частиною під час оцінювання міцності та надійності поршня. У технічних вимогах існуючої конструкторської документації та технічних умовах до литих поршнів [30–32] передбачено не допускати деталі, які мають більше трьох-п'яти (в залежності від моделі поршня) газоусадочних пор на заданих поверхнях, і розміри цих дефектів не можуть перевищувати 0,1...0,2 мм. У цьому розділі вирішується актуальне завдання оцінювання впливу технологічних параметрів лиття на встановлений у розділі 4 набір ливарних дефектів (їх реальних розмірів і можливих місць розташування). Для оцінювання впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадочних дефектів в місцях їх розташування був спланований чисельний експеримент з використанням результатів моделювання в LVMFlow.

Застосування методу планування експерименту базується на таких отриманих результатах:

- за допомогою моделювання ливарних процесів в ІКС LVMFlow, підтвердженого експериментальним дослідженням на виробництві, були визначені місця розташування газоусадочних дефектів і значення їх граничних розмірів;

- створена геометрична 3D-модель поршня з дислокованими дефектами; дефект моделювався як сфера обраного діаметра ( $\varnothing$  0,3...1,3 мм).

Слід акцентувати на тому, що використаний метод планування експерименту включає низку етапів, котрі можна об'єднати у такий алгоритм:

- вибір факторів планування;
- встановлення кількості рівнів можливих розмірів;
- створення математичної моделі експерименту;
- встановлення точок планів експерименту;
- оброблення результатів планування.

Крім того зауважимо, що в основу планування покладено метод найменших квадратів, який, як відомо, складається з наступних етапів:

- розрахунок параметрів моделі;
- обчислення сум квадратів відхилень, отриманих для різних точок плану, значень досліджуваних величин газоусадочних дефектів від їх розрахункових значень, а також оцінювання дисперсій цих відхилень;
- статистичний аналіз точності моделі в областях дефектів.

Таким чином, характеристика процесу виникнення газоусадочних дефектів виявлених місцях розташування виконана за допомогою методу найменших квадратів (далі – МНК), при цьому відповідні математичні моделі були виражені у вигляді ступеневого ряду [88–90]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i \neq j}^c a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \dots \quad (5.1)$$

де:  $X$  – фактор експерименту;

$y$  – функція відгуку,

$a_0, a_1, a_{ij}, a_{ii}$  – коефіцієнти математичної моделі;

$k$  – кількість факторів, що впливають;

$c_k^2$  – число поєднань з  $k$  елементів по два,

коли:

$$c_k^2 = \frac{k!}{2!(k-2)!}$$

## 5.2 Вибір факторів планування

Зауважимо, що теплова теорія лиття дає можливість досліджувати вплив конструктивних і технологічних параметрів коків на умови формування

виливків. З метою зниження теплового удару і перепаду температур у формі та, відповідно, величин внутрішніх напружень в ній і запобігання таким чином її руйнування, на її поверхню наносять шар теплоізолюючого покриття. Це покриття також значно впливає на кінетику тепловідведення від виливки і тривалість її затвердіння. Таким чином, вибираючи, наприклад, склад і товщину покриття кокілю і товщини стінки форми, спосіб і режим її охолодження можна в широких межах змінювати термічні умови формування виливки.

Як свідчать напрацювання науковців, найбільш часто управління термічними умовами лиття в кокіль здійснюють через коефіцієнт теплопровідності, товщину покриття і режим охолодження кокілю. Змінюючи товщину і теплопровідність вогнетривкого покриття у відповідних частинах кокілю можна створювати умови для спрямованого затвердіння виливки, тобто, регулювати швидкість її охолодження в окремих місцях [57].

Завдяки меншій порівняно з металом кокілю теплопровідності вогнетривкої покриття між відливанням і кокілем виникає термічний опір переносу теплоти:

$$1/\beta = \varepsilon/\lambda_{кр} \quad (5.2)$$

де:  $\beta$  – коефіцієнт теплової провідності, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\varepsilon$  – товщина шару вогнетривкого покриття, м;

$\lambda_{кр}$  – теплопровідність покриття, Вт/(м · К)

Слід зважати на те, що вогнетривке покриття зменшує інтенсивність відводу теплоти від розплаву та виливки пропорційно тепловій провідності вогнетривкого покриття та різниці температур поверхні виливки і поверхні кокілю:

$$q = \beta(T_0 - T_{п}) \quad (5.3)$$

де:  $q$  – інтенсивність відводу теплоти;

$\beta$  – теплова провідність;

$T_0$  – температура поверхні виливки;

$T_{п}$  – температура поверхні кокілю.

У процесі природного охолодження форми тривалість затвердіння майже пропорційна товщині покриття. По мірі зростання товщини кокілю роль зовнішнього його охолодження зменшується. Крім того слід наголосити, що примусове охолодження кокілю тим ефективніше підвищує швидкість затвердіння та охолодження виливки, чим менше термічний опір на її поверхні. Тому примусове охолодження форми доцільно поєднувати зі зменшенням товщини покриття та кокілем і підвищенням коефіцієнта теплопровідності покриття.

Дослідженням впливу товщини стінки кокілю на умови охолодження виливки присвячені наукові праці багатьох авторів [12, 61, 91–94]. Теоретично і експериментально ними доведено, що вплив товщини стінки кокілю на процес затвердіння виливки пов'язаний з відносними і абсолютними розмірами виливки, її формою, температурними та іншими умовами процесу теплообміну.

За умови збільшення товщини стінок кокілю по відношенню до стінок виливки, час повного затвердіння металу спочатку трохи зростає (швидкість затвердіння падає), що пояснюється підвищенням термічного опору форми на передачу теплоти від виливки до навколишнього середовища. Потім крива часу повного затвердіння проходить через максимум і тривалість затвердіння різко падає. Особливості затвердіння за умови досить великої товщини стінки кокілю пояснюються підвищеною теплоакумулюючою здатністю форми.

Вплив товщини стінки кокілю на формування виливки залежить від кривизни стінки кокілю. У масивному циліндричному кокілі з порожниною малого діаметру дивергенція температурного поля на поверхні зіткнення з відливанням значно більше, ніж в кокілі з порожниною великого діаметру.

Зазначимо, що чим вище дивергенція, тим більше площа відводу тепла. Саме тому швидкість тепловідведення в кокіль за умови великого діаметра виливки значно нижча, ніж за наявності малого діаметра.

Вплив початкової температури кокілю на термічні умови формування виливки проявляється наступним чином. У тонкостінній формі початкова температура кокілю практично не впливає на тепловий процес. Чим більше

відносна маса форми, тим помітніше роль початкової її температури. В умовах природного охолодження за умови, що  $X_3/X_1 > 1$  (де:  $X_1$  та  $X_3$  – товщини стінок виливки і кокілю відповідно), ця роль стає визначальною.

Відомо, що перегрів сплаву перед заливкою впливає на усі види усадки внаслідок збільшення різниці обсягів рідкого та твердого металів і зміни кінетики росту первинних виділень дендритів. Зазвичай відзначають збільшення обсягу усадочної раковини за умови одночасного зростання пористості та грубозернистості (в цьому полягає одна з причин, які змушують обмежувати перегрів металу перед заливкою).

Наголосимо, що швидкість охолодження виливки змінює її кристалічну будову – форму, розміри та розгалуженість дендритів, а також розмір структурних складових. Внаслідок цього зі збільшенням швидкості охолодження зростає щільність сплаву, збільшується обсяг усадочної раковини (за рахунок скорочення пористості), трохи зростає лінійна усадка.

Слід враховувати, що зовнішній тиск робить сильний вплив на перерозподіл усадочних пустот між порами і раковиною. Кристалізація за умови підвищеного тиску використовується як технологічний прийом для зниження пористості та підвищення щільності й герметичності виливків, однак, зовнішня усадка при цьому дещо зростає. Зауважимо, що газонасиченість металу зазвичай призводить до різкого збільшення пористості (газової і газоусадочної) за умови одночасного зменшення розмірів усадочної раковини, знижується також лінійна усадка. Підвищений газовміст різко погіршує комплекс властивостей металу і виливки, що є неприпустимим.

Коли на поверхні виливки утворюється затверділий шар достатньої товщини, щоб не руйнуватися під дією металостатичного тиску, починається зменшення розмірів виливки внаслідок процесів усадки. Одночасно розміри порожнини форми збільшуються внаслідок теплового розширення під час нагрівання теплою залитого металу. Ці процеси призводять до утворення зазору між відливанням і формою, що в значній мірі впливає на кінетику процесу тепловідведення від виливки до форми, і, природно, на тривалість її затвердіння.

Утворений зазор заповнюється газами, вміст і тиск яких також впливає на кінетику процесу тепловідведення.

Оскільки метою дослідження є визначення впливу конструктивних і технологічних параметрів лиття на розмір газоусадочних дефектів, в якості функції було обрано діаметр дефекту в кожній із зон поршня, що найбільш схильні до усадочним явищ, а саме:

- I – масив бобишки під пальцевим отвором;
- II – масив днища поршня під камерою згоряння;
- III – область переходу від корпусу до днища.

Попередні дослідження показали, що найбільший інтерес, під час вивчення процесу спрямованого затвердіння представляють такі чинники:

- товщина шару вогнетривкого покриття  $X_1$ ;
- теплопровідність покриття  $X_2$ ;
- товщина стінки кокілю  $X_3$ ;
- початкова температура кокілю  $X_4$ .

Різні рівні факторів та інтервалів їх варіювання для литого поршня (таблиця 5.1) були визначені виходячи з результатів інженерного моделювання ливарних процесів із застосуванням LVMFlow та експериментальних досліджень на виробництві.

Таблиця 5.1 Рівні та інтервали варіювання факторів

Параметри	Фактори			
	Товщина шару вогнетривкого покриття $X_1$ , м	Теплопровідність покриття $X_2$ , Вт/м·К	Товщина стінки кокілю $X_3$ , м	Початкова температура кокілю $X_4$ , К
Основний рівень $\bar{X}_i$	0,0004	1,1	0,04	423
Інтервал варіювання $I_i$	0,0002	0,8	0,02	130
Верхній рівень $X_{i \max}$	0,0006	1,90	0,06	553
Нижчий рівень $X_{i \min}$	0,0002	0,3	0,02	293



### 5.3 Побудова плану експерименту

Аналіз наявних відомостей свідчить про те, що найбільший інтерес представляють лінійні ефекти і парні взаємодії. Тому моделі досліджуваних процесів мають вигляд:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_4 + a_{1234}x_1x_2x_3x_4 \quad (5.4)$$

Найбільш простий план, що допускає оцінювання усіх коефіцієнтів такої моделі – повний факторний експеримент за умови двох рівнів факторів, котрий відображений в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - План побудови повнофакторного  $2^4$  експерименту

№ дослідження	Фактори				
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
	1	2	3	4	5
1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1	-1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	+1	-1
10	+1	-1	+1	+1	-1
11	+1	+1	-1	+1	-1
12	+1	-1	-1	+1	-1
13	+1	+1	+1	-1	-1
14	+1	-1	+1	-1	-1
15	+1	+1	-1	-1	-1
16	+1	-1	-1	-1	-1

## 5.4 Обробка результатів експерименту

Обробка результатів експерименту проведена з метою визначення коефіцієнтів полінома, що апроксимує залежність розмірів дефектів від конструктивних і технологічних факторів, і для оцінки його отриманої залежності. Для визначення коефіцієнтів регресії використані математичні моделі (із формули 5.1) [90]:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N Y_u x_{0u}; \quad a_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N Y_u x_{iu}; \quad a_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N Y_u x_{iu} x_{ju} \quad (5.5)$$

Отримані значення коефіцієнтів для кожної досліджуваної моделі наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 Значення коефіцієнтів розрахункових моделей

Найменування коефіцієнта	Значення коефіцієнтів		
	У <sub>I</sub>	У <sub>II</sub>	У <sub>III</sub>
$a_0$	$5,81 \cdot 10^{-4}$	$7,38 \cdot 10^{-4}$	$11,375 \cdot 10^{-4}$
$a_1$	$-0,8125 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,125 \cdot 10^{-4}$
$a_2$	$-0,6875 \cdot 10^{-4}$	$-1,75 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-4}$
$a_3$	$0,3125 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	$-1,25 \cdot 10^{-4}$
$a_4$	$-0,1875 \cdot 10^{-4}$	$-1,25 \cdot 10^{-4}$	$0,875 \cdot 10^{-4}$
$a_{12}$	$-0,8125 \cdot 10^{-4}$	$-1,875 \cdot 10^{-4}$	$3,625 \cdot 10^{-4}$
$a_{13}$	$3,1875 \cdot 10^{-4}$	$-0,625 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$
$a_{14}$	$-0,8125 \cdot 10^{-4}$	$1,875 \cdot 10^{-4}$	$0,625 \cdot 10^{-4}$
$a_{23}$	$-1,4375 \cdot 10^{-4}$	$1,375 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$a_{24}$	$-0,4375 \cdot 10^{-4}$	$0,625 \cdot 10^{-4}$	$-0,625 \cdot 10^{-4}$
$a_{34}$	$-2,188 \cdot 10^{-4}$	$-0,875 \cdot 10^{-4}$	$-2,5 \cdot 10^{-4}$
$a_{1234}$	$-1,313 \cdot 10^{-4}$	$1,625 \cdot 10^{-4}$	$-0,5 \cdot 10^{-4}$

З урахуванням значень апроксимуючих коефіцієнтів розрахункові моделі приймають вид:

$$\begin{aligned}
Y_I = & 5,81 \cdot 10^{-4} - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1 - 0,6875 \cdot 10^{-4}x_2 + 0,3125 \cdot 10^{-4}x_3 - 0,1875 \cdot \\
& 10^{-4}x_4 - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1x_2 + 3,1875 \cdot 10^{-4}x_1x_3 - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1x_4 - 1,4375 \cdot \\
& 10^{-4}x_2x_3 - 0,4375 \cdot 10^{-4}x_2x_4 - 2,188 \cdot 10^{-4}x_3x_4 - 1,313 \cdot \\
& 10^{-4}x_1x_2x_3x_4,
\end{aligned} \tag{5.6}$$

$$\begin{aligned}
Y_{II} = & 7,38 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4}x_1 - 1,75 \cdot 10^{-4}x_2 - 1 \cdot 10^{-4}x_3 - 1,25 \cdot 10^{-4}x_4 + \\
& -1,875 \cdot 10^{-4}x_1x_2 - 0,625 \cdot 10^{-4}x_1x_3 + 1,875 \cdot 10^{-4}x_1x_4 + 1,375 \cdot 10^{-4}x_2x_3 + \\
& +0,625 \cdot 10^{-4}x_2x_4 - 0,875 \cdot 10^{-4}x_3x_4 + 1,625 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3x_4,
\end{aligned} \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}
Y_{III} = & 11,375 \cdot 10^{-4} + 1,125 \cdot 10^{-4}x_1 + 2,25 \cdot 10^{-4}x_2 - 1,25 \cdot 10^{-4}x_3 + 0,875 \cdot \\
& 10^{-4}x_4 + 3,625 \cdot 10^{-4}x_1x_2 - 2 \cdot 10^{-4}x_1x_3 + 0,625 \cdot 10^{-4}x_1x_4 + 1 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - \\
& -0,625 \cdot 10^{-4}x_2x_4 - 2,5 \cdot 10^{-4}x_3x_4 - 0,5 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3x_4.
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Наведені залежності були використані для отримання розрахункових значень діаметрів дефектів ( $Y_{\text{розр}}$ ) і подальшої перевірки адекватності моделей. Значення експериментальних і розрахункових розмірів дефектів наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 Значення експериментальних і розрахункових розмірів дефектів

№ кроку експерименту	$Y_{\text{експ}}, \text{ мм}$			$Y_{\text{розр}}, \text{ мм}$		
	$Y_{I\text{експ}}$	$Y_{II\text{експ}}$	$Y_{III\text{експ}}$	$Y_{I\text{розр}}$	$Y_{II\text{розр}}$	$Y_{III\text{розр}}$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,2	0,3	1,5	0,060	0,65	1,4
2	0,2	0,5	0,3	0,194	0,25	0,825
3	1	0,8	0,1	1,000	0,65	0,25
4	0,1	0,1	1,5	0,263	0,15	0,925
5	0,1	1	2,5	0,350	0,55	2,45
6	1,3	0,2	0,6	1,213	0,55	0,875
7	0,3	1,5	1,5	0,188	1,75	1,5
8	1,3	0,5	1,8	1,250	0,35	1,575
9	1	0,1	1,6	1,050	0,25	1,825

## Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4	5	6	7
10	0,2	1,5	1,3	0,313	1,25	1,3
11	1,2	1,5	0,5	1,288	1,15	0,225
12	1	0,3	1,3	0,750	0,75	1,35
13	0,1	0,5	1,1	0,063	0,45	1,675
14	1	0,4	0,7	1,000	0,55	0,55
15	0,1	1	1,2	0,125	1,25	0,675
16	0,2	1,61	0,7	0,338	1,25	0,8

Значимість коефіцієнтів моделей визначена за критерієм Стьюдента. З цією метою розраховані суми квадратів відхилень значень досліджуваної функції. У таблиці 5.5 наведені значення квадратів відхилень для кожної моделі.

Таблиця 5.5 Значення квадратів відхилень

№ кроку експерименту	Квадрати відхилень $(y_{\text{експ}} - y_{\text{розр}})^2$ , М		
	$(y_{\text{I експ}} - y_{\text{I розр}})^2$	$(y_{\text{II експ}} - y_{\text{II розр}})^2$	$(y_{\text{III експ}} - y_{\text{III розр}})^2$
1	$1,89063 \cdot 10^{-8}$	$1,225 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$
2	$3,90625 \cdot 10^{-11}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$2,75625 \cdot 10^{-7}$
3	0	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$
4	$2,64063 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3,30625 \cdot 10^{-7}$
5	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$2,025 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
6	$7,65625 \cdot 10^{-9}$	$1,225 \cdot 10^{-7}$	$7,5625 \cdot 10^{-8}$
7	$1,26563 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	0
8	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$5,0625 \cdot 10^{-8}$
9	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$5,0625 \cdot 10^{-8}$
10	$1,26563 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	0
11	$7,65625 \cdot 10^{-9}$	$1,225 \cdot 10^{-7}$	$7,5625 \cdot 10^{-8}$
12	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$2,025 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
13	$2,64063 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$3,30625 \cdot 10^{-7}$
14	0	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$
15	$6,25 \cdot 10^{-10}$	$1,5625 \cdot 10^{-12}$	$2,75625 \cdot 10^{-7}$
16	$1,89063 \cdot 10^{-8}$	$1,225 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\Sigma$	$2,61914 \cdot 10^{-7}$	$1,1775 \cdot 10^{-6}$	$1,535 \cdot 10^{-6}$

Значення дисперсій досліджень  $\bar{S}_R^2$  і дисперсій коефіцієнтів рівнянь регресії, обчислені для кожної моделі в залежності від розглянутих сум квадратів

відхилень були наведені в таблиці 5.6. Дисперсії коефіцієнтів визначені відповідно до залежності [90]:

$$\bar{S}_{b_i}^2 = \frac{\bar{S}_R^2}{N}. \quad (5.9)$$

Слід зазначити, що для ортогонального дворівневого плану ці дисперсії однакові для всіх коефіцієнтів.

Таблиця 5.6 Значення дисперсій моделей

Найменування характеристики	Моделі		
	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
Значення дисперсії дослідження $\bar{S}_R^2$ , м	$1,637 \cdot 10^{-8}$	$7,359 \cdot 10^{-8}$	$9,594 \cdot 10^{-8}$
Значення дисперсій коефіцієнтів моделі $\bar{S}_{a_i}^2$ , м	$1,023 \cdot 10^{-9}$	$4,599 \cdot 10^{-9}$	$5,996 \cdot 10^{-9}$
Середньоквадратичне відхилення $\sigma_{a_i}$ , м	$3,199 \cdot 10^{-5}$	$6,782 \cdot 10^{-5}$	$7,743 \cdot 10^{-5}$

Розрахункові значення критерію Стюдента для коефіцієнтів апроксимуючої залежності встановлювалося за формулою [90]:

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sigma_{a_i}} \quad (5.10)$$

Отримані значення критерію Стюдента для коефіцієнтів розрахункових моделей наведені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 Розрахункові значення критерію Стюдента для коефіцієнтів апроксимуючих залежностей

Найменування коефіцієнта	Значення t-критерію		
	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
$a_0$	18,2	10,87	14,69
$a_1$	2,54	1,47	1,45
$a_2$	2,15	2,58	2,91
$a_3$	0,99	1,47	1,61
$a_4$	0,59	1,84	1,13

$a_{12}$	2,54	2,76	4,68
$a_{13}$	9,97	0,92	2,58
$a_{14}$	2,54	2,76	0,81
$a_{23}$	4,49	2,03	1,29
$a_{24}$	1,37	0,92	0,81
$a_{34}$	6,84	1,29	3,23
$a_{1234}$	4,10	2,40	0,65

Табличне значення критерію Стьюдента  $t_r$  для числа ступенів свободи, визначеного за формулою [90]:

$$\vartheta = N(m - 1) \quad (5.11)$$

дорівнює 2,12, при рівні значущості 0,05. Порівняння розрахункових значень  $t$ -критерію з табличним, дозволило зробити висновок, про незначущості коефіцієнтів.

З урахуванням значущості рівняння апроксимувальних поліномів приймають вид:

$$Y_I = 5,81 \cdot 10^{-4} - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1 - 0,6875 \cdot 10^{-4}x_2 - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1x_2 + 3,1875 \cdot 10^{-4}x_1x_3 - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1x_4 - 1,4375 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - 2,188 \cdot 10^{-4}x_3x_4 - 1,313 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3x_4, \quad (5.12)$$

$$Y_{II} = 7,38 \cdot 10^{-4} - 1,75 \cdot 10^{-4}x_2 - 1,875 \cdot 10^{-4}x_1x_2 + 1,875 \cdot 10^{-4}x_1x_4 + 1,625 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3x_4, \quad (5.13)$$

$$Y_{III} = 11,375 \cdot 10^{-4} + 2,25 \cdot 10^{-4}x_2 + 3,625 \cdot 10^{-4}x_1x_2 - 2 \cdot 10^{-4}x_1x_3 - 2,5 \cdot 10^{-4}x_3x_4 \quad (5.14)$$

Оцінювання адекватності моделей, тобто придатності моделей для опису реального об'єкта дослідження, проводилося за допомогою критерія Фішера, що представляє відношення дисперсії адекватності до дисперсії досвіду. Дисперсії адекватності визначалися за формулою [90]:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{u=1}^N \Delta Y_u^2 \quad (5.15)$$

де:  $l$  – число значущих коефіцієнтів в рівнянні регресії.

У таблиці 5.8 наведені значення квадратів відхилень значень функції з урахуванням значущості коефіцієнтів регресії.

Таблиця 5.8 Значення квадратів відхилень з урахуванням значущості коефіцієнтів регресії

№ кроку експерименту	Модель I		Модель II		Модель III	
	$\tilde{Y}_{Iр, M}$	$(Y_{Iек} - \tilde{Y}_{Iр})^2$	$\tilde{Y}_{IIр, M}$	$(Y_{IIекс} - \tilde{Y}_{IIр})^2$	$\tilde{Y}_{IIIр, M}$	$(Y_{IIIекс} - \tilde{Y}_{IIIр})^2$
1	2	3	4	5	6	7
1	$0,093 \cdot 10^{-3}$	$1,129 \cdot 10^{-8}$	$0,725 \cdot 10^{-3}$	$1,806 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$5,062 \cdot 10^{-8}$
2	$0,206 \cdot 10^{-3}$	$3,906 \cdot 10^{-11}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-8}$	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$4,225 \cdot 10^{-7}$
3	$0,043 \cdot 10^{-3}$	$9,144 \cdot 10^{-7}$	$1,125 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0
4	$0,944 \cdot 10^{-3}$	$7,119 \cdot 10^{-7}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$7,562 \cdot 10^{-8}$
5	$0,444 \cdot 10^{-3}$	$1,181 \cdot 10^{-7}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$1,056 \cdot 10^{-7}$
6	$1,306 \cdot 10^{-3}$	$3,906 \cdot 10^{-11}$	$0,725 \cdot 10^{-3}$	$2,756 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$2,025 \cdot 10^{-7}$
7	$0,194 \cdot 10^{-3}$	$1,129 \cdot 10^{-8}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
8	$1,256 \cdot 10^{-3}$	$1,914 \cdot 10^{-9}$	$0,375 \cdot 10^{-3}$	$1,562 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$2,256 \cdot 10^{-7}$
9	$0,956 \cdot 10^{-3}$	$1,914 \cdot 10^{-9}$	$0,025 \cdot 10^{-3}$	$5,625 \cdot 10^{-9}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$3,062 \cdot 10^{-8}$

Продовження таблиці 5.8

1	2	3	4	5	6	7
10	$0,219 \cdot 10^{-3}$	$3,515 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$
11	$1,281 \cdot 10^{-3}$	$6,601 \cdot 10^{-9}$	$1,075 \cdot 10^{-3}$	$1,806 \cdot 10^{-7}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
12	$0,744 \cdot 10^{-3}$	$6,566 \cdot 10^{-8}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$2,025 \cdot 10^{-7}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$1,806 \cdot 10^{-7}$
13	$0,094 \cdot 10^{-3}$	$3,753 \cdot 10^{-8}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$3,306 \cdot 10^{-7}$
14	$0,969 \cdot 10^{-3}$	$9,765 \cdot 10^{-10}$	$0,775 \cdot 10^{-3}$	$1,406 \cdot 10^{-7}$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-8}$
15	$0,181 \cdot 10^{-3}$	$6,601 \cdot 10^{-9}$	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$
16	$0,394 \cdot 10^{-3}$	$3,753 \cdot 10^{-8}$	$1,075 \cdot 10^{-3}$	$2,756 \cdot 10^{-7}$	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$1,562 \cdot 10^{-8}$

У таблиці 5.9 наведені значення дисперсій адекватності і досліду, значення критерію Фішера для кожної з досліджуваних моделей.

Таблиця 5.9 Оцінка адекватності моделей

Найменування характеристики	Моделі		
	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
Сума квадратів відхилень	$1,926 \cdot 10^{-6}$	$2,360 \cdot 10^{-6}$	$2,435 \cdot 10^{-6}$
Значення дисперсії адекватності $S_{ад,м}^2$	$2,751 \cdot 10^{-7}$	$2,145 \cdot 10^{-7}$	$2,213 \cdot 10^{-7}$
Значення дисперсії досвіду $\bar{S}_R^2$ , м	$1,203 \cdot 10^{-7}$	$1,475 \cdot 10^{-7}$	$1,521 \cdot 10^{-7}$
Значення критерію Фішера	2,29	1,45	1,45



Отримані значення критерію Фішера для кожної моделі порівнювалися з табличними, визначеними для ступенів свободи

$$r_1 = N - l \text{ и } r_2 = N(m - 1) \quad (5.16)$$

де:  $N$  – кількість досвідчених точок експерименту;

$l$  – число значущих коефіцієнтів в рівнянні регресії;

$m$  – число паралельних дослідів в кожній експериментальній точці.

У таблиці 5.10 наведені розрахункові й табличні значення критерію Фішера для ступенів свободи  $r_1$  та  $r_2$  при рівні значущості 0,05.

Таблиця 5.10 Значення критерію Фішера для моделей

Значення критерію	Моделі		
	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
$F_{\text{розр}}$	2,29	1,45	1,45
$F_{\text{табл}}$	2,66	2,42	2,42

Оскільки для всіх моделей  $F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}$ , гіпотеза про адекватність моделей не відкидається. Аналізування результатів експерименту завершується інтерпретацією моделей в термінах об'єкта дослідження.

Завдання інтерпретації отриманих моделей вирішувалося в кілька етапів. Проведене дослідження підтвердило припущення про те, що значущими є не тільки лінійні ефекти, але й деякі парні взаємодії, причому в розглянутих моделях виявлено окремі відмінності в проявах впливаючих факторів.

Перш за все було з'ясовано, якою мірою кожен з факторів впливає на функцію відгуку. Лінійні коефіцієнти полінома  $a_i$  є приватними похідними функції відгуку за відповідними змінними. Отже, значення даних коефіцієнтів служить кількісною мірою, яка оцінює вплив факторів. Чим більше коефіцієнт  $a_i$ , тим сильнішим цей вплив. Знак коефіцієнта дозволяє судити про характер залежності функції відгуку від відповідних факторів.

Після цього був проаналізований ефект парних взаємодій, котрі виникають в тому випадку, якщо ефект від впливу одного фактору залежить від рівня, на

якому знаходиться інший фактор. При цьому тенденція зміни відгуку може стати навіть зворотною.

Зауважимо, що модель  $Y_I = 5,81 \cdot 10^{-4} - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1 - 0,6875 \cdot 10^{-4}x_2 - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1x_2 + 3,1875 \cdot 10^{-4}x_1x_3 - 0,8125 \cdot 10^{-4}x_1x_4 - 1,4375 \cdot 10^{-4}x_2x_3 - 2,188 \cdot 10^{-4}x_3x_4 - 1,313 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3x_4$  описує вплив конструктивних і технологічних параметрів лиття, на процес утворення газоусадочних дефектів в масиві бобишки під пальцевим отвором. З чотирьох чинників, лінійно впливають на функцію відгуку в цій зоні, виділилися два:

- товщина шару вогнетривкого покриття  $x_1$ ;
- теплопровідність покриття  $x_2$ .

Причому товщина шару вогнетривкого покриття, судячи з кількісного оцінювання коефіцієнтів, виявилася найбільш сильним впливаючим чинником. Характер впливу обох факторів  $x_1$  та  $x_2$  однаковий – збільшення їх значень веде до зменшення відклику (розміру газоусадочних дефектів).

Товщина стінки кокілю  $x_3$  та початкова його температура  $x_4$  в обраних інтервалах варіювання не роблять значного впливу на відклик (коефіцієнти  $a_3$  та  $a_4$  – незначущі), однак, вплив цих факторів досить сильно проявлявся в парних взаємодіях. В даному випадку ефекти спільного впливу перевершують навіть лінійні ефекти.

При цьому модель  $Y_{II} = 7,38 \cdot 10^{-4} - 1,75 \cdot 10^{-4}x_2 - 1,875 \cdot 10^{-4}x_1x_2 + 1,875 \cdot 10^{-4}x_1x_4 + 1,625 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3x_4$  описує вплив параметрів лиття на утворення газоусадочних дефектів у масиві днища поршня під камерою згоряння. З чотирьох чинників, що лінійно впливають на функцію відклику, виділилися один – теплопровідність покриття кокілю  $x_2$ . Слід враховувати, що підвищення теплопровідності покриття кокілю веде до зменшення розмірів газоусадочних дефектів. Товщина шару вогнетривкого покриття  $x_1$ , товщина стінки кокілю  $x_3$  і початкова температура кокілю  $x_4$  в обраних інтервалах варіювання значно не впливають на відклик (коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_3$  та  $a_4$  – незначні). Однак, вплив факторів  $x_1$  та  $x_4$  вельми сильно проявлявся в парних взаємодіях. Ефекти спільного впливу чинників  $x_1$  та  $x_2$ , а також  $x_1$  та  $x_4$  перевершують лінійний

ефект, а фактор товщини стінки кокілю  $x_3$  помітно проявляється у взаємодії чотирьох факторів.

Крім того, модель  $Y_{III} = 11,375 \cdot 10^{-4} + 2,25 \cdot 10^{-4}x_2 + 3,625 \cdot 10^{-4}x_1x_2 - 2 \cdot 10^{-4}x_1x_3 - 2,5 \cdot 10^{-4}x_3x_4$  описує вплив конструктивних і технологічних параметрів лиття на процес утворення газоусадочних дефектів в області переходу від корпусу до днища. З чотирьох чинників, котрі лінійно впливають на функцію відгуку, виділився один – теплопровідність покриття  $x_2$ . Причому, судячи по знаку коефіцієнта, характер залежності функції відгуку від відповідного фактору інший ніж в моделях  $Y_I$  та  $Y_{II}$ : підвищення теплопровідності покриття в цій області спричиняє збільшення розмірів газоусадочних дефектів. Товщина шару вогнетривкого покриття  $x_1$ , товщина стінки кокілю  $x_3$  і початкова температура кокілю  $x_4$  в обраних інтервалах варіювання не роблять значного впливу на відгук. Поряд із цим слід відзначити, що їх вплив дуже сильно проявляється в парних взаємодіях: ефект спільного впливу чинників  $x_1$  та  $x_2$  перевершує навіть лінійний ефект, а ефект взаємодії факторів  $x_1$  та  $x_3$  дещо поступається всім іншим значущим ефектам.

### **5.5 Впровадження у виробництво результатів дослідження, вплив технологічних параметрів лиття на розмір газоусадочних дефектів**

Для оцінювання експлуатаційної надійності поршню з двигуном Д240 були проведені експериментальні дослідження функціональності та визначення ресурсу поршнів Д 240-1004021 з дефектами газоусадочного характеру [91].

В цілому випробування показали, що під час досить жорстких умов навантажень на підвищених частотах обертання необкатаного двигуна поршні Д 240-1004021 з газоусадочними дефектами зберігають працездатність. Критичних зносів, поломок і руйнувань не спостерігалось. Поршні з газоусадочними дефектами в складі двигуна Д 240 витримали випробування на безвідмовність.

Розроблена технологія за результатами комп'ютерно-інтегрованого проектування була запропонована до впровадження для навчання та підвищення навичок зниження втрат від бракованих поршнів дизельних двигунів і

підвищення їх конкурентоспроможності на сучасному ринку. Для досліджень функціональності та визначення ресурсу поршнів Д 240-1004021 проведено систематичне статистичне спостереження, щодо ідентифікації дефектів газоусадочного характеру.

Згідно з технологічним процесом поршень, який має різного роду дефекти, підлягає повторній переробці. Повторна переробка дефектних поршнів у значній мірі збільшує вартість готової продукції за рахунок збільшення накладних витрат, витрат на енергоресурси тощо. Для досліджуваного литого поршня допустимий відсоток технологічного браку становить 5,6 %, в залежності від загального обсягу партії.

Брак під час виробництва литих поршнів призводить до значних економічних втрат. За економічними нормами підприємства, вартість ливарного браку для поршнів Д 240-1004021 становить 12,4 грн. за один поршень, в якому виявлені дефекти (див. табл. 5.11).

Таблиця 5.11 Вартість забракованих литих поршнів Д 240-1004021 за рік

№ місяця	Кількість поршнів з дефектами усадочного характеру, шт.	Вартість забракованих поршнів, грн.
1	2	24,8
2	1267	15710,8
3	1140	14136,0
4	597	7402,8
5	606	7514,4
6	548	6795,2
7	586	7266,4
8	174	2157,6
9	33	409,2
10	360	4464
11	564	6993,6
12	570	7068,0
<b>Разом</b>	<b>6447</b>	<b>79942,8</b>

Поршні Д 240-1004021 з газоусадочними дефектами з розмірністю в досліджуваних межах і в позначених масивах деталі, були допущені до реалізації в продаж на підставі спеціальних дозволів на кожен вироблену партію [41–44].

В цілому результати дослідження впливу технологічних параметрів лиття на розмір газоусадочних дефектів поршнів двигунів і статистичних досліджень на виробництві дозволило скоротити втрати від бракованих поршнів Д 240-1004021 на 79942,8 грн./рік.

### **Висновки до розділу 5**

1) Для оцінювання впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадочних дефектів у місцях їх розташування було розроблено та проведено чисельний експеримент з використанням результатів моделювання в LVMFlow. Характеристика процесу виникнення газоусадочних дефектів у виявлених місцях розташування виконана за допомогою методу найменших квадратів.

2) Попередні дослідження показали, що найбільший інтерес під час вивчення процесу спрямованого затвердіння, представляють товщина шару вогнетривкого покриття, теплопровідність покриття, товщина стінки кокілю і початкова температура кокілю.

3) Здійснено математичне моделювання в результаті якого були встановлено залежність розмірів газоусадочних дефектів від технологічних параметрів лиття. Виявлені залежності дають можливість регулювати розміри газоусадочних дефектів, в допустимих технічними вимогами межах, зміною технологічних параметрів лиття.

4) В цілому випробування на моторному стенді показали, що під час досить жорстких умов навантажень на поршні Д 240-1004021 із газоусадочними дефектами, вони зберігають працездатність.

5) Розроблена технологія комп'ютерно-інтегрованого проектування була запропонована для впровадження до навчального процесу на кафедрі ливарного виробництва (Додаток Б).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні поставлена і вирішена науково-практична задача з обґрунтування і створення технології комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів дизельних двигунів із комплексним застосуванням моделювання теплових, гідродинамічних параметрів лиття та урахуванням впливу технологічних параметрів лиття на розміри газоусадочних дефектів. Вирішення цього завдання дає можливість підняти технічний рівень, і скоротити час проектування, а також знизити витрати на виробництво поршнів. У дисертаційному дослідженні обґрунтовано такі положення:

1. Результати аналізування причин виникнення деформацій свідчать, що створення на етапі проектування оптимальної за розмірами, конфігурацією, технологічної конструкції дозволяє знизити ймовірність появи в ній дефектів у процесі виготовлення і експлуатації. Доведено, що системний підхід до розробки конструкції поршня, як елемента циліндро-поршневої групи і двигуна в цілому, дозволяє визначати оптимальні комбінації матеріалів, технологічних прийомів і конструктивних рішень. Встановлено, що базовим показником може бути питома або відносна металоємність, віднесена до одиниці потужності машини або механізму, досягнутому рівню для даного класу деталі або еталону.

Аналізування існуючих способів лиття дозволило встановити, що лиття в кокіль є найбільш простим технологічним процесом, котрий дозволяє використовувати поршневі сплави з низьким коефіцієнтом лінійного розширення і отримувати виливки складної конфігурації; аналізування існуючих способів лиття дозволило встановити, що виливки, котрі отримані гарячим штампуванням сплавів, що деформуються, відрізняються високою якістю, але подібні сплави у порівнянні з ливарними мають на 15...20 % вищі значення коефіцієнта лінійного розширення, а коефіцієнт використання металу за умови гарячого штампування ще менший, ніж при литті в кокіль, оскільки метал йде у відходи ковальського виробництва. Рідке штампування поршнів є кращим за

наведені вище способи тому, що поєднує їхні переваги та використовується для виробництва поршнів, до яких пред'являються особливі вимоги щодо міцності.

Доведено, що для ефективного управління якістю виливків необхідні кількісні критерії для їхнього оцінювання. Встановлено, що існує пряма залежність якості виливки від її точності, чистоти поверхні та рівня механічних властивостей, і зворотна – від частоти новоутворень в ній ливарних дефектів, що правильно відображає взаємозв'язок якості виливки з її основними параметрами. Доведено, що підвищення якості виливки тісно пов'язане з вирішенням одного з головних завдань – зниженням її металоємності, при цьому для зниження маси литої виливки необхідно мати такі функціональні характеристики, як: надійність, довговічність, гарантований рівень несучої здатності, тощо.

Оцінюючи якість відливання слід звернути увагу на ефективність виконання нею своєї функції, пов'язаної з передачею або сприйняттям деяких дій завданих іншими елементами системи, коли за системну характеристику доцільно прийняти її ресурс, протягом якого поршень не досягає граничного стану із заданою ймовірністю. Значимість і універсальність даного параметра чітко простежується в тому, що ресурс виливки визначається її конструкцією, металоємністю, механічними властивостями металу, наявністю технологічних дефектів і якістю технології виготовлення, а також значенням і ступенем розподілу робочих навантажень, які впливають на деталь в режимі її нормального функціонування, а практично єдиним ефективним методом дослідження ресурсу литої виливки є метод машинного моделювання.

Акцентовано, що існуючі методи чисельного моделювання, з використанням фізичних моделей ливарних процесів, які відбуваються в результаті охолодження виливка у формі, є трудомісткими, при цьому варіювання різними технологічними параметрами є практично неможливим. Згідно з вимогами, що пред'являються до конструкторсько-технологічного проектування для створення універсальної технології спільного комп'ютерно-інтегрованого проектування поршнів ДВЗ використовуються спеціалізовані ІКС.

На основі порівняльних рекомендацій щодо застосування прикладних інтегрованих комп'ютерних систем, призначених для моделювання процесів лиття та розрахунку теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ було встановлено, що для моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ обраний пакет прикладних програм комп'ютерного моделювання LVMFlow через кінцево-різницевих алгоритмів розрахунку, що забезпечують стабільну роботу розрахункової станції при відносно малому споживанні її апаратних ресурсів, зручності інтерфейсу, швидкості розрахунків і малої вартості пакета програм. Застосування кінцево-різницевих чисельних моделей вимагає точного призначення початкових і граничних умов, а також створення звичайно розносної мережі. Для інженерного моделювання теплового і напружено-деформованого стану литих поршнів ДВЗ обраний комплекс ANSYS, що має високу взаємодію з існуючими CAD і CAE системами, що, у свою чергу, має повну взаємодію з Workbench Products і класичним ANSYS, а також досить велику кількість математичних рішень, що дозволяють швидко і якісно проводити розрахунки в Workbench Products.

2. Підсумком виконаного дослідження стало створення тривимірної моделі виливки з нанесеними на неї елементами ливниково-живильної системи. За результатами створення 3D-моделі виливки поршня Д 240-1004021 встановлено, що тривимірне зображення складної проектованої деталі, значно полегшило сприйняття та спростило процес розроблення ливарної технології, це обумовлено тим, що добре видно особливості конструкції, термічні вузли тощо. За умови зменшення коефіцієнта габаритності виливок став більш технологічним. Правильний вибір положення виливка у формі та роз'єму кокілю дозволив підвищити якість виливків і знизити трудомісткість їх виготовлення, а також збільшити стійкість кокілів. У процесі лиття поршнів доцільно використовувати бічні системи зі щільними живильниками, а також підводити знизу через кільцеві живильники, що забезпечує плавну заливку порожнини форми.



Існуючі раніше ливникові системи працюють неефективно тому, що конструктивне розташування традиційної ливникової системи відносно виливки перешкоджає створенню спрямованої кристалізації в литві. Удосконалена ливникова система забезпечила плавність потоку і послідовність заповнення завдяки більш плавним переходам від одного елемента до іншого та відсутнього конструктивного елемента «колектор».

Доведено, що верхні системи забезпечують найбільш високу стійкість кокілів. Крім того, такі системи дуже економічні. Разом з тим, подібні системи не поступаються нижнім (сифонним) щодо зменшення в виливках неметалевих включень. Наголошено, що тривимірна модель виливка з нанесеними на неї елементами ливниково-живильної системи в подальшому буде використана для моделювання процесів, котрі протікають у ливарній формі під час її заливання та охолодження металу.

3. Акцентовано, що створена кінцево-різницева модель виливка поршня й технологічної оснастки, а також виконано інженерне моделювання процесів лиття поршнів ДВЗ в ІКС LVMFlow. Моделювання охолодженої виливки показало, що правильний вибір положення виливка у формі створить сприятливі умови для спрямованої кристалізації. Констатовано, що аналізування динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру.

4. Встановлено, що невід'ємною частиною системного підходу до технології комп'ютерно-інтегрованого проектування є метод визначення місць розташування та розмірів дефектів у литому поршні двигуна із запалюванням палива від стиснення, для розроблення цього методу було виконано наступне:

– визначено, що найбільш ефективним методом прогнозування мікропористості вважається пряме моделювання процесу утворення пор під час затвердіння на основі використання рівняння Дарсі, проте, необхідні для цього математичні моделі є недостатньо точними і потребують удосконалення;

– з'ясовано, що утворення газоусадочних дефектів відповідає моделі, котра заснована на теорії перколяції; визначені початкових і граничних умов для моделювання. Для встановлення місць розташування газоусадочних дефектів використаний критерій Niyama, що показує напрям руху кристалізації;

– аналізування результатів моделювання місць розташування дефектів показало, що найбільш схильними до усадочним явищ є: масиви бобишки під пальцевим отвором; днище поршня під камерою згоряння; область переходу від корпусу поршня до днища.

Зазначено, що спільне застосування комп'ютерно-інтегрованого моделювання та експериментального дослідження дозволило визначити місця утворення і розміри газоусадочних дефектів ( $\varnothing$  0,3-1,3 мм).

5. Для оцінювання впливу технологічних факторів лиття на розміри газоусадочних дефектів у місцях їх розташування було розроблено та проведено чисельний експеримент з використанням результатів моделювання в LVMFlow. Характеристика процесу виникнення газоусадочних дефектів у виявлених місцях розташування виконана за допомогою методу найменших квадратів. Проведені дослідження показали, що найбільший інтерес під час вивчення процесу спрямованого твердіння мають: товщина шару вогнетривкого покриття, теплопровідність покриття, товщина стінки кокілю і початкова температура кокілю.

Здійснено математичне моделювання в результаті якого були встановлено залежність розмірів газоусадочних дефектів від технологічних параметрів лиття. Виявлені залежності дають можливість регулювати розміри газоусадочних дефектів, в допустимих технічними вимогами межах, зміною технологічних параметрів лиття.

6. Розроблена технологія комп'ютерно-інтегрованого проектування була апробована та запропонована до навчального процесу на кафедрі ливарного виробництва (Додаток Б).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чайнов Н. Д., Иващенко Н. А., Краснокутский А. Н. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / ред. Н. Д. Чайнов. Москва : Машиностроение, 2008. 495 с.
2. Двигуни внутрішнього згорання : у 6 т. / ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. Харків : Прапор, 2004. Т. 1 : Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. 384 с.
3. Двигуни внутрішнього згорання : у 6 т. / ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. Харків : Прапор, 2004. Т. 2 : Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. 288 с.
4. Двигуни внутрішнього згорання : у 6 т. / ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. Харків : Прапор, 2004. Т. 4 : Основи САПР ДВЗ. 336 с.
5. Двигуни внутрішнього згорання : у 6 т. / ред. А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. Харків : Прапор, 2004. Т. 6 : Надійність ДВЗ. 324 с.
6. Абрамчук Ф. И., Марченко А. П., Разлейцев Н. Ф. Современные дизели : повышение топливной экономичности и длительной прочности / ред. А. Ф. Шеховцов. Киев : Техника, 1992. 272 с.
7. Лобанов В. К., Чуйкова Е. В. Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2009. № 46. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/Materialovedcheskie-aspekty-vybora-tehnologii-izgotovleniya-porshney-dvs#ixzz2rbiegJ4d>
8. Акимов О. В. Научные основы конструкторско-технологического проектирования литых деталей ДВС : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". Харьков, 2008.
9. Комплексный подход к созданию и организации производства поршней дизельных двигателей из быстрозакристаллизованных заэвтектических силуминов / Николаенко А. В. и др. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2013.

№ 3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-podhod-k-sozdaniyu-i-organizatsii-proizvodstva-porshney-dizelnyh-dvigately-iz-bystrozakristallizovannyh>

10. Производство отливок из сплавов цветных металлов / Курдюмов А. В. и др. Москва : Металлургия, 1986. 415 с.

11. Технология металлов и конструкционные материалы / Кузьмин Б. А. и др. Москва : Машиностроение, 1981. 351 с.

12. Литье в кокиль / С. Л. Бураков и др. ; ред. Вейник А. И. Москва : Машиностроение, 1980. 415 с.

13. Устройство для отлива поршней из алюминиевого сплава : пат. 102551 Российская Федерация : МПК7 B22D15/02. № 2010130754. URL: <http://poleznayamodel.ru/model/10/102551.html>

14. Галдин Н. М., Чернега Д. Ф., Иванчук Д. Ф. Цветное литье : справочник / общ. ред. Н. М. Галдин. Москва : Машиностроение, 1989. 528 с.

15. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. Литейное производство цветных и редких металлов. Москва : Металлургия, 1982. 352 с.

16. Устройство для получения отливки поршня : пат. 2418651 Российская Федерация : МПК7 B22D18/04. № 2009103682/02 ; заявл. 04.02.2009 ; опубл. 20.05.2011. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2418651>

17. Титов Н. Д., Степанов Ю. А. Технология литейного производства : учебник. Москва : Машиностроение, 1974. 472 с.

18. Сергеев П. С. Штамповка жидких цветных металлов и сплавов. Ленинград : Судпромгиз, 1957. 88 с.

19. Батышев А. И. Совмещенные способы литья и прессования. Москва, 1971. 48 с.

20. Способ изготовления поршня двигателя внутреннего сгорания : пат. 2176943 Российская Федерация : МПК7 C22F1/04, B21K1/18. № 99105048/02 ; заявл. 12.03.1999 ; опубл. 20.12.2001.

21. Способ горячей штамповки полых изделий : пат. 2262408 Российская Федерация : МПК7 B21K21/00, B21K29/00, B21J5/02. № 2004114912/02 ; заявл. 18.05.2004 ; опубл. 20.10.2005. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2262408>

22. Способ изготовления поршня двигателя внутреннего сгорания : пат. 2156371 Российская Федерация : МПК7 F02F3. № 99126859/06 ; заявл. 28.12.1999 ; опубл. 20.09.2000.

23. Калпин Ю. Г. Разработка обобщенной теории и технологии объемной изотермической штамповки : дис. ... д-ра юрид. наук. Москва : МАМИ, 1986.

24. Калпин Ю. Г., Гершман Г. В., Кобяков В. А. Изотермическая штамповка поршней из сплава АЛ25. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1979. № 2. С. 12–14.

25. Способ изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания : пат. 2063836 Российская Федерация : МПК7 B23P15/10, B21K1/18. № 94036858/08 ; заявл. 29.09.1994 ; опубл. 20.07.1996.

26. Хорошие поршни для хороших моторов. *Моторный центр АВ – Инжиниринг*. URL: [http://www.ab-engine.ru/rec\\_piston.html](http://www.ab-engine.ru/rec_piston.html)

27. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1987. Москва : Изд-во стандартов, 1985. 25 с.

28. Мак Линн Джеймс. Превращение качества в надежность или почему надежность не становится качеством с течением времени. *Финансы и учет для руководителей*. URL: <http://www.classs.ru/stati/menejment1/nadejnost.html>

29. ГОСТ 20000–88. Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические условия. URL: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)

30. ГОСТ 23465–79. Дизели автомобильные. Общие технические условия. URL: [https://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_23465-79](https://standartgost.ru/g/ГОСТ_23465-79)

31. ГОСТ 53558–09. Автомобильные транспортные средства. Поршни алюминиевые двигателей. Общие технические требования и методы испытаний. URL: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)

32. ГОСТ Р 51998–2002. Дизели автомобильных транспортных средств. Общие технические условия. URL: [http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye\\_dvigateli\\_i\\_detali\\_k\\_nim](http://standartgost.ru/0/1745/1729/1448/1750-avtotraktornye_dvigateli_i_detali_k_nim)
33. ДСТУ 2839–94 (ГОСТ 1583–93). Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. Введ. 01.01.1996. Киев : Госстандарт Украины, 1995. 49 с.
34. Пелих С. Г., Литвиненко М. М. Аналіз і синтез ливарних систем : навч. посіб. Харків : Основа, 1994. 172 с.
35. Білогуб О. В. Науково-технічні основи інтегрованого проектування і виробництва тонкостінних поршнів ДВС : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2011.
36. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки / ред. Г. Ф. Баландин. Москва : Машгиз, 1960. 436 с.
37. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки : в 2-х ч. Ч. 1. Москва : Машиностроение, 1976. 328 с.
38. Вейник А. И. Тепловые основы теории литья. Москва : Машгиз, 1962. 382 с.
39. Анисович Г. А. Затвердевание отливок. Минск : Наука и техника, 1960. 436 с.
40. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. Ленинград : Машиностроение, 1976. 216 с.
41. ДСТУ ISO 9000–1–95. Стандарты по управлению качеством и обеспечению качества. Ч. I. Руководящие указания по выбору и применению. Введ. 11.09.95. Киев : Госстандарт Украины, 1995. 23 с.
42. ДСТУ ISO 9000–2–96. Стандарты по управлению качеством и обеспечению качества. Ч. 2. Руководящие указания по применению ДСТУ ISO 9001–95, ДСТУ ISO 9002–95 и ДСТУ ISO 9003–95. Введ. 27.11.96. Киев : Госстандарт Украины, 1997. 28 с.
43. ДСТУ ISO 9001–95. Системы качества. Модели обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании. Введ. 07.01.94. Киев : Госстандарт Украины, 1995. 16 с.

44. ДСТУ ISO 9004–2001. Системи управління якістю. Настанови щодо поліпшення діяльності. Введ. 27.07.2001. Київ: Держстандарт України, 2001. 70 с.
45. Дударева Н. Ю. Загайко С. А. Самоучитель SolidWorks 2006. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. 336 с.
46. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. Москва : ДМК Пресс, 2004. 432 с.
47. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров : справ. пособие. Москва : Машиностроение, 2004. 512 с.
48. Современные аналитические возможности ANSYS. САПР и графика. 1998. № 9. С. 50–54.
49. Басов К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. Москва : ДМК Пресс, 2006. 248 с.
50. Структура специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных пространственных конструкций / Ткачук Н. А. и др. *Механіка та машинобудування*. 2006. № 1. С. 57–79.
51. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем : технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Ткачук Н. А. и др. *Механіка та машинобудування*. 2006. № 1. С. 57–79.
52. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / Ткачук Н. А. и др. *Механіка та машинобудування*. 2005. № 1. С. 184–194.
53. Леонтьев В. В. Сходимость и точность метода конечных элементов при решении плоской упругой и упруго-пластической задач в FEMLAB. *Вестник СевГТУ*. Севастополь, 2008. Вып. 88. С. 26–30.
54. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: алгоритмы прикладных программ / Петриченко Р. М. и др. Ленинград : Машиностроение, 1990. 328 с.

55. Тихомиров М. Д., Комаров И. А. Основы моделирования литейных процессов. Сравнение метода конечных элементов и метода конечных разностей. *Литейное производство*. 2002. № 5. С. 22–28.
56. Тихомиров М. Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования. *Литейное производство*. 2004. № 5. С. 24–30.
57. Гини Э. Ч., Зарубин А. М., Рыбкин В. А. Технология литейного производства : специальные виды литья. Москва : Академия, 2005. 352 с.
58. Дубицкий Г. М. Литниковые системы. Москва : Машгиз, 1962. 255 с.
59. Рабинович Е. З. Гидравлика. Москва : Машгиз, 1977. 304 с.
60. Гуляев Б. Б. Литейные процессы. Москва : Машгиз, 1976. 210 с.
61. Специальные способы литья : справочник / Ефимов В. А. и др. Москва : Машиностроение, 1991. 436 с.
62. Галдин Н. М., Таран Б. П., Таран С. Б. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. Москва : Машиностроение, 1978. 197 с.
63. Алёхин В. И. Совершенствование литниковых систем для отливок цилиндрического типа из алюминиевых сплавов. *Вісник нац. техн. ун-ту "ХПИ"*. 2006. Вип. 10. С. 104–107.
64. Серебро В. С. Расчет вентиляции металлических форм. *Литейное производство*. 1984. № 10. С. 19–21.
65. Строганов Г. Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Москва : Metallurgy, 1985. 216 с.
66. Неменюк Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Минск : Технопринт, 1999. 270 с.
67. Алюминий : свойства и физическое металловедение : справ. изд. / ред. Хэтч Дж. Е. Москва : Metallurgy, 1989. 422 с.
68. Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. Москва : Metallurgy, 1977. 272 с.
69. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. Москва : Metallurgy, 1978. 312 с.



70. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва : Металлургия, 1978. 640 с.
71. Константинов В. С., Трухов А. П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. Москва : Машиностроение, 1981. 199 с.
72. Трухов А. П., Маляров А. И. Литейные сплавы и плавка. Москва : Академия, 2004. 366 с.
73. LVMFlow 2.91 : 3D. 2006. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
74. Альохін В. І. Комп'ютерно-інтегроване проектування поршнів ДВЗ з урахуванням впливу ливарних дефектів на міцнісну надійність : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / В. І. Альохін ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2013. 20 с.
75. Тарасевич Ю. Ю. Перколяция : теория, приложения, алгоритмы. Москва : Едиториал УРСС, 2002. 112 с.
76. Двигатели внутреннего сгорания : учеб. для вузов : в 3 кн. / Луканин В. Н. и др. Москва : Высш. шк., 2007. Кн.2 : Динамика и конструирование. 400 с.
77. Двигатели внутреннего сгорания : учеб. для вузов по спец. "Строительные и дорожные машины и оборудование" / Хачиян А. С. и др. ; ред. В. Н. Луканин. Москва : Высш. шк., 1985. 311 с.
78. Платонов В. Н., Малькевич А. В. Влияние материала и метода изготовления заготовок алюминиевых поршней на их прочность. *Двигателестроение*. 1982. № 8. С. 26–29.
79. Pequet Ch., Gremaud M., Rappaz M. Modeling of Microporosity, Macroporosity, and Pipe-Shrinkage Formation during the Solidification of Alloys Using a Mushy-Zone Refinement Method. Applications to Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002. Vol. 33A. July. P. 2095–2106.
80. Carlson K. D., Lin Z., Hardin R., Beckermann C. Modeling of Porosity Formation and Feeding Flow in Steel casting. *Proceedings of the 56th SFSA Technical and Operating Conference*. Paper № 4.4. Steel Founders' Society of America : Chicago, 2002. IL.
81. Flow-3D. URL: <https://www.flow3d.com/>

82. Флемингс М. К. Процессы затвердевания : пер. с англ. Москва : Мир, 1979. 424 с.
83. Семенов Б. И., Куштаров К. М. Производство изделий в твердожидком состоянии. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 223 с.
84. Duncan A. J., Han Q., Viswanathan S. Measurement of Liquid Permeability in the Mushy Zones of Aluminium-Copper Alloys. *Metallurgical and materials transactions*. 1999. Vol. 30B. August. P. 745–750.
85. Поппель С. И. Поверхностные явления в расплавах. Москва : Металлургия, 1994. 440 с.
86. Prevention of Porosity Formation and Other Effects of Gaseous Elements in Iron Castings. Final Technical Report / Doğan Ö. N. et al. Albany Research Center. 2005. April.
87. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. London : Taylor and Fransis, 1994. 192 p.
88. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 279 с.
89. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов : пер. с нем. Москва: Мир, 1977. 552 с.
90. Белый И. В., Власов К. П., Клепиков В. Б. Основы научных исследований и технического творчества. Харьков : Вища школа, 1989. 200 с.
91. ГОСТ 14846–81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. Введ. 01.01.1982. Москва : Издательство стандартов, 2003. 41 с.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті в наукових фахових виданнях України

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1.Computer-Integrated Design Pistons with the Influence of Casting Defects./ О.В. Акімов, Ю.В. Орендарчук (Ю.В. Рябець) В.І. Альохін, К.О. Костик, Л.О. Салтиков / *DSMIE 2020: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III pp 13 –22*. С. 13 – 21.

2.Применение жидкостекольных смесей с пониженным содержанием жидкого стекла как фактор повышения качества отливок машиностроительного назначения /Ю. В. Орендарчук, П.С. Зінченко, М.П. Аксененко, А. В. Йовбак/ *Scientific Journal «ScienceRise». Харків, 2016. № 5/2(22)2016*. С.6 – 9.

3.Оптимізація складу формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей двигунів внутрішнього згоряння. /Ю.В. Орендарчук, А.О. Красноухова, І. О. Ачкасов, А.С. Барсук, В.І. Головка/ *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків : НТУ "ХПІ", 2016. № 50 (1222)*. С. 117–121.

4.Development of a system for organizing a modular design and technological preparation for the production of cast iron pistons for internal combustion engines /A.A. Puliaiev, J.V. Orendarchuk, O.V. Akimov, P.S. Penziev, D.V. Marynenko, A.P. Marchenko/ *Technology audit and production reserves. 2017. № 3(1)*. С. 23–27.

5.Мониторинг качества отливок для использования в системах автоматизированного проектирования технологий литейного производства /Ю.В. Орендарчук, Д.В. Мариненко, С.В. Борисенко, І.О. Лоек, В.С. Ананьин/ *Scientific Journal «ScienceRise». 2017. № 4*. С. 48–52.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

6. Аналіз питання, та взаємодія схем діагностування двигунів методами нерозбірного контролю. /С.Ю. Білик, Ю.В. Орендарчук (Ю.В. Рябець), О.Л. Сінческул/ *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я».* MicroCAD-2020; С. 182.

7. Моделювання технологічних процесів лиття ДВЗ. / О.В. Акімов, Ю.В. Орендарчук, Глушко А.В./ *Міжнародні конференції : Литво: Металургія. Запорізька торгово-промислова палата, 2020; С. 20–21.*

8. Дослідження механізму утворення газоусадкових дефектів в литих поршнях ДВЗ з використанням комп'ютерно-інтегрованих систем моделювання. / О.В. Акімов, Ю.В. Орендарчук, Л.С. Золотар, Г. Г. Ідріс/ *Міжнародні конференції : Литве: Металлургія. - Запорізька торгово-промислова палата, 2018; С. 99.*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

проректор з наукової роботи

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

проф. Андрій МАРЧЕНКО



25.05

2021р.

## ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
асистента Орендарчук Юлії Володимирівни  
«Наукові методи комп'ютерно- інтегрованого проектування технологій  
виготовлення відливок поршнів ДВЗ»  
в навчальний процес кафедри ливарного виробництва  
НТУ «ХПІ»

Матеріали дисертаційної роботи Орендарчук Ю.В. використовуються у навчальному процесі кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ» для підготовки студентів за напрямком «Прикладна механіка» зі спеціальності 131.09 «Комп'ютеризоване ливарне виробництво. Художнє та ювелірне литво» під час викладання дисципліни «Експлуатація, обслуговування та надійність ливарного обладнання», «Сучасні методи управління якістю виливків» та «Монтаж, ремонт і наладка приладів і засобів автоматизації».

Директор ННІ МІТ

Віталій ЄПІФАНОВ.

Завідувач кафедрою ЛВ

Олег АКИМОВ