

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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПЕНЗЄВ ПАВЛО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.7

ДИСЕРТАЦІЯ
КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ СКЛАДНИХ
КОРПУСНИХ ВИЛИВКІВ З МОЖЛИВІСТЮ КЕРУВАННЯ
СТРУКТУРАМИ І МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ СПЛАВУ

Спеціальність 136 – Металургія

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



П.С. Пензєв

Науковий керівник:

Акімов Олег Вікторович,

доктор технічних наук, професор

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Пензєв П.С. Конструкторсько-технологічне проєктування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 136 – Металургія. (13 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, пов'язаної з конструкторсько-технологічним проєктуванням складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву.

Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та створення підходу до комп'ютерно-інтегрованого проєктування складних корпусних виливків із комплексним застосуванням інструментів комп'ютерного та математичного моделювання для управління структурами і механічними властивостями сплаву.

Об'єкт дослідження – проєктування складних корпусних виливків на основі використання в процесі досліджень сучасних підходів комп'ютерного моделювання.

Предмет дослідження – концепція та напрямки визначення оптимальної стратегії конструкторсько-технологічного проєктування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву.

У *вступі* обґрунтовано актуальність проблеми, пов'язаної з тим, що не врахування на етапі проєктування технологічних аспектів, а також багатоваріативність технологічних рішень щодо конкретних виливків, може приводити до завищення собівартості виробництва, що, своєю чергою, негативно впливає на конкурентні можливості виробництва. Це потребує комплексного підходу до створення комп'ютерно-інтегрованого проєктування складних корпусних виливків із сумісним комп'ютерним моделюванням різних параметрів

лиття, що впливають на показники виливків. Експерименти проводились на базі ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування».

У *першому розділі* досліджено актуальні науково-технічні завдання, пов'язані з загальними підходами до комп'ютерно-інтегрованого проєктування конструкції виливків, визначенням ролі вибору матеріалів в конструкторсько-технологічному проєктуванні виливків та технологічними особливостями в конструкторсько-технологічному проєктуванні виливків.

У *другому розділі* запропоновано схему проєктування виливків, особливістю якої є використання зворотних зв'язків етапів проєктування, а також підхід до проєктування технології виливку на основі теорії статистичних ігор, та представлено процедуру визначення вхідних даних для проєктування технології ливарної форми, що базується на прогнозуванні програми виробництва.

У *третьому розділі* формалізована задача визначення типу виробництва, який є в числі вхідних даних для проєктування технології виливків, що особливо важливим є для корпусних виливків, зважаючи на їх масо-габаритні характеристики. Ця формалізація заснована на побудові схеми етапів виготовлення виливку та використанні лінійних трендів прогнозу відповідно до MRP-планування. Запропоновано принцип класифікації складових, що формують стратегію розробки технології виливку та проєктування оснастки. Вони узагальнено представляються у вигляді трьох компонентів із введенням відповідних позначень: складова технології, складова матеріалів, складова конструкції. На прикладі корпусних виливків продемонстровано реалізацію принципу класифікації та формування формального опису для визначення стратегії раціонального конструкторсько-технологічного проєктування. На основі структурних схем компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки промодельовані 3 варіанти стратегії вибору технології виливку. Відповідно цьому побудована матриця технологічної гри для визначення оптимальної змішаної стратегії щодо технології виливку та продемонстровано на основі принципу мінімаксу визначення оптимальної стратегії. Інтерпретовано фактор невизначеності у заданні зовнішніх умов.

У четвертому розділі описані результати комп'ютерно-інтегрованого проектування технології корпусу блок-картеру ДВЗ з алюмінієвого сплаву, з чавуну та зі сталі. Визначені головні проблеми виготовлення цього виливку з різних сплавів з визначенням можливих дефектів за різних конструкторсько-технологічних рішень та варіантів їх усунення.

У п'ятому розділі визначено, що для забезпечення комплексу вимог до процесів плавки, зокрема технічних, економічних, екологічних, для виготовлення корпусного литва треба обирати плавку в індукційних печах, при цьому дуже важливо враховувати фізико-хімічні взаємодії у всій системі «розплав – футеровка – шлак». Отримане діагностичне правило, що дозволяє оцінювати температурний режим індукційної плавки за доступними даними про вміст шлаку SiO_2 і CaO . Визначено, що в разі виготовлення стрижнів за ХТС-технологіями ключову роль в формуванні якості стрижнів відіграє якість стрижнєвої суміші. Остання, своєю чергою, визначається як оптимальністю складу за комплексними критеріями якості, так і точністю виконання технологічної операції виготовлення суміші, зокрема дотримання точності дозування відповідно до оптимального складу суміші. Вирішено задачу оптимізації складу ХТС по комплексу критеріїв: живучість суміші, міцність на стиск через 24 години, обсіпаність після 24 годин твердіння. Показано, що деякі з цих критеріїв є конфліктними, що унеможливорює одночасну максимізацію кожного з названих показників. Визначено, що для виливків для шатунно-поршневої групи зворотний зв'язок в схемі конструкторсько-технологічного проектування має бути спрямований на визначення можливостей забезпечення цих вимог конструкцією оснастки та технології виготовлення. Це можна зробити на основі аналізу виливку «поршень», що є представником корпусних виливків із складним внутрішнім отвором, від точності якого залежать експлуатаційні властивості. На основі формалізації задачі класифікації були запропоновані та визначені параметрів простору ознак, що істотно впливають на класифікацію, а також запропоновано та обґрунтовано вид класифікуючого правила для системи підтримки прийняття рішень при виборі

проектно-конструкторських рішень в рамках комп'ютерно-інтегрованої технології проектування литих поршнів.

У висновках наведено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових задач дослідження.

За результатами дослідження отримано такі наукові результати:

Вперше запропонована класифікація корпусних виливків та визначення ключових показників, по яких оцінюється ефективність проектування диференційовано по типам виливків та відповідний принцип формального опису стратегій проектування, спрямованих на визначення оптимальної стратегії щодо конструкторсько-технологічних рішень при проектуванні технології виливків.

Вперше продемонстрований приклад визначення оптимальної стратегії проектування технології виливку на основі теорії статистичних ігор, який свідчить про можливість оцінювання різних конструкторсько-технологічних рішень щодо технології виливку з отриманням оптимальних чистої та змішаної стратегій проектування.

Вперше запропоновано для оцінювання ефективності встановлення надлишків на виливку коефіцієнт приросту усадкової раковини та визначено залежність цього коефіцієнту від об'єму надлишку у вигляді логаріфмічного рівняння регресії, яке дозволяє обирати конструкторсько-технологічні рішення в процесі проектування задля недопущення перевищення витрати металу та мінімізації ймовірності проникнення усадкової раковини в тіло виливку.

Знайшли подальший розвиток результати визначення внутрішніх дефектів газо-усадкової природи у корпусних виливках блок-картеру ДВЗ, що дозволило виявити на основі комп'ютерного моделювання по розроблених 3D-моделях місця формування дефектів та обирати раціональний варіант конструкції ливникової системи.

Знайшли подальший розвиток результати визначення впливу модифікаторів при виготовленні чавунних корпусних виливків як засіб керування структурами і механічними властивостями сплаву, що запропоновано використовувати як частину зворотного зв'язку в конструкторсько-технологічному проектуванні.

Знайшли подальший розвиток результати розробок діагностичних правил, що важливі для контролю технологічних режимів плавки, які впливають на вибір режимів модифікування та, своєю чергою, на процеси структуроутворення, від яких залежать механічні властивості корпусних виливків.

Знайшли подальший розвиток результати розробок класифікаційних правил, які дозволяють визначати потенційний брак виливків шатунно-поршневої групи та ухвалювати раціональні конструкторсько-технологічні рішення на етапі проєктування технології виливків, зокрема в частині зворотного зв'язку в конструкторсько-технологічному проєктуванні.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- запропоновані принципи вибору оптимальної стратегії проєктування можуть бути використані інженерами конструкторами та технологами ливарного виробництва при розробці технології корпусних виливків;

- запропоновані результати комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються в формі при заливці та кристалізації виливків блок-картеру ДВЗ, можуть бути використані інженерами конструкторами та технологами ливарного виробництва для визначення раціонального варіанту ливникової системи за критерієм мінімуму газо-усадкової пористості, розглядаючи це як фактор забезпечення заданих механічних властивостей або їх підвищення;

- запропоновані рішення щодо визначення температурного режиму плавки та позапічної обробки можуть при практичному використанні забезпечити підвищення якості корпусних виливків;

- запропоновані рішення щодо визначення якості виливків шатунно-поршневої групи можуть бути використані для прогнозування можливого браку та стати в нагоді при плануванні робіт по технічному обслуговуванню кокільних машин та оснастки;

- отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути впроваджені на підприємствах з ливарними цехами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі ливарного виробництва НТУ «Харківський

політехнічний інститут» в рамках науково-дослідної роботи кафедри, а також в рамках НДР на тему «Конструкторсько-технологічне проектування та інженерне моделювання процесів лиття виливків з керуванням структурами і механічними властивостями сплавів». Термін виконання роботи: з 01.02.2025 р. до 31.12.2026 р. Номер державної реєстрації НДР: 0125U001039. Наказ № 35 ОД від 28 січня 2025 р. в якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

За результатами дослідження підтверджено практичну та теоретичну цінність розробленого підходу до конструкторсько-технологічного проектування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями різних сплавів для таких виливків, надано практичні рекомендації щодо застосування результатів, зокрема як на конструкторському рівні проектування, так і на технологічному рівні, а також розглянуто перспективи подальшого розвитку дослідження.

Ключові слова: корпусні виливки; якості виливків; напружено-деформований стан; комп'ютерне моделювання; проектування; управління мікроструктурою сплавів; механічні властивості; межа міцності; структура; теорія статистичних ігор; мікроструктура; інженерне моделювання ливарних технологій; температурні режими плавки; конструкторсько-технологічні рішення; газо-усадкові дефекти; механічні характеристики;

ABSTRACT

Penziev P.S. Design and technological engineering of complex body castings with the possibility of controlling the structure and mechanical properties of the alloy. - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 136 – Metallurgy (13 – Mechanical engineering) - National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and technical problem related to the design and technological engineering of complex body castings with the possibility of controlling the structure and mechanical properties of the alloy.

The purpose of the dissertation is the scientific substantiation and development of an approach to computer-integrated design of complex body castings with the comprehensive application of computer and mathematical modelling tools for controlling the structure and mechanical properties of the alloy.

Research object – design of complex body castings based on the use of modern computer modelling approaches in the research process.

Research subject – concept and directions for determining the optimal strategy of design and technological engineering of complex body castings with the possibility of controlling the structure and mechanical properties of the alloy.

The introduction substantiates the relevance of the problem associated with the fact that failure to consider technological aspects at the design stage, as well as the multivariance of technological solutions for specific castings, may lead to increased production costs, which in turn negatively affects production competitiveness. This requires an integrated approach to the creation of computer-integrated design of complex body castings with joint computer modelling of various casting parameters affecting casting performance. The experiments were carried out at the State Enterprise “Kharkiv Design Bureau for Engine Building”.

In the first chapter, current scientific and technical tasks related to general approaches to computer-integrated design of casting structures, determination of the role

of material selection in design and technological engineering of castings, and technological features in the design and technological engineering of castings are investigated.

In the second chapter, a casting design scheme is proposed, the peculiarity of which is the use of feedback between design stages, as well as an approach to casting technology design based on statistical game theory. A procedure for determining input data for mould technology design based on production programme forecasting is also presented.

In the third chapter, the task of determining the production type, which is among the input data for casting technology design, is formalised, which is especially important for body castings considering their weight and dimensional characteristics. This formalisation is based on constructing a scheme of casting manufacturing stages and using linear forecast trends according to MRP planning. A principle for classifying the components forming the strategy of casting technology development and tooling design is proposed. These are generally represented in the form of three components with the introduction of corresponding designations: technological component, material component, and structural component.

Using the example of body castings, the implementation of the classification principle and the formation of a formal description for determining the strategy of rational design and technological engineering are demonstrated. Based on structural diagrams of components for formalising the description of casting technology development strategy and tooling design, three variants of casting technology selection strategy are modelled. Accordingly, a technological game matrix is constructed to determine the optimal mixed strategy for casting technology, and the principle of minimax is used to determine the optimal strategy. The uncertainty factor in setting external conditions is interpreted.

In the fourth chapter, the results of computer-integrated design of the technology for manufacturing an internal combustion engine crankcase body from aluminium alloy, cast iron, and steel are described. The main problems of manufacturing this casting from different alloys are identified, including the determination of possible defects under various design and technological solutions and options for their elimination.

In the fifth chapter, it is determined that in order to ensure a complex of requirements for melting processes, including technical, economic, and environmental ones, induction furnace melting should be selected for the production of body castings, while it is very important to take into account physicochemical interactions in the entire “melt – lining – slag” system. A diagnostic rule has been obtained that allows assessing the temperature regime of induction melting using available data on the content of SiO_2 and CaO in slag. It is determined that in the manufacture of cores using cold-box technologies, the quality of the core mixture plays a key role in shaping core quality. The latter, in turn, is determined both by the optimality of the composition according to comprehensive quality criteria and by the accuracy of performing the technological operation of mixture preparation, particularly compliance with dosing accuracy according to the optimal mixture composition. The problem of optimisation of cold-hardening mixtures according to a set of criteria has been solved, including mixture viability, compressive strength after 24 hours, and friability after 24 hours of hardening. It is shown that some of these criteria are conflicting, making it impossible to maximise each of these indicators simultaneously.

It has been determined that for castings of the connecting rod and piston group, feedback in the design and technological engineering scheme should be aimed at determining the possibilities of meeting these requirements through tooling design and manufacturing technology. This can be achieved based on the analysis of the “piston” casting, which is a representative of body castings with a complex internal hole, the accuracy of which determines operational properties. Based on the formalisation of the classification task, parameters of the feature space that significantly affect classification were proposed and determined, and the type of classification rule for the decision support system in selecting design solutions within the framework of computer-integrated technology for cast piston design was proposed and substantiated.

The conclusions present the main results of the scientific work on solving the research tasks set.

According to the research results, the following scientific outcomes were obtained:

For the first time, a classification of body castings has been proposed and key indicators by which the design efficiency is assessed differentially according to casting types have been determined, along with the corresponding principle of formal description of design strategies aimed at determining the optimal strategy regarding design and technological decisions in casting technology design.

For the first time, an example of determining the optimal strategy for casting technology design based on statistical game theory has been demonstrated, which indicates the possibility of evaluating various design and technological solutions regarding casting technology with obtaining optimal pure and mixed design strategies.

For the first time, to assess the efficiency of allowance application on castings, a coefficient of shrinkage cavity growth has been proposed, and the dependence of this coefficient on allowance volume in the form of a logarithmic regression equation has been determined, which makes it possible to select design and technological solutions in the design process in order to prevent excessive metal consumption and minimise the probability of shrinkage cavity penetration into the casting body.

Further development was achieved in the determination of internal gas-shrinkage defects in crankcase body castings of internal combustion engines, which made it possible, based on computer modelling using developed 3D models, to identify defect formation areas and choose a rational design option for the gating system.

Further development was achieved in determining the influence of modifiers in the production of cast iron body castings as a means of controlling alloy structure and mechanical properties, which is proposed to be used as part of feedback in design and technological engineering.

Further development was also achieved in the development of diagnostic rules important for controlling melting process conditions affecting the choice of modification regimes and, consequently, the structure formation processes determining the mechanical properties of body castings.

Further development was achieved in the development of classification rules that make it possible to determine potential defects of castings of the connecting rod and piston group and to make rational design and technological decisions at the stage of

casting technology design, particularly in terms of feedback in design and technological engineering.

The practical significance of the obtained results is as follows:

- the proposed principles for selecting the optimal design strategy can be used by design engineers and foundry process engineers in the development of body casting technology;
- the proposed results of computer modelling of processes occurring in the mould during pouring and solidification of internal combustion engine crankcase castings may be used by design engineers and foundry technologists to determine a rational gating system option according to the criterion of minimum gas-shrinkage porosity, considering this as a factor in ensuring specified mechanical properties or improving them;
- the proposed solutions for determining the temperature regime of melting and out-of-furnace treatment may ensure an increase in the quality of body castings in practical application;
- the proposed solutions for determining the quality of castings of the connecting rod and piston group may be used to predict possible defects and may be useful in planning maintenance work for permanent mould machines and tooling;
- the results obtained in the dissertation may be implemented at enterprises with foundry workshops.

The relationship of the work with scientific programmes, plans, and topics: the dissertation was carried out at the Department of Foundry Production of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” within the framework of the department’s research activities, as well as within the framework of the research project entitled “Design and Technological Engineering and Engineering Modelling of Casting Processes with Control of Structures and Mechanical Properties of Alloys.”

The period of the work execution: from 01.02.2025 to 31.12.2026.
State registration number of the research project: 0125U001039.
Order No. 35 OD dated January 28, 2025, in which the applicant participated as a performer of individual stages.

According to the research results, the practical and theoretical value of the developed approach to design and technological engineering of complex body castings with the possibility of controlling the structure and mechanical properties of various alloys for such castings has been confirmed. Practical recommendations for applying the results are provided, particularly at both the design and technological levels, and prospects for further research development are considered.

Keywords: body castings; casting quality; stress-strain state; computer modelling; design; alloy microstructure control; mechanical properties; tensile strength; structure; statistical game theory; microstructure; engineering modelling of foundry technologies; melting temperature regimes; design and technological solutions; gas-shrinkage defects; mechanical characteristics.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано наукові результати:

1. П. С. Пензєв. Визначення раціонального завантаження ливарного устаткування. Technology audit and production reserves. Харків: Технологічний центр, № 4/2(6), 2012. р. 29–30.
2. Puliaiev A., Orendarchuk J., Akimov O., Penziev P., Marynenko D., Marchenko A. Development of a system for organizing a modular design and technological preparation for the production of cast iron pistons for internal combustion engines. Technology audit and production reserves. Харків: Технологічний центр, № 3/1(35), 2017. р. 23–27.
3. П.С. Пензєв, В.І. Альохін, О.В. Акімов, О.В. Грицюк. Аналіз якості литого блок-картера автомобільного дизеля 4ДТНА1 з використанням інженерного моделювання. Двигуни внутрішнього згоряння. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. – № 2.
4. О. В. Акімов, П. С. Пензєв, Л. О. Салтиков, О.М. Горощенко. Проектування прогнозуємих структур перерізів виливка блок-картера циліндрів. Вісник НТУ "ХПІ". Харків: НТУ «ХПІ», № 16 (1292), с. 3–8.
5. О. С. Коваль, П. С. Пензєв, Є. П. Димко, А. А. Пуляев. Управління якістю конструкційного чавуну для фасонних виливків на основі моделювання

ефективності його модифікування. Вісник НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2014. №40 (1083). с. 138–145.

6. Penziev, P., Lavryk, Ye. (2024). Diagnostics of the temperature condition of cast iron melting in induction furnaces by the content of SiO_2 and CaO in slag. *ScienceRise*, 1, 14–20. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003558>.

7. Penzev, P., Frolova, L., Lysenkov, V., Lavryk, Y. (2024). Determination of the influence of the surplus construction on the parameters of the shrinkage shells in the «Body»-type steel castings when casting in single sand molds. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (1 (78)), 00–00. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310424> (Scopus).

8. Akimov, O., Alekhin, V., Penzev, P., Dyachenko, A., Ovcharenko, A. Analysis of technological factors that significantly affect the formation of stresses in the cast machine parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(78)), 43–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56199> (Scopus).

9. Klymenko, S., Verkhovliuk, A., Sevoian, A., Akimov, O., Ponomarenko, O., Penziev, P. (2024). Determining rational complex modifying and alloying additives to improve the mechanical characteristics of gray cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(12 (132)), 15–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318552> (Scopus).

Опубліковані праці апробаційного характеру

10. А. О. Потапов, А. А. Сєвоян, С. Д. Євтушенко, П. С. Пензєв, О. В. Акімов. «Вибір сплаву та обґрунтування технології виконання литих поршнів» Міжнародна науково-практична конференція «Литво-2025», 27-29 травня 2025 р., Харків- Київ – с.227. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90583>

11. А.А. Ригальов, П. С. Пензєв, В. С. Кузьмін, В. В. Радченко, О. В. Акімов. «Дослідження процесів формування металевого зв'язку в біметалічних виливках системи чавун – титановий сплав» Міжнародна науково-практична конференція «Литво-2025», 27-29 травня 2025 р., Харків- Київ – с.238. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90585>

12. І. О. Шевченко, С. Д. Євтушенко, П. С. Пензєв, О. В. Масалітіна, О. В. Акімов. «Вибір відновника оксиду титану для підвищення міцності зв'язку в біметалічній композиції чавун – титановий сплав» Міжнародна науково-практична конференція «Литво-2025», 27-29 травня 2025 р., Харків- Київ – с.303. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90591>
13. П.С. Пензєв. «Інженерне моделювання технологічних процесів лиття складних корпусних виливків на прикладі деталі-представника двигуну типу 4ДТНА1». Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія 2023» (10-12 жовтня 2023 р., м. Харків-м. Київ с. 172. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>
14. Пензєв П. С., Лаврик Є.Є., Лисенков В. Ю. «Вплив конструкції надлишків на формування усадкових раковин у сталевих виливках типу «Корпус». Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах. XVII Міжнародна науково-технічна конференція, Запоріжжя, 26-27 листопада 2024р. с. 42. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86203>
15. Євтушенко С.Д., Севоян А.А., Пензєв П.С., Акімов О.В «Теплоізоляція литих поршнів ДВЗ». Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. с. 382. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/9043>
16. Євтушенко, С. Д., Севоян, А. А., Пензєв, П. С., Масалітіна, О. В., Акімов, О. В., & Ян, В. «Ступінь змочування металів». Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. с.383. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90434>
17. Масалітіна О. В., Пензєв П. С., Севоян А. А., Акімов О. В. «Дослідження утворення проміжного покриття титанової вставки». Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 вересня 2025 р. ; заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ : НТУУ "КПІ", 2025. – С. 377-378. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94664>
18. Пензєв П. С., Севоян А. А., Масалітіна О. В., Акімов О. В. «Обґрунтування матеріалу та конструктивних параметрів біметалічного поршня».

Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 вересня 2025 р. ; заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ : НТУУ "КПІ", 2025. – С. 398-399. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94665>

19. Севоян А. А., Масалітіна О. В., Пензєв П. С., Акімов О. В. «Одержання біметалічної композиції чавун – титановий сплав». Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 вересня 2025 р. ; заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ : НТУУ "КПІ", 2025. – С. 427-429. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94675> .

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ВИЛИВКІВ.....	13
1.1 Загальні підходи до комп'ютерно-інтегрованого проєктування конструкції виливків	13
1.2 Роль вибору матеріалів в конструкторсько-технологічному проєктуванні виливків	19
1.3 Технологічні особливості в конструкторсько-технологічному проєктуванні виливків	27
1.4 Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЯ РАЦІОНАЛЬНОГО КОНСТРУКТОРСЬКО- ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ВИЛИВКІВ З УРАХУВАННЯМ ВАРІАТИВНОСТІ ЇХ НОМЕНКЛАТУРИ	37
2.1 Схема проєктування виливків на основі зворотних зв'язків етапів проєктування.....	37
2.2 Підхід до проєктування технології виливку на основі теорії статистичних ігор	49
2.3 Визначення вхідних даних для проєктування технології ливарної форми на основі прогнозування програми виробництва.....	56
2.4 Висновки до розділу 2	65
РОЗДІЛ 3 НАПРЯМКИ ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЛИВКУ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ОСНАСТКИ	68
3.1 Визначення загальної потреби у виливках та типу виробництва.....	68

3.2 Визначення напрямів конструкторсько-технологічних рішень як основи для вибору стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки.....	77
3.3 Приклад визначення оптимальної стратегії проєктування технології виливку на основі теорії статистичних ігор	87

РОЗДІЛ 4 КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОРПУСНИХ ВИЛИВКІВ 96

4.1 Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусу блок-картеру ДВЗ з алюмінієвого сплаву	96
4.2 Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусу блок-картеру ДВЗ з чавуну	106
4.3 Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусного виливку зі сталі	114
4.4 Висновки до розділу 4	123

РОЗДІЛ 5 ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК В СХЕМІ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ВИЛИВКІВ НА ОСНОВІ ПРАКТИЧНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЄКТУВАННЯ 126

5.1 Діагностика температурного режиму плавки як фактору керування структурами і механічними властивостями сплаву для корпусного литва	126
5.2 Вплив якості технологічних операцій при виготовленні стрижнів на геометричну точність центральних отворів в корпусних виливках.....	135
5.4 Висновки до розділу 5	150

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТОК А	172
Список публікацій здобувача за темою дисертації	172
ДОДАТОК Б.....	175
Акт впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи.....	175

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДВЗ	- Двигун внутрішнього згорання
САПР	- Система автоматизованого проектування, англ. CAD — Computer-Aided Design
ТГ	- Технологічна гра
CAD	- Computer-Aided Design — це система автоматизованого проектування (САПР)
CAM	- Computer-aided manufacturing — це програмне забезпечення, яке автоматизує процес створення керуючих програм для верстатів із ЧПК (числовим програмним керуванням) на основі тривимірних CAD-моделей
CAE	- Computer-Aided Engineering — це програмне забезпечення для інженерного аналізу, моделювання та оптимізації фізичних процесів у виробках (міцність, теплообмін, гідродинаміка) за допомогою комп'ютера.
MRP-планування	- Material Requirements Planning — планування потреби в матеріалах) — це система управління запасами та виробництвом, яка розраховує необхідну кількість сировини та комплектуючих, базуючись на головному плані виробництва

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні тенденції проектування, виробництва та експлуатації складних корпусних виливків характеризуються постійним збільшенням потужності машин, що приводить, у свою чергу, до збільшення термомеханічних навантажень на окремі деталі та вузли. Забезпечення необхідних характеристик корпусних виливків багато в чому залежить від якості конструкційних матеріалів та параметрів технології виробництва. Наприклад, в двигунах з примусовим запалюванням автотранспортного призначення застосовуються картери з алюмінієвих сплавів, що мають досить високі міцнісні властивості та зносостійкість в литому стані. При виборі за матеріал корпусних виливків чавуну виникають проблеми, пов'язані із структуроутворенням. Вони обумовлені тим, що корпусні виливки є габаритними виливками з тонкими стінками, що сприяє формуванню мікроструктури по метастабільній схемі.

При виготовленні корпусних виливків із сталі додаються проблеми, пов'язані з усадковими процесами, а з урахуванням габаритності корпусних виливків виникають ризики проникнення усадкових раковин в тіло виливків.

У двигунобудуванні при проектуванні нових ДВЗ і модернізації існуючих особлива увага приділяється міцносним розрахункам деталі блок-картера. Для розрахунків блок-картерів використовується деталь заданої геометричної конфігурації з певного конструкційного матеріалу, але треба більше уваги надавати врахуванню технологічних чинників, які пов'язані з реальними ливарними дефектами газоусадкового характеру та впливу їх розмірів і місць розташування на міцносні характеристики блок-картерів ДВЗ.

Не врахування на етапі проектування технологічних аспектів, а також багатоваріативність технологічних рішень щодо конкретних виливків, може приводити до завищення собівартості виробництва, що, своєю чергою, негативно впливає на конкурентні можливості виробництва.

Комплексний підхід до створення комп'ютерно-інтегрованого проектування складних корпусних виливків із сумісним моделюванням теплових,

гідродинамічних параметрів лиття, розрахунком напружено-деформованого стану (НДС), а також урахування впливу ливарних дефектів на міцносну надійність цих виливків і якості стрижнів на формування геометричної та розмірної точності має передбачати як конструкторські, так і технологічні складові по окремих технологічних операціях виготовлення виливків.

У зв'язку з цим, **актуальною науковою задачею** є розробка конструкторсько-технологічного проєктування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву, що визначило напрям дисертаційного дослідження.

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

Дисертаційна робота виконана на кафедрі Ливарне виробництво НТУ «Харківський політехнічний інститут» в рамках науково-дослідної роботи кафедри, а також в рамках НДР на тему «Конструкторсько-технологічне проєктування та інженерне моделювання процесів лиття виливків з керуванням структурами і механічними властивостями сплавів». Термін виконання роботи: з 01.02.2025 р. до 31.12.2026 р. Номер державної реєстрації НДР: 0125U001039. Наказ № 35 ОД від 28 січня 2025 р., в якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та створення підходу до комп'ютерно-інтегрованого проєктування складних корпусних виливків із комплексним застосуванням інструментів комп'ютерного та математичного моделювання для управління структурами і механічними властивостями сплаву.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- проаналізувати існуючі рішення в області сучасних підходів до конструкторсько-технологічного проєктування виливків;
- запропонувати концепцію раціонального конструкторсько-технологічного проєктування виливків автомобілебудування з урахуванням варіативності їх номенклатури;

- розробити напрямки вибору стратегії розробки технології виливку та проектування оснастки;
- виконати комп'ютерно-інтегроване проектування технології представників корпусних виливків з різних сплавів;
- визначити зворотний зв'язок в схемі конструкторсько-технологічного проектування виливків на основі практичного відпрацювання результатів проектування

Об'єкт дослідження – проектування складних корпусних виливків.

Предмет дослідження – концепція та напрямки визначення оптимальної стратегії конструкторсько-технологічного проектування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву.

Методи дослідження.

- системний аналіз – для класифікації корпусних виливків та визначення ключових показників, по яких оцінюється ефективність проектування диференційовано по типам виливків та формального опису стратегій проектування;
- методи теорії статистичних ігор – для визначення оптимальних стратегій щодо конструкторсько-технологічних рішень відносно технології виливків;
- метод прогнозних лінійних трендів – для визначення потреби у виливках та типу виробництва, що є одним з факторів при проектуванні технології виливків;
- методи комп'ютерного моделювання процесів в залитих формах – для виявлення внутрішніх дефектів газо-усадкової природи та локалізації усадковин раковин у виливках;
- методи аналізу поверхні відгуку – для визначення оптимального складу ХТС та визначення необхідного дозування суміші при виготовленні стрижнів задля забезпечення заданих їх властивостей та зниження ризиків порушення геометричної та розмірної точності порожнин у корпусних виливках;
- методи параметричної класифікації – для визначення діагностичних правил щодо відповідності температурних режимів плавки заданим та оцінювання якості виливків шатунно-поршневої групи.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті виконання дисертаційної роботи отримані наступні наукові результати:

– *удосконалено* класифікацію корпусних виливків та визначення ключових показників, по яких оцінюється ефективність проєктування диференційовано по типам виливків та відповідний принцип формального опису стратегій проєктування, спрямованих на визначення оптимальної стратегії щодо конструкторсько-технологічних рішень при проєктуванні технології виливків.

– *вперше запропоновано* приклад визначення оптимальної стратегії проєктування технології виливку на основі теорії статистичних ігор, який свідчить про можливість оцінювання різних конструкторсько-технологічних рішень щодо технології виливку з отриманням оптимальних чистої та змішаної стратегій проєктування, а також запропоновано для оцінювання ефективності встановлення надлишків на виливку коефіцієнт приросту усадкової раковини та визначено залежність цього коефіцієнту від об'єму надлишку у вигляді логарифмічного рівняння регресії, яке дозволяє обирати конструкторсько-технологічні рішення в процесі проєктування задля недопущення перевищення витрати металу та мінімізації ймовірності проникнення усадкової раковини в тіло виливку.

– *отримали подальший розвиток* результати визначення внутрішніх дефектів газо-усадкової природи у корпусних виливках блок-картеру ДВЗ, що дозволило виявити на основі комп'ютерного моделювання по розроблених 3D-моделях місця формування дефектів та обирати раціональний варіант конструкції ливникової системи, результати визначення впливу модифікаторів при виготовленні чавунних корпусних виливків як засіб керування структурами і механічними властивостями сплаву, що запропоновано використовувати як частину зворотного зв'язку в конструкторсько-технологічному проєктуванні, результати розробок діагностичних правил, що важливі для контролю технологічних режимів плавки, які впливають на вибір режимів модифікування та, своєю чергою, на процеси структуроутворення, від яких залежать механічні властивості корпусних виливків, результати розробок класифікаційних правил, які дозволяють визначати потенційний брак виливків шатунно-поршневої групи та ухвалювати раціональні

конструкторсько-технологічні рішення на етапі проєктування технології виливків, зокрема в частині зворотного зв'язку в конструкторсько-технологічному проєктуванні.

Практична значимість отриманих результатів полягає в можливості безпосереднього використання запропонованих результатів і методів при впровадженні перспективних ливарних технологій та окремих рішень щодо підвищення якості корпусних виливків на підприємствах з ливарними цехами. При цьому:

- запропоновані принципи вибору оптимальної стратегії проєктування можуть бути використані інженерами конструкторами та технологами ливарного виробництва при розробці технології корпусних виливків;

- запропоновані результати комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються в формі при заливці та кристалізації виливків блок-картеру ДВЗ, можуть бути використані інженерами конструкторами та технологами ливарного виробництва для визначення раціонального варіанту ливникової системи за критерієм мінімуму газо-усадкової пористості, розглядаючи це як фактор забезпечення заданих механічних властивостей або їх підвищення;

- запропоновані рішення щодо визначення температурного режиму плавки та позапічної обробки можуть при практичному використанні забезпечити підвищення якості корпусних виливків;

- запропоновані рішення щодо визначення якості виливків шатунно-поршневої групи можуть бути використані для прогнозування можливого браку та стати в нагоді при плануванні робіт по технічному обслуговуванню кокільних машин та оснастки;

- отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути впроваджені на підприємствах з ливарними цехами.

Результати досліджень впроваджено (Додаток Б):

- в навчальний процес кафедри «Ливарне виробництво», Національного технічного університету «ХП».

Авторський внесок здобувача полягає в розробці концепції раціонального конструкторсько-технологічного проєктування корпусних виливків з урахуванням варіативності їх номенклатури, визначенні напрямків вибору стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки, комп'ютерно-інтегрованому проєктуванні технології корпусних виливків, визначенні технологічних факторів зворотного зв'язку в схемі конструкторсько-технологічного проєктування виливків на основі практичного відпрацювання результатів проєктування, які забезпечують виконання поставлених в дисертаційній роботі наукових завдань. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та в співавторстві опубліковані у публікаціях (Додаток А):

1) фахові видання України:

[1] – здобувачем проведений аналіз режимів роботи ливарного устаткування, визначені критерії раціонального завантаження обладнання та розроблен підхід до підвищення ефективності використання виробничих потужностей.

[2] – здобувачем виконано аналіз технологічних параметрів виготовлення чавунних поршнів, проведено дослідження конструктивно-технологічних рішень при модульному проєктуванні та сформовано пропозиції щодо технологічної підготовки виробництва. Співавтори: Пуляєв А., Орендарчук Ю., Акімов О., Мариненко Д., Марченко А.

[3] – особистий внесок здобувача полягає у виконанні інженерного моделювання процесу лиття блок-картера, аналізі дефектоутворення та оцінці впливу технологічних параметрів на якість виливка. Співавтори: Альохін В., Акімов О., Грицюк О.

[4] – здобувачем проведено дослідження формування структури виливка у різних перерізах блок-картера, виконано аналіз впливу умов охолодження та запропоновано підходи до прогнозування структури виливка. Співавтори: Акімов О., Салтиков Л., Горошенко О.

[5] – особистий внесок здобувача полягає у дослідженні процесів модифікування конструкційного чавуну, аналізі впливу модифікаторів на

властивості матеріалу та участі у побудові моделей оцінювання ефективності модифікування. Співавтори: Коваль О., Димко Є., Пуляєв А.

[6] – здобувачем проведено експериментальні дослідження шлакових систем при плавленні чавуну в індукційних печах, встановлено залежності між вмістом оксидів у шлаку та температурним станом плавки, а також запропоновано підхід до діагностики температурних режимів.

2) Видання що індексуються у Scopus та Web of Science:

[7] - Особистий внесок здобувача полягає у проведенні моделювання процесів формування усадкових раковин у сталевих корпусних виливках, дослідженні впливу конструкції надлишків на параметри дефектів та аналізі результатів комп'ютерного моделювання. Співавтори: Фролова Л., Лисенков В., Лаврик Є.

[8] - Здобувачем виконано аналіз технологічних факторів, що впливають на формування напружень у литих деталях машин, проведено чисельне моделювання та оцінено вплив технологічних параметрів на напружено-деформований стан виливків. Співавтори: Акімов О., Альохін В., Дяченко О.

[9] - Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні впливу комплексних модифікувальних та легувальних добавок на механічні властивості сірого чавуну, аналізі експериментальних результатів та оцінюванні ефективності запропонованих складів. Співавтори: Клименко С., Верховлюк А., Севоян А., Акімов О., Пономаренко О.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Литво-2023», (м. Харків-Київ. 2023), Міжнародній науково-технічній конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (м. Запоріжжя, 2024), Міжнародній науково-практичній конференції «Литво-2025» (м. Харків-Київ. 2025), Міжнародній науково-практичній конференції MicroCAD-2025 (м. Харків. 2025), Міжнародній науково-технічній конференції Нові матеріали і технології в машинобудуванні 2025. (м. Київ, 2025).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень, що виносяться на захист, опубліковані у 9 наукових працях, з них: 6 статей – у

наукових періодичних фахових виданнях України категорії Б; 3 статті – у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus (категорія А); 10 матеріалів апробаційного характеру.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 156 сторінок, включаючи 63 рисунків по тексту, 15 таблиць по тексту. Список використаних джерел містить 121 найменувань на 15 сторінках.

РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ВИЛИВКІВ

1.1 Загальні підходи до комп'ютерно-інтегрованого проєктування конструкції виливків

Ефективне ливарне виробництво є саме тим виробництвом, від якого залежить ефективність роботи промислового підприємства. З іншого боку, це енерго- та ресурсовитратне виробництво, яке потребує особливих підходів задля забезпечення конкурентоздатних умов. З урахуванням цього, підготовка ливарного виробництва має враховувати змінюваність ринку, динаміку процесів, що відбуваються в сучасній економіці, та швидко реагувати на нові умови, адаптуючись до них, бо, які відзначено в роботі [1], сучасне виробництво стикається з безпрецедентними викликами через зростання різноманітності, волатильності ринку та розподілене глобальне виробництво. В цій роботі підкреслюється, що фундаментальним наслідком глобалізації та ринкової невизначеності є зростаюча складність виробничих, технологічних та економічних систем, а тому щоб отримати переваги в майбутньому, виробничі компанії повинні не лише впроваджувати гнучкі технічні рішення, але й ефективно впроваджувати інновації. В цьому контексті важливо згадати роботу [2], в якій визначалася роль людського фактору на виробничу систему. В ній запропоновано методологію для систематичного визначення складності продукту та процесу для виробничого середовища. Модель складності базується на трьох елементах: загальна кількість інформації, різноманітність інформації та інформаційний зміст, який відповідає зусиллям, спрямованим на створення функції в продукті. Складність продукту та процесу в цьому аналізі розділені та розглядаються незалежно. Але з точки зору комп'ютерно-інтегрованого проєктування такий підхід не можна вважати за раціональний. Таке проєктування має враховувати комплекс факторів. Так, в роботі [3] відзначається, що вища складність форми при виготовленні литих деталей призводить до нижчої технологічності, що означає неоптимальну якість, вищу

вартість та зниження продуктивності. Тому кількісна оцінка та порівняння складності форми альтернативних конструкцій виливків може бути дуже корисною при проектуванні з точки зору технологічності. Як один з варіантів рішення пропонується коефіцієнт складності форми, що базується на використанні зважених критеріїв на основі параметрів геометрії деталі, таких як кількість елементів із стрижнями, об'єм та площа поверхні виливку, об'єм стрижнів, товщина перерізу та хід протягування. Запропоновані коефіцієнти критеріїв обчислюються за допомогою регресійного аналізу з використанням фактичної складності форми. Остання визначається з точки зору додаткових витрат на виготовлення ливарного оснащення. Питання визначення доцільності та складності форм, як одні з найбільш актуальних питань при виготовленні литих виробів, розглядалися в роботах [4, 5], а емпіричне рівняння для оцінки вартості оснащення залежно від складності форми може бути знайдено в роботі [6]. Але слід враховувати, що виготовлення виливків зі сплавів потребує врахування багатьох факторів, зокрема реології рідини, фізико-хімічних особливостей, температури, фазових перетворень тощо. Усе це має бути враховане при проектуванні ливарних форм. Так, в роботі [7] використані геометричні характеристики та параметри складності форми для оцінки вартості ливарних форм та швидкого оснащення. Особливістю є те, що геометричні характеристики були ув'язані з необхідністю виготовлення порожнини, а фактори складності форми були ув'язані з поверхнею роз'єму форм, наявністю бічних елементів, текстурою поверхні та іншими вторинними елементами конструкції форми.

В роботі [8] представлено систематичний огляд публікацій, в яких досліджується складності продукту та операційної ефективності, виміряної з точки зору вартості, якості часу та надійності, у виробничих та постачальних компаніях, з урахуванням виробничих факторів, а також механізми, що лежать в основі цих взаємозв'язків. Було показано, що складність продукту має послідовно негативний зв'язок з показниками вартості, часу, якості та ефективності доставки. Зважаючи на особливість продукту ливарного виробництва слід враховувати також, що це заготівельне виробництво, тому продукт ливарних технологій потребує ще

подальших технологічних операцій, внаслідок чого складність отримання кінцевого продукту, узагальнено машинобудування, стає ще більшою. Тому треба також враховувати ту обставину, що якість продукту формується послідовно, тому якщо на етапі конструювання та виготовлення виливків формується брак, це може лягти на кінцевий продукт, відповідно вартість його буде зовсім іншою. Про це також зазначається в роботі [9], присвяченій розробці методів та моделей для оцінки виробничих витрат саме на ранній стадії проектування, пов'язаних зі складністю процесів обробки.

В роботі [10] показано, що в разі адитивного виробництва одним важливим аспектом, спільним для всіх таких процесів, є рух головки, який безпосередньо впливає на якість деталі та час виготовлення. Було розроблено дискретизовану версію змінних, що стосуються процесів, яка включає три типи змінних: параметри процесу, ключові змінні моделювання та показники ефективності. Використання адитивного виробництва при виготовлення ливарної оснастки є перспективним процесом, тому важливо враховувати усі складові, від якості яких залежить геометрична та розмірна точність модельного комплекту і, як наслідок, виливків.

Модель для вимірювання складності складання виробів представлена в роботі [11], а розвиток ідеї формалізації складності знайшовся в роботі [12], де описана розробка програми, яка розпізнає ознаки в програмному забезпеченні САПР і обчислює індекс складності форм в режимі реального часу. Як зазначають автори цієї роботи, це дозволить проектувальникам розрахувати очікуване значення складності безпосередньо в процесі проектування. Це, своєю чергою, дозволяє оцінювати орієнтовну собівартість виробництва ще на ранній його стадії.

Використання параметричних моделей на етапі економічної оцінки під час фази проектування запропоноване в роботі [13], де відзначається що 80% вартості готового продукту визначаються рішеннями, прийнятими на етапі конструювання, а автоматизована система розпізнавання ознак для підтримки концептуального інженерного проектування наведена в роботі [14]. Очевидно, що ці питання лежать всередині комп'ютерно-інтегрованого проектування. Від ефективності якого й залежить успіх в формуванні, зокрема, виливків як продукту ливарного

виробництва. Так, роботи [15–17] присвячені моделюванню процесів лиття під низьким тиском, зокрема виливків коліс з алюмінієвих та магнієвих сплавів, з метою оптимізації цих процесів.

В роботі [18] робиться акцент на тому, що конструкція виробу є ключовим моментом для формування конкурентоспроможного продукту та, власне, виробництва. Тому невміння правильно конструювати означає програш на ринку і відставання від конкурентів. В дослідженні представлено розроблений індекс складності процесу лиття під низьким тиском. Підкреслюється, що цей процес є унікальним, але складним для реалізації, тому що залежить від багатьох факторів плавлення металу та затвердіння його у ливарній формі. Було використано три різні головки циліндрів, виготовлені методом лиття під низьким тиском, з типами продуктів 3SZ, 1TR та 2TR. Аналіз складності процесу виконувався на основі фізичних та нефізичних параметрів процесу лиття. До фізичних параметрів було віднесено пристрої, інструменти, датчики та обладнання. Нефізичні параметри визначалися особливостями та специфікаціями підпроцесу лиття під низьким тиском: захоплення, заповнення, затвердіння та обробка. В результаті моделювання було визначено складність кожного продукту: 1TR має індекс 7,08, 2TR – 6,93, 3SZ – 5,14. Запропоновано цей результат у вигляді чисельних оцінок складності використовувати для раннього проектування виливків та оцінки вартості процесу та готового продукту.

Тенденції розвитку та застосування автоматизованих комп'ютерних систем для проектування та забезпечення якості ливарних виробів та їх використання для розмірно-геометричного аналізу виливків представлені в роботах [19, 20]. При цьому показано, що використання комп'ютерно-інтегрованих технологій є розвитком традиційних систем автоматизованого проектування (САПР) в напрямку сумісного CAD/CAM/CAE підходу [21– 23]. На підтвердження ефективності такого підходу можуть бути наведені роботи [24–26], в яких представлені результати прикладного застосування CAD/CAM/CAE рішень для корпусного виливку блок-картера дизеля «СМД», зокрема на рівні моделювання та визначення власних коливань виливка блок-картера дизеля «СМД», фазового

переходу та охолодження цього виливку та залишкової напруги в ньому за різних конструкторсько-технологічних рішень.

У роботах [27, 28] запропоновані рішення в галузі комп'ютерно-інтегрованого проектування технології виготовлення поршнів для двигунів внутрішнього згоряння. Запропоновано результати комп'ютерного моделювання процесу кристалізації в литих деталях типу «поршень» при використанні різних термоізолюючих покриттів кокіля. З отриманих результатів зроблено висновок про можливість оптимізації параметрів якості поршня шляхом ефективного управління процесами кристалізації. При цьому показано, що використання різних термоізолюючих покриттів кокіля впливає на формування дефектів усадок в литих деталях типу «поршень».

Необхідність урахування технологічних чинників у формуванні якості виливків у процесі комп'ютерно-інтегрованого проектування зазначено у роботі [29]. Це підтверджується у роботі [30], де проведено моніторинг розмірної точності виливки «втулка», що виготовляється за умов автоматизованого ливарного виробництва. Встановлено реальні можливості існуючого технологічного процесу забезпечення заданих вимог якості до розмірної точності. Виявлено систематичні похибки та проаналізовано їх причини. Описана процедура, як приклад, може бути рекомендована для використання у системах автоматизованого проектування ливарного виробництва. В роботі [31] засобами CAD/CAM/CAE зроблено детальний аналіз погрешностей формоутворення для складних виливків коліс турбонаддуву. При цьому відзначено, що складність конструкцій накладає обмеження на технології виготовлення, зокрема для прикладу складних профілів лопаток в геометрії виливку показано, що процеси усадки на декількох технологічних операціях можуть значно впливати на формування геометричної та розмірної точності. Тому важливо на етапі автоматизованого проектування засобами систем автоматизованого проектування (САПР) враховувати такі фактори, бо проектування засобами САПР технологій ливарного виробництва є особливо актуальними протягом кількох останніх десятиліть, що пов'язано з активним впровадженням інформаційних технологій [32, 33]. Стосовно корпусних

виливків литих деталей ДВЗ рішення щодо раціонального процесу конструкторсько-технологічної підготовки виробництва поршнів можуть бути знайдені в роботі [34]. У роботах [35–38] були представлені основні етапи оцінки впливу технологічних дефектів на міцність поршнів ДВЗ, які включали:

- виконання аналізу технологічного процесу виробництва деталей поршнів ВАЗ 21083-1004015 з використанням методики визначення місць дислокації та розмірів ливарних дефектів;

- створення скінчено-елементної моделі поршня ВАЗ 21083-1004015 з дислокованими дефектами усадкового характеру, що дозволило на основі результатів аналізу термомеханічного навантаження «щільного» поршня визначити точки контролю значень напруги в дефектах;

- проведення повнофакторного чисельного експерименту, згідно з яким виконано моделювання термомеханічного навантаження поршня з дислокованими ливарними дефектами при стаціонарному режимі роботи двигуна;

- моделювання термомеханічного навантаження поршня з дислокованими дефектами при перехідному процесі роботи двигуна для характерних кроків експерименту, на яких зафіксовано максимальні значення полів напруг;

- обчислення значень коефіцієнтів запасу міцності з використанням методики розрахунку деталей ДВЗ на втомну міцність у місцях дислокації ливарних дефектів, у межах розмірів від 0,3 до 1,3 мм;

- знаходження залежність напруг, що виникають, від розмірів дефектів, за допомогою методу рідж-аналізу.

Результати досліджень, викладених в роботі [39], відзначають, що для конструкторсько-технологічного проектування сучасних литих деталей ДВЗ системи інженерного моделювання технологічних процесів виробництва та аналізу теплового та напружено-деформованого стану литих деталей ДВЗ є найбільш ефективними. Виконання вимог щодо якості, надійності литих алюмінієвих поршнів починається на початковій стадії виробництва та регламентуються технічними умовами. Контроль якості на початковому етапі виробництва здійснюється згідно з такими основними вимогами:

- відхилення маси від заданої в кресленні деталі;
- відхилення від заданої твердості та тимчасового опору матеріалу у литій термообробленій деталі;
- неприпустимість усадкових раковин у певних місцях виливку;
- наявність у тілі поршня газової пористості у кількості, що визначається ТУ У 3.34-00236027.020-2000 для поршнів до карбюраторних автомобільних двигунів.

Вимоги щодо твердості та тимчасового опору матеріалу сув виконуються за дотримання хімічного складу сплаву. Маса деталі та вимоги, що пред'являються до ливарних дефектів поршнів, дотримуються при оптимальній конструкції виливку поршня та технологічного оснащення.

Усе це дозволяє стверджувати про необхідність урахування багатьох факторів в процесі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

1.2 Роль вибору матеріалів в конструкторсько-технологічному проєктуванні виливків

Як відзначається в роботі [39], твердість та межі міцності сплавів для виготовлення деталей ДВЗ виконуються за дотримання хімічного складу сплаву. Для корпусних виливків переважно використовується чавун, що обґрунтовано його хорошими експлуатаційними, технологічними та ливарними властивостями. Так, в роботі [40] об'єктом дослідження для виготовлення корпусних виливків був конструкційний чавун з пластинчастим графітом, в якому вуглецевий еквівалент (Секв) знаходиться в діапазоні (4,214-4,372)%, а вміст вуглецю (C) в діапазоні (3,425-3,563)%. Для даної області факторного простору в цій роботі представлено працездатний аналітичний опис впливу обраних входних змінних на межу міцності чавуну і досліджена отримана поверхня відгуку. Відзначено принципову можливість отримання більш точного опису поверхні відгуку. Отриманий результат може сприяти зниженню матеріаломісткості виливків і зниженню витрат на виплавку чавуну. Як зазначається в цій роботі, дослідження властивостей чавуну

як конструкційного матеріалу, зокрема для корпусних виливків, традиційно проводять у різних напрямках, серед яких можна виділити:

- дослідження мікроструктури чавуну та її вплив на певні експлуатаційні характеристики;
- дослідження впливу модифікаторів на формування мікроструктури чавуну;
- дослідження впливу хімічного складу та процесів затвердіння на мікроструктуру та властивості.

У роботі [41] досліджено вплив на втомну міцність чавуну мікроструктурних неоднорідностей: графіту, ливарних дефектів, структури металевої матриці. Акцент у дослідженні зроблено на виявлення і можливість прогнозування нижньої межі розкиду втомної міцності, що має особливо важливе значення з практичної точки зору. Представлений у цьому дослідженні метод дозволяє прогнозувати оцінку цієї вихідний характеристики виходячи з інформації про мікроструктурні неоднорідності та умови навантаження.

Дослідження, описані в роботі [42], дозволили встановити якісний вплив нового модифікатора, що містить SiC, у поєднанні з феросиліцієм FeSi75, на морфологію графіту, матричну структуру та механічні властивості чавуну. У результатів констатовано факт поліпшення властивостей розплаву чавуну проти початкового з неінокульованим станом. Авторами даного дослідження особливо відзначається можливість формування великої кількості мікрозон з високим вмістом вуглецю та концентрацією кремнію, що сприяє сприятливому перебігу процесу графітизації. Однак така оцінка виконана лише на якісному рівні. Дослідження впливу композиції модифікатора в прес-формі на мікроструктуру та втомну міцність виливків з чавуну EN GJS 700-2 описано в роботі [43], в якій автори роблять висновок про ефективність модифікування впливу на мікроструктуру сплаву. Питання розглядалося переважно у площині матеріалознавчого підходу.

Межа міцності на розрив (UTS) залежно від вмісту вуглецю, хімічного складу та швидкості затвердіння досліджено у роботі [44]. Особливо слід зазначити системність авторського підходу, що розглядає проблематику з різних точок зору

– з міркувань аналітичного опису впливу названих технологічних параметрів на UTS та матеріалознавчого походження. У першому випадку відзначено пріоритетність підходів до досліджень, заснованих на використанні методів регресійного аналізу або модифікованих рівнянь Гріффітса та Холла-Петча. У другому випадку йдеться про перетворення аустеніту в процесі охолодження та формування металевої матриці. Авторами зазначено, зокрема, що домінуючим параметром, який може бути використаний для визначення межі міцності на розрив, є характерна відстань між перлітними зернами. Отримані результати можуть бути поширені на весь спектр вмісту вуглецю від евтектики до доевтектичних композицій, що твердіють при різних швидкостях охолодження, характерних як для тонкостінних, так і складних товстостінних фасонних виливків.

Вплив параметрів легування, спільно з регулюванням співвідношення C/Si в чавуні, на мікроструктуру та механічні властивості чавуну описано в роботі [45], в якій встановлено суттєвість впливу на дані вихідні характеристики чавуну модифікатора у поєднанні з сурмою (Sb). При цьому наголошено, що Sb відіграє важливу роль у контролі морфології графіту. Однак результати, описані в даній роботі, відносяться до високоміцних чавунів і можливість поширення отриманих у ній висновків на чавуни з графітом пластинчатим вимагає додаткових досліджень.

Як розвиток теми впливу хімічного складу на властивості чавуну для корпусних виливків можна розглядати роботи [46, 47]. Так, в роботі [46] на основі математичної моделі, що описує вплив вуглецю (C) та вуглецевого еквівалента (Секв) на межу міцності на розтягування (σ_b) конструкційного чавуну виконано параметричний опис поверхні відгуку $\sigma_b = \sigma_b(C, \text{Секв})$. Показано, що для розглянутої моделі у вигляді рівняння регресії застосування рідж-аналізу дозволяє знайти безліч субоптимальних значень вхідних змінних (C, Секв), що забезпечують отримання марок конструкційного чавуну. Графічне представлення таких множин формує номограму для розрахунку субоптимального хімічного складу конструкційного чавуну. А в роботі [47] на основі даних технологічного аудиту серійних плавок проведені дослідження твердості конструкційного чавуну для виливків автомобілебудування. Визначено вплив вуглецю (C) та вуглецевого

еквіваленту (Секв) на твердість на основі побудови та аналізу рівняння регресії вигляду $HB = HB(C, \text{Секв})$. Досліджено поверхню відгуку та визначено субоптимальні значення змінних, на основі чого побудовані номограми для практичного застосування при керуванні процесом плавки.

В роботі [48] розглядається вплив легуючих елементів, до яких віднесено Si, Mg, Sn, Al, Ti, Zr, Ce, Cu та S, на механічні властивості та мікроструктуру ущільненого графітового чавуну (CGI). Показано, що проміжні властивості між сірим і ковким чавуном, характерні для CGI, забезпечують унікальні властивості для виробництва автомобільних та інших інженерних застосувань. Формування цих властивостей відбувається під дією легуючих елементів на наступній термічній обробці. Але результати мають описовий характер та не містять конкретних залежностей, які можна використати для цілеспрямованого керування властивостями. Очевидно, що таке керування можна вважати необхідним елементом загального управління якістю виливків з чавуну [49].

В роботі [50] представлені результати дослідження впливу модифікування низькохромистого доєвтектичного чавуну (близько 1% хрому) карботермічним ферробором та феросилікобарієм в кількості 0,08% та 0,05% від маси рідкого металу відповідно, а також комплексним феросплавом бор-барій в кількості 0,14% маси рідкого металу. Результати цих досліджень показали, що внаслідок такої обробки відбувається подрібнення і рівномірний розподіл карбідів, а також трансформація морфології карбідів з дендритної в компакту зернисту форму. При цьому перлітні колонії в модифікованому чавуні характеризуються вищим ступенем дисперсності, ніж у контрольному зразку. Зроблено висновок про позитивний вплив таких структурних перетворень на підвищення механічних властивостей. Результати обмежені обраними типами добавок та режимів обробки.

В роботі [51] відмічається, що зміцнення сплаву здійснюється за рахунок твердого розчину, що містить кремній та алюміній. Зокрема визначено, що при заміні Si на Al значно підвищуються стандартні властивості сірих чавунів Fe–C–Si, досягаючи міцності 466 МПа при помірній твердості (250 HB). При цьому межа міцності на розтяг збільшується з вмістом Al, досягаючи максимуму приблизно 3%

Al, після чого він зменшується. Зазначається також, що для отримання перлітної структури були потрібні добавки інших елементів, включаючи 0,35% хрому, 0,55% марганцю та 0,075%. На підтвердження цього можуть бути названі роботи [52, 53], де визначено оптимальні комбінації Al – Si у чавуні, що забезпечують максимум межі міцності на розтягуванні 245–334 МПа [52] та оптимальні комбінації Mn – Al в залежності від вмісту вуглецю, що можуть забезпечити межу міцності на розтягуванні близько 300 МПа [53]. Однак важливо зауважити, що алюмінієві чавуни мають обмежену сферу застосування, зокрема використовуються для виливків деталей двигунів внутрішнього згоряння.

В роботі [54] доведена можливість зниження вмісту Cr, що вводиться в чавун для підвищення його міцності у складі легуючого комплексу Cr:Ni. Показано, що зниження вмісту Cr із верхнього діапазону (0.34–0.48) % до нижнього (0.21–0.33) % не впливає на величину межі міцності, а твердість при цьому так само незмінна: значення HB, що отримуються, для обох діапазонів статистично рівні. Таким чином статистично доведено, що співвідношення Cr:Ni може бути зсунуто у бік менших значень Cr – з Cr:Ni=2.2:1 до Cr:Ni=1.76:1 у існуючій технології виготовлення виливків. Але в роботі не зроблено акцентів щодо впливу інших факторів, який може бути суттєвим зважаючи на склад чавуну, який розглядається в цій роботі.

В роботі [55] при порівнянні впливу двох типів модифікаторів FeSi75 та FeSi65CaBaSr2 на показники мікроструктури чавуну запропоновано процедуру послідовного приведення даних серійних плавок до єдиних умов, які визначаються близькістю хімічного складу розплаву. Це дозволяє проводити порівняння ефективності модифікаторів, що застосовуються в поєднанні з мікролегуванням на мікроструктуру чавуну. За реалізацію цієї процедури визначено, що порівнювані модифікатори мають однаковий вплив на розмір графіту, проте застосування FeSi65CaBaSr2 у поєднанні з легуючим комплексом (0.27%Cr+0.083%Ni+0.048%Ti+0.155%Cu+0.018%V) дозволяє отримувати в мікроструктурі середню кількість перліту 96%. Питання комплексної обробки розплаву модифікування з легуванням ванадієм розглянуті в роботі [56], де досліджується вплив на механічні властивості двох типів модифікаторів – FeSi75

та FeSi40V7. Отримані результати свідчать про те, що введення ванадію в чавун у складі модифікатора FeSi40V7 призводить до зменшення межі міцності на 4 %, але до збільшення твердості на 2 %. Тому використання ванадію в складі FeSi40V7 в межах остаточного вмісту в чавуні на рівні 0.04–0.078 % може бути доцільним лише за умови необхідності підвищення твердості чавуну. Однак результати робіт [55, 56] обмежені діапазонами вмісту елементів та обраними типами модифікаторів.

Проблему неможливості урахування багатьох факторів впливу на формування хімічного складу чавуну при плавці, яка призводить до відхилень хімічного складу від вимог, регламентованих технічними умовами, досліджено в роботі [57]. В роботі запропоновано процедуру технологічного аудиту серійних плавок, особливістю якої є комплексна оцінка фактичних показників плавки, за результатами якого стає можливим розрахунок коригуючих комбінацій феросплавів. Однак запропоновані рішення стосуються лише окремих елементів хімічного складу та не охоплюють формування механічних властивостей. В цьому аспекті важливо зауважити, що деякі властивості чавуну, чи навіть вміст елементів хімічного складу є конкуруючими, що обумовлене процесами, які протікають в розплаві та при кристалізації. Вирішення такої проблеми можливе на основі математичного моделювання по кожному параметру процесу та пошуку оптимальних технологічних режимів на основі мультиальтернативного опису кінцевого стану, який визначається показниками якості сплаву.

У роботі [58] описані результати технологічного аудиту процесу модифікування чавуну для виливків автомобільної та дорожньої техніки двома типами модифікаторів – феросиліцієм та Si-Ba лігатурою. По даних експериментально-промислових досліджень, що мали за мету визначити можливі резерви ресурсозбереження за рахунок обґрунтованого вибору найбільш ефективного модифікатора відповідно до номенклатури виливків в конкретному виробництві, було встановлено умови використання кожного з досліджуваних модифікаторів.

Особливо важливо враховувати вибір матеріалів в тому випадку, коли виливок виготовляється з різних сплавів. Так, відповідні ідеї щодо такого варіанту технологічних рішень в рамках конструкторсько-технологічної підготовки виробництва представлені в роботі [59]. В ній зазначається, що формування міцного металевого зв'язку в біметалевих виливках є ключовою умовою отримання виробів з комплексом властивостей, недосяжним у монометалевих матеріалах. Зв'язок між різними металами формується в результаті послідовного протікання трьох взаємопов'язаних процесів: змочування твердої вставки розплавом, дифузійної взаємодії між компонентами і кристалізації металу, що заливається. На початковому етапі критично важливим є процес змочування, при якому атоми розплаву вступають у контакт із поверхневими атомами твердого металу. Цьому сприяє наявність чистої, вільної від оксидів та адсорбованих забруднень поверхні. Поверхнєве натягування металів відіграє визначальну роль: його регулювання можливе шляхом застосування хімічних методів активації – травлення, флюсування, нанесення галоїдних або металевих плівок. Для покращення змочування в умовах взаємодії чавуну та титанового сплаву може застосовуватися проміжне покриття, що утворює сприятливу γ -область із залізом, або розплави солей, що містять іони, що сприяють обмінним реакціям на межі елементів, таких як мідь або магній, здатних руйнувати оксидні плівки на титані. При аналізі конкретної пари чавун – титановий сплав слід враховувати обмежену взаємну розчинність компонентів та можливе утворення крихких інтерметалевих фаз (наприклад, FeTi). Для мінімізації цих негативних ефектів на поверхню титанової вставки може наноситися проміжне покриття, що уповільнює утворення таких сполук, а також сприяє рівномірному розвитку дифузійного перехідного шару. На другому етапі – дифузійної взаємодії – відбувається взаємне проникнення атомів рідкої та твердої фаз. Цей процес може протікати як механізм розчинення одного металу в іншому, так і через утворення твердих розчинів або інтерметалічних сполук. Характер перехідної зони, її ширина і структура залежать від температур взаємодії, часу контакту, співвідношення мас і кристалічної решітки металів, що з'єднуються. Слід зазначити, що утворення інтерметалевих сполук може бути

корисним, оскільки руйнує оксидні плівки та збільшує реальну площу контакту. Однак надмірний розвиток таких сполук знижує міцність, оскільки більшість з них відрізняються високою крихкістю. Стабілізація структури дифузійного шару досягається термічною обробкою, що робить її необхідною стадією в процесі виробництва якісної біметалічної виливки. Фінальною стадією є кристалізація розплаву. На цьому етапі між твердою вставкою і затверділою фазою формується перехідна зона, що представляє собою область з спотвореними кристалічними ґратами, що забезпечує механічну та термічну стійкість з'єднання. Таким чином, для формування міцного металевого зв'язку в системі чавун – титановий сплав, необхідні: ефективна попередня підготовка поверхні вставки, вибір температурно-часових параметрів заливки, контроль складу розплаву та застосування термообробки. Це забезпечує надійний зв'язок без руйнування під час експлуатації.

При виготовленні корпусних виливків для ДВЗ з алюмінієвих сплавів в кокілях важливо враховувати процеси структуроутворення, які залежать, як показано в роботі [60], від технологічних факторів. При цьому, як зазначається в цій роботі, одним з факторів впливу на формування структури у виливку є вібрація. Так, представлені результати промислових випробувань технології віброобробки з частотою 100 – 200 Гц та модифікування розплаву ультрадисперсним модифікатором при виробництві циліндричних заготовок із сплаву АК7 способом лиття в кокіль. Зокрема, в результаті досліджень механічних властивостей металу дослідних виливків встановлено, що найбільше значення середньої межі міцності спостерігається у металу виливків, що піддавалися віброобробці з частотою 100 Гц, 150 Гц та модифікуванню без вібраційного впливу (175 МПа, 171 МПа та 166 МПа відповідно). Найбільші значення відносного подовження наявні при віброобробці з частотою 100 Гц та модифікуванні без віброобробки (4,55% та 2,12% відповідно). Результати визначення щільності зразків металу дослідних виливків показали значний розбіг значень від 2,729 г/см³ до

2,852 г/см³. Найбільші діапазони коливань значень щільності визначені у зразках металу при віброобробці. Результати досліджень свідчать про наявність ліквідаційних зон у виливках, що отримані за традиційною технологією та з

використанням тільки віброобробки. Встановлено підвищення усередненої щільності металу виливків при віброобробці разом з модифікуванням на 1,2 % відносно металу виливків, отриманих за традиційною технологією. Встановлено також, що підвищення частоти вібрації до 200 Гц в процесі затвердіння вилівка в кокілі призводить до утворення у надливній частині грубих дефектів у вигляді порожнин різного об'єму та розосередженої шпаристості, що розповсюджується також у тіло вилівка. Найменша кількість дефектів та найбільш сприятлива макроструктура виливків спостерігається при використанні комплексної технології, що включає віброобробку з частотою 100 Гц та модифікування, а також при застосуванні тільки модифікування.

Розвиток ідей комплексного впливу на алюмінієві сплави через модифікування та вібрацію задля цілеспрямованого регулювання структури представлений в циклі робіт [61–69].

Таким чином, можна стверджувати про те, що питання комплексного технологічного впливу на сплав є м фактором, який має бути врахованим на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. На користь цього свідчать результати наведеного аналізу літератури [39–69], які дозволили визначити, що незалежно від типу сплаву, який використовується для корпусних виливків – чи це чавун, чи це поєднання різних сплавів в єдиному виробі, чи це алюмінієвий сплав – має бути здійснений вплив на сплав в процесі його формування через модифікування та додаткові технологічні прийоми. Усі ці впливи мають забезпечити таку структуру сплаву, яка забезпечить максимум механічних властивостей вилівку. Тобто формування механічних властивостей та структури треб розглядати разом.

1.3 Технологічні особливості в конструкторсько-технологічному проектуванні виливків

Як свідчить практика провідних світових конструкторських бюро, технологічні аспекти обов'язково враховуються під час розробки та застосування

САПР литих деталей ДВЗ. В роботі [70] розглядали автоматизовану систему проектування як комплекс, у якому інтегруються всі сфери діяльності фірми – від урахування попиту ринку, через проектування і виробництво, до розподілу продукції замовникам.

Для забезпечення заданого рівня якості продукції, при зменшенні витрат на проектування, у роботі [71] розглянуто розв'язання задачі визначення напружено-деформованого стану поршня на основі рішення зворотного завдання, яке дозволяє уточнити граничні умови при проведенні чисельного експерименту. Крім цього, запропоновано дворівневу розрахункову модель поршня з обґрунтуванням прийнятих граничних умов та методику визначення достатнього рівня складності розрахункової моделі для попереднього та остаточного розрахунків. Вивчено вплив теплової складової на загальний напружено-деформований стан поршня та вплив конструктивних параметрів поршня на його ПДВ.

Серед основних напрямів забезпечення якості поршні шляхом проведення комп'ютерного моделювання в ресурсах світової наукової періодики можуть бути виділені роботи [72–77].

Зокрема, робота [72] присвячена моделюванню стаціонарного стану та температурного поля перехідного стану поршня. Авторами роботи [73] проведено теоретичні дослідження термомеханічних умов усередині поршня дизельного двигуна. У роботах [74, 75] представлені результати аналізу розподілу температури стаціонарного стану в поршні високошвидкісного дизельного двигуна. Роботи [76, 77] присвячені розширеному чисельному аналізу частин двигунів, навантажених тепловими та механічними силами.

Таким чином, результати аналізу робіт [70–77] дозволяють зробити висновок про те, що поршні сучасних ДВЗ є складною багатоелементною конструкцією, при створенні яких потрібно враховувати багато факторів. Для обліку цих факторів необхідно враховувати технологічні особливості на етапах проектування та виготовлення поршнів ДВЗ. Для забезпечення заданого рівня якості продукції при зменшенні витрат на проектування при цьому мають застосовувати методи комп'ютерного моделювання.

Процеси проектування, технологічна підготовка і виробництво литих деталей ДВЗ, як відзначається в роботі [78], є невід'ємною частиною системного підходу, закладеного в CALS-технологіях, тобто сукупністю взаємозалежних у часі процесів послідовної зміни стану деталі. У сучасних умовах для продукції головними вимогами є якість, низька собівартість і мінімальний час розробки нових виробів, яке може бути досягнуто із застосуванням моделювання в рамках технології конструкторсько-технологічного проектування.

Так, прикладом реалізації відповідних конструкторсько-технологічних рішень в рамках інтегрованого виробництва корпусних деталей для ДВЗ, може бути створений у КП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування» автомобільний дизель 4ДТНА1 (4ЧНА-1 8,8/8,2), що є унікальним продуктом науково-технічних потужностей Харківського регіону в сучасній Україні [79]. Зважаючи на те, що більшість литих деталей для дизелів транспортного та спеціального призначення, зокрема корпусних деталей, виготовляється саме способом лиття, при проектуванні процесів в основу мають бути закладені технологічні аспекти виготовлення. Останні мають враховувати формування різних ливарних дефектів. Дані дефекти виникають через відсутність методів та інструментарію для впливу на технологічні режими виробництва. У конструкторській документації та в ТУ, як правило, обумовлено розміри та кількість різних ливарних дефектів, які не допускаються до деталей, а отже, такі дефекти впливають на її якість та надійність.

Основною частиною дизельного двигуна є корпусний виливок блок-картер, від якості якого залежатимуть необхідні характеристики закладені на стадії проектування. Вимоги до якості та надійності литих деталей ДВЗ закладаються та виконуються, згідно з технічними умовами, на стадії виробництва при використанні методик визначення технологічних дефектів [80, 81]. Це відзначається також в роботі [82], в якій наведені результати математичного моделювання усадки і формування усадочних дефектів в литих корпусних деталях при використанні різних матеріалів і конструктивних елементів ливарного оснащення.

У дослідженні [83] було розроблено метод сегментації областей дефектів виливку, заснований на мережі двоканального кодування-злиття-декодування (DCE-FD), який точно сегментує потенційні нечіткі області багатомасштабних дефектів. Це важливо для точного визначення локалізації дефектів та литих деталей. В роботі [84] представлені результати розробки інтелектуального контролю виявлення несуцільностей поверхні у виливках. Порівняння моделей на основі декількох алгоритмів показали, що найточнішою для виявлення несуцільностей у виливках є використання методу опорних векторів (SVM). У роботі [85] показано, що комп'ютерне моделювання з урахуванням фізико-хімічних законів – рівняння Арреніуса, закону збереження маси, закону Дарсі – дозволяє прогнозувати газові дефекти у процесах виготовлення виливків із сірого чавуну.

Як випливає з робіт [83–85], основним напрямом досліджень є виявлення місць дислокації внутрішніх дефектів, причинами яких є затвердіння виливків. Ця обставина зазначено також у роботі [86], де для виявлення місць локалізації дефектів використовувалися методи розпізнавання образів. Причому значної ролі грають методи виявлення, хоча слід зазначити, що особливо важливу роль відіграє сама конструкція виливка. Тому вибір того чи іншого методу виявлення дефектів хоч і є важливим, як зазначено в роботах [83–86], врахування особливостей конструкції виливка має бути обов'язковим. Для підтвердження цього можна згадати роботи [87–90]. Так, у роботі [87] наводяться результати досліджень браку виливку пластини, отримані на основі моделювання в Auto-castX1, що дозволило ухвалити рішення, які забезпечили зниження відсотка браку з 8,5 до 3,5%. У роботі [88] досліджено дефекти пористості та вторинна відстань між осями дендритів (SDAS) у литій головці блоку циліндрів. Для цього було виконано комп'ютерне моделювання та експеримент, які показали, що дефекти пористості переважно існують у товстих стінках, а також у з'єднаннях товстих та тонких стінок. На основі отриманих результатів було зроблено припущення, що збільшення швидкості охолодження може частково зменшити дефекти пористості та висновок про те, що зменшення швидкості охолодження може зменшити SDAS у виливках, що призводить до щільної мікроструктури. Тому запропоновано для зниження

дефектів пористості і для отримання однорідних мікроструктур віддавати перевагу конструкції виливків регулярних форм із тонким стінкам.

У роботі [89] встановлено, що руйнування головки блоку циліндрів спричиняють множинні тріщини, що виникають через наявність пористості виливку, незалежно від режиму навантаження. Крім того, утворення дефектів пористості лиття в головці блоку циліндрів спричинене поганими місцевими умовами охолодження в процесі лиття. Це підтверджено результатами комп'ютерної томографії, металургійними спостереженнями та моделюванням за допомогою методу скінчених елементів. Роль затвердіння розплаву в порожнині форми формування об'ємної усадки і пористості на якість лиття вивчена у роботі [90]. Для дослідження було використано виливок колеса. Результати комп'ютерного моделювання за розташуванням дефектів усадки, тріщин і пористості в тілі виливку та їх порівняння з результатами експериментальних випробувань показали хороші результати. Це дозволило, як зазначили автори цієї роботи, оптимізувати конструкцію живильників.

Отже, комп'ютерне моделювання формування виливка є інструментом, що дозволяє виявляти місця дислокації внутрішніх дефектів у виливках. Це, поряд з побудовою математичних моделей «склад – властивості» та виявленням впливу геометричних характеристик ливарного оснащення на формування дефектів [91] може стати вирішальним у питаннях управління якістю виливків. Важливо відзначити, що враховувати необхідно також властивості сплаву, тому що, наприклад, технологія отримання якісних сталевих виливків складніше, ніж виливок із чавуну через значно гірші ливарні властивості сталі. Тому комп'ютерне моделювання в технологіях сталевих виливків потребує особливої уваги.

В процесі комп'ютерно-інтегрованого проєктування слід також враховувати не лише тип сплаву, але й якість формувальної та стрижньової суміші, від властивостей яких залежить розмірна та геометрична точність виливків. В цьому аспекті можна зазначити роботи [92–96].

Так, у роботі [92] з використанням гребневого аналізу показаний спосіб отримання оптимального рішення щодо зниження кількості рідкого скла в суміші

при збереженні прийнятної міцності по сирому. Результати наведені на прикладі використання як затверджувача пропіленкарбонату. Однак як вихідний змінної використовувалася тільки міцність формувальної суміші на стиск.

У роботі [93] вирішено оптимізаційне завдання щодо визначення складу холоднотвердіючої суміші (ХТС) на основі рідкого скла та пропіленкарбонату як сполучного та затверджувача відповідно, з вибором критерієм оптимізації максимуму живучості суміші та мінімуму її обсіпаності. Зазначено, що отримані результати можуть знайти застосування в автоматизованому виробництві формувальної суміші підвищення якості литих деталей ДВЗ.

Описана в роботі [94] математична модель дозволила встановити, що пріоритетним фактором впливу на міцність зразка, підданого тепловому сушінню з рідким склом, що омагнічує, є напруженість магнітного поля. В роботі наведено оптимальні технологічні параметри процесу, проте дана модель не може бути застосована щодо оптимізації компонентів ХТС з пропіленкарбонатом.

У роботі [95] отримано рівняння регресії, що відображає функціональний зв'язок між такими властивостями суміші з рідким склом та затверджувачем – живучістю, міцністю на стиск та осипанням. Автори даної роботи показали, що міцність на стиск є більш істотним фактором впливу на живучість порівняно з осипанням, причому практично в 3 рази. Було також зроблено висновок, що обидва ці фактори позитивно впливають на живучість суміші – зі збільшенням міцності на стиск і осипання живучість збільшується. Однак питання, пов'язані з впливом відхилень від заданих значень змісту сполучного та затверджувача, не досліджувалися. Частково відповідь на це питання в даній роботі може бути знайдено шляхом аналізу гребневих ліній, проте такі акценти в [95] не були зроблені.

Комплекс математичних моделей, що описують вплив вмісту в ХТС рідкого скла та пропіленкарбонату наведено в роботі [96], в якій також вирішена задача оптимального поєднання властивостей синтезу складу ХТС. Наведені раціональні області складів дозволяють деяким чином зняти обмеження, вказане в роботі [95], проте строгіший аналіз стаціонарних областей для кожного з досліджуваних

властивостей дозволив би отримати більш точні результати. Зокрема, представляло б інтерес дослідження поведінки властивостей при відхиленнях від оптимальних значень змісту сполучного та затверджувача. Отримані результати могли б знайти практичне застосування в автоматизованих процесах сумішоприготування та створення більш досконалих регуляторів дозування для сумішопідготовчих систем. Останнє є важливим фактором в питання комп'ютерно-інтегрованого проєктування технології виливків. Важливо зазначити, що Сучасні підходи до створення машин вимагають максимально можливого узгодження щодо конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Так, очевидно, що як би глибоко не були опрацьовані конструкції машин або виконано комп'ютерне чи натурне моделювання ефективності конструкцій, не врахування технологічних факторів призводить до того, що реальні показники нижчі від проєктних. Тому актуальним є використання спеціальних методів дослідження, що дозволяють узгоджувати конструкторську та технологічну частини при комп'ютерно-інтегрованій підготовці виробництва деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Серед таких методів – методи розпізнавання образів [97–99]. З їх допомогою можна класифікувати литі поршні за тими чи іншими геометричними критеріями. Даний метод також дозволяє ідентифікувати режими виготовлення сплавів для корпусних виливків. Це дуже важливо з точки зору формування механічних властивостей виливків та має враховуватись на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Зокрема, керування плавкою передбачає таке ведення процесу, при якому хімічний склад сплаву повинен відповідати заданому, при цьому завдання керування є непростим через багато фізико-хімічних перетворень у розплаві, що визначаються складом шихти та умовами плавки, в тому числі температурою. Результати досліджень процесів перетворення вуглецю в процесах індукційної плавки, отримані термогравіметричним аналізом, дозволяють отримувати кінетичні рівняння, що описують гетерогенні реакції окислення вуглецю серед діоксиду вуглецю, які можна використовувати для управління плавкою [100, 101]. Проте дуже важливо враховувати, що процес плавки передбачає іноді видачу готового розплаву з печі, тобто параметри

кінетичних рівнянь вимагають уточнення. Це з тим, що іноді змінюється маса розплаву та її хімічний склад, оскільки розплав через деякі проміжки часу видається з печі для заливки форм. У такому разі необхідно використовувати адаптивний підхід до кінетичних рівнянь [102]. Такий підхід дозволяє відстежувати параметри кінетичних рівнянь для обґрунтованого вибору режимів плавки, насамперед температурних. Це пов'язано з тим, що температура впливає на константи швидкості процесів. Відхилення в температурних режимах може призвести до отримання сплаву, що не відповідає вимогам щодо хімічного складу. Складність практичного застосування кінетичних рівнянь полягає в тому, що необхідний безперервний контроль температури та складу сплаву в процесі плавки, тобто використання технічних засобів контролю, причому з одержанням результатів зі зсувом у часі.

Виробники сучасних індукційних печей, продукція яких представлена, наприклад, в [103–105], намагаються вирішувати проблему контролю температурного режиму засобами автоматизації. Існує також можливість пошуку оптимального управління плавкою за критерієм швидкодії у забезпеченні заданого температурного режиму, використовуючи принцип максимуму Понтрягіна [106]. Його реалізація, звісно, потребує безперервного контролю параметрів плавки. Однак слід враховувати надійність таких елементів систем керування плавкою, що працюють в умовах агресивних середовищ. Тому альтернативні рішення щодо контролю температурного режиму мають припускати можливість непрямої оцінки.

Такий підхід використаний у роботах [107, 108], де як діагностичні параметри для непрямої оцінки температурного режиму запропоновано використовувати склад шлаку. Таку пропозицію можна вважати обґрунтованою, тому що шлак формується внаслідок протікання фізико-хімічних процесів, які залежать від температури. Однак недоліками даних досліджень є варіант вибору діагностичних параметрів – SiO_2 і $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ або SiO_2 і коефіцієнт розподілу. Тому потрібний подальший пошук найбільш значущих діагностичних параметрів. У разі виявлення таких параметрів можлива не тільки точніша діагностика температурного режиму та виявлення відхилень від заданого режиму, але й виявлення етапу технологічного

процесу, відповідального за формування функціональних відмов [109–112]. Останні фіксуються за фактом випадання конкретних критеріїв якості чи режимів плавки за встановлені поля допуску. Це формує перспективний напрямок дослідження, пов'язаний з побудовою діагностичний принцип оцінювання температурного режиму плавки на основі аналізу шлаку, вибравши в якості діагностичних параметрів найбільш значущі компоненти шлаку.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Сучасні підходи до комп'ютерно-інтегрованого проектування конструкції виливків базуються на методології систематичного визначення складності продукту та процесу. Це обґрунтовується тим, що вища складність форми при виготовленні литих деталей призводить до нижчої технологічності, що означає неоптимальну якість, вищу вартість та зниження продуктивності. Тому кількісна оцінка та порівняння складності форми альтернативних конструкцій виливків є важливою з точки зору технологічності при проектуванні виливків та ливарних форм.

2. Конструкція виробу є ключовим фактором формування конкурентоспроможного продукту ливарного виробництва, тому нераціональне конструювання означає програш на ринку і відставання від конкурентів.

3. Для конструкторсько-технологічного проектування сучасних литих деталей ДВЗ системи інженерного моделювання технологічних процесів виробництва та аналізу теплового та напружено-деформованого стану литих деталей ДВЗ є найбільш ефективними.

4. Дослідження властивостей чавуну для корпусних виливків проводять у різних напрямках, серед яких можна виділити: дослідження мікроструктури чавуну та її впливу на певні експлуатаційні характеристики, визначення впливу модифікаторів на формування мікроструктури чавуну, визначення впливу хімічного складу та процесів затвердіння на мікроструктуру та властивості. Особливо важливим є можливість формування великої кількості мікрозон з

високим вмістом вуглецю та концентрацією кремнію, що сприяє сприятливому перебігу процесу графітизації та блокує розвиток реакції отримання цементиту в мікроструктурі.

5. Обґрунтований вибір типу модифікатора та технології модифікування є ефективними факторами впливу на мікроструктуру в чавуні саме корпусних виливків, які характеризуються переважно крупними габаритами та тонкими стінками виливків.

6. Особливо важливо враховувати вибір матеріалів в тому випадку, коли виливок виготовляється з різних сплавів. В такому випадку формування міцного металевого зв'язку в біметалевих виливках є ключовою умовою отримання виробів з комплексом властивостей, недосяжним у монометалевих матеріалах. При цьому особливо важливим є врахування обмеженої взаємної розчинності компонентів та можливого утворення крихких інтерметалевих фаз. При виготовленні корпусних виливків для ДВЗ з алюмінієвих сплавів в кокілях важливо враховувати процеси структуроутворення, які залежать від технологічних факторів.

7. Питання комплексного технологічного впливу на сплав є тим фактором, який має бути врахованим на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, при цьому перспективними є автоматизовані системи проектування. Зокрема процеси проектування, технологічна підготовка і виробництво литих корпусних деталей ДВЗ є невід'ємною частиною системного підходу, закладеного в CALS-технологіях.

8. У сучасних умовах для продукції ливарного виробництва головними вимогами є якість, низька собівартість і мінімальний час розробки нових виробів, яке може бути досягнуто із застосуванням моделювання в рамках технології конструкторсько-технологічного проектування.

9. Корпусні виливки є конструкціями, при створенні яких потрібно враховувати багато факторів, зокрема технологічних особливостей на етапах проектування та виготовлення. Для забезпечення заданого рівня якості продукції при зменшенні витрат на проектування при цьому мають застосовуватись методи комп'ютерного моделювання.

РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЯ РАЦІОНАЛЬНОГО КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ВИЛИВКІВ З УРАХУВАННЯМ ВАРІАТИВНОСТІ ЇХ НОМЕНКЛАТУРИ

2.1 Схеми проєктування виливків на основі зворотних зв'язків етапів проєктування

Методологія комп'ютерно-інтегрованого ресурсного проєктування передбачає реалізацію процедур, що забезпечують якість литих деталей складної геометричної конфігурації за двома ключовими критеріями – функціональної та параметричної надійності. Відповідно до цього, як зазначено в роботах [19, 20, 23, 25, 26], може вирішуватися комплекс задач, спрямованих на досягнення наступних результатів:

- визначення браку виливків;
- визначення «вузьких» місць у конструкції деталі з технологічної точки зору;
- визначення напруженого стану виливків;
- визначення кристалізаційних процесів;
- визначення факторів формування залишкового напруженого стану на технологічному етапі.

Названі задачі мають бути упорядковані та структуровані задля того, щоб встановити логіку рішення та розробити на її основі систему заходів задля практичної реалізації, що може бути впроваджена в промисловому виробництві. Для цього потрібно ранжувати задачі у відповідності до послідовності проєктування, яке може виглядати як взаємозв'язок окремих етапів та елементів проєктування, побудованих на основі послідовно-паралельних операцій.

Побудова відповідної схеми проєктування має передбачати не лише наявність прямих зв'язків між окремими етапами проєктування, але й зворотних зв'язків між ними. Це обґрунтовується тим, що конструкторсько-технологічна підготовка ливарного виробництва передбачає комплекс заходів, спрямованих не лише на конструювання виливків чи оснастки, але й на розробку та відпрацювання

технології, результати якої мають бути враховані для доопрацювання конструкцій, або виливку, або технологічної оснастки.

Таке представлення процесу проєктування з урахуванням систематизації складових задач, представлених вище, дозволяє запропонувати схему проєктування на основі зворотних зв'язків, представлену на рисунку 2.1.

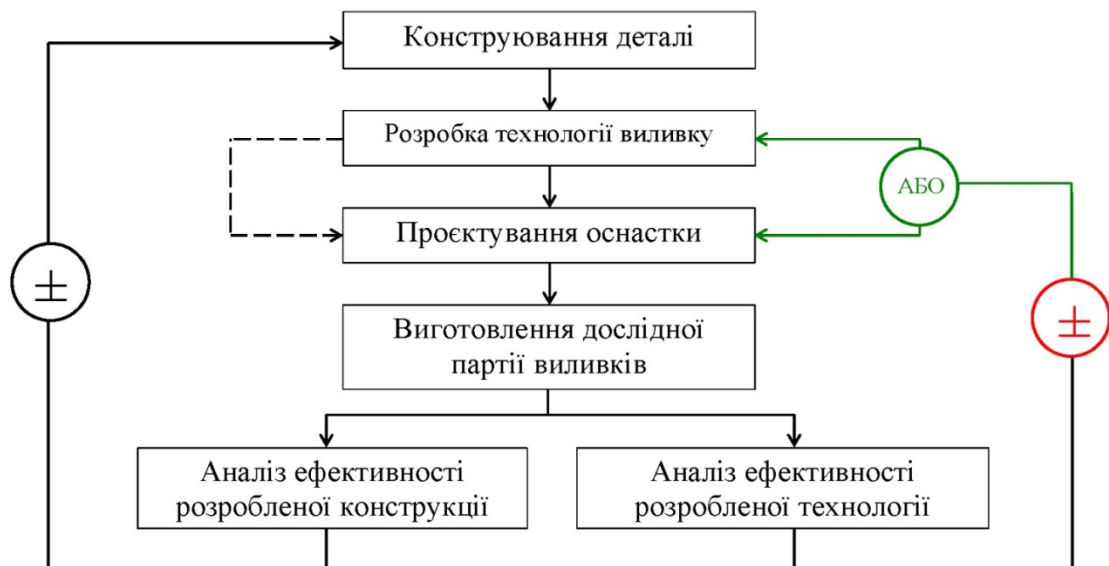


Рисунок 2.1 - Схема конструкторсько-технологічного проєктування виливків на основі зворотних зв'язків.

Така схема може бути взята за основу концепції раціонального конструкторсько-технологічного проєктування виливків. На схемі прийняті наступні позначення:

± – зворотній зв'язок по конструкторському етапу проєктування,

± – зворотній зв'язок по технологічному етапу проєктування,

АБО – логічна операція вибору заходів коригування в конструкторсько-технологічній підготовці виробництва на етапі відпрацювання технології форми або ливарної оснастки.

Дана схема представлена в загальному вигляді та не враховує особливості конструкцій деталей залежно від їх функціонального призначення. Наприклад, для автомобілебудування номенклатура виливків для виготовлення деталей умовно можна поділити на наступні основні варіанти:

- корпусні,
- шатунно-поршневої групи,
- шківни.

Варто зауважити, що для кожного з цих варіантів існують окремі вимоги щодо ключових показників, по яких оцінюється ефективність проєктування. Остання визначається як можливість забезпечення заданих показників функціонування після виготовлення та впровадження в контексті забезпечення параметричної та функціональної надійності.

Номенклатура виливків за першим варіантом є достатньо різноманітною, бо кількість варіантів конструкцій двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) може вважатися не обмеженою. Наприклад, це можуть бути рядні ДВЗ, V-подібні ДВЗ, VR-подібні ДВЗ, опозитні ДВЗ, тобто відмінності стосуються конструкції, а саме варіантів розміщення циліндрів. Останні відрізняються розташуванням циліндрів по відношенню до колінчастого валу та видом розташування – лінійним або під певним кутом по відношенню один до одного. Окрім цього ДВЗ можуть бути бензинові або дизельні. Окрім цього, ДВЗ відрізняються за робочим циклом, відповідно можуть бути або двотактними, або чотиритактними та мати різні способи сумішоутворення. Останнє передбачає можливість зовнішнього та внутрішнього сумішоутворення.

Але, незважаючи на такі відмінності, що визначають практичне використання на різних типах автомобільної, мототехніки чи енергетичних установок, та функціональне призначення і властивості, з точки зору самого корпусу, що виготовляється литвом, принципової різниці між усіма цими конструкціями корпусів немає. Мається на увазі, що це схожі за принципом корпусні деталі, для яких мають бути виготовлені виливки. Через цю схожість виливки для таких деталей мають відповідати певному набору ключових показників ефективності. Це означає, що може бути сформований типизований варіант корпусних виливків для такого варіанту, який визначається конкретними вимогами щодо ефективності конструкторсько-технологічного проєктування. Вони базуються на тому, що корпусні виливки мають відповідати критеріям перш за все функціональної

надійності, під якою мається на увазі можливість роботи протягом заданого часу без поломок. Але при цьому задля забезпечення максимально можливої потужності та за обмеженнями по габаритах транспортного засобу чи енергетичної установки, в конструкції якої працює ДВЗ, необхідно мінімізувати масо-габаритні характеристики корпусів.

Таким чином, є підстави стверджувати, що до першого варіанту номенклатури виливків є набір ключових вимог, представлених на рисунку 2.2.

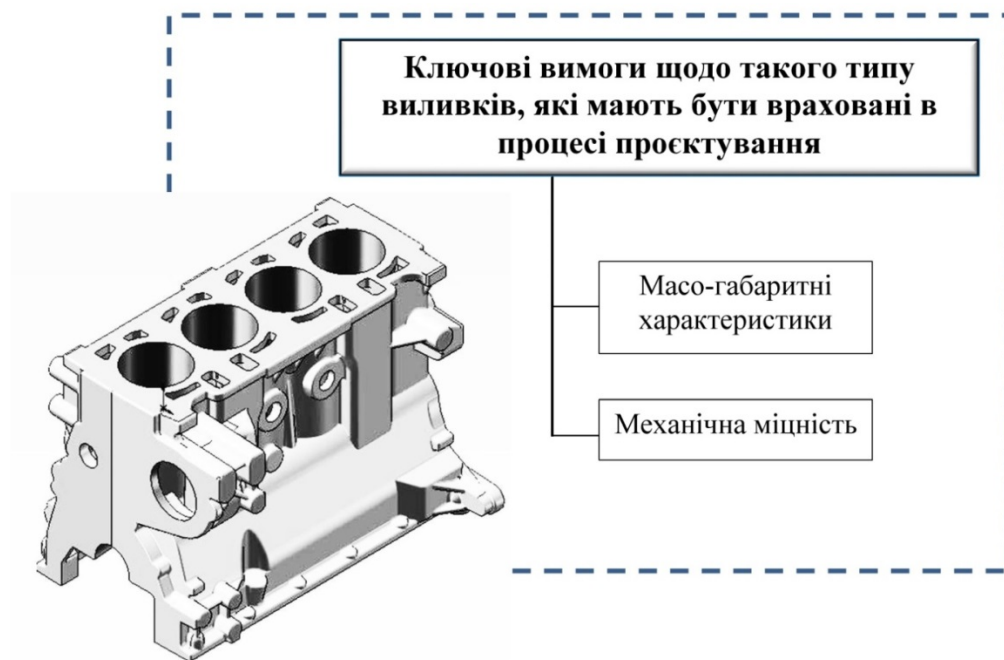


Рисунок 2.2 - Представник корпусних виливків та ключові показники, по яких оцінюється ефективність проєктування

Масо-габаритні характеристики окрім власно конструкції деталі залежать від елементів технології форми, зокрема припусків на механічну обробку.

Механічні властивості залежать від хімічного складу сплаву та мікроструктури, зокрема від складу металевої матриці та графіту, з урахуванням різної товщини стінок виливку корпусу.

Ці залежності мають бути враховані на етапі розробки технології виливку, як попереднього етапу проєктування по відношенню до розробки оснастки.

Номенклатура виливків за другим варіантом також може бути уніфікована, бо, незважаючи на різницю в двигунах, шатунно-поршнева група виконує одну й ту саму задачу. Ефективність вирішення цієї задачі залежить від точності зборки

деталей групи, яка, своєю чергою, залежить від геометричної точності деталей групи, що закладається саме на етапі литва.

Шатун, який поєднує коленвал та поршень, проєктується на основі загальних принципів проєктування кривошипно-ползунних механізмів, основою для якого є відношення довжини кривошипа та шатуна, мас шатуна та поршня, центр ваги деталей цієї групи. З точки зору ливарної технології виливок шатуна не представляє значної складності, бо є деталлю з віссю симетрії, однак виготовлення отворів потребує особливої уваги. Це пов'язано з тим, що не врахування на етапі проєктування особливостей установки та видалення стрижнів може призвести до зміщення центру осі отвору під палець у виливку шатуна та центру осі пальця. Окрім цього, аналогічна проблема може виникнути по відношенню до внутрішньої порожнини поршня. Нерівномірність товщини стінки, що при цьому утворюється, може негативно вплинути як на наступну операцію, наприклад механічну обробку чи збірку, так і на подальшу експлуатацію. Якщо поршень та шатун виготовляються в кокілі, то на етапі проєктування кокіля це треба враховувати. До того ж, слід враховувати можливий знос металевих елементів кокіля, що виконують роль стрижнів, тобто утворюють отвори у виливках. На рисунку 2.3 проілюстровано на прикладі спрощеної схеми формування отворів у виливку поршня елементами кокілю.

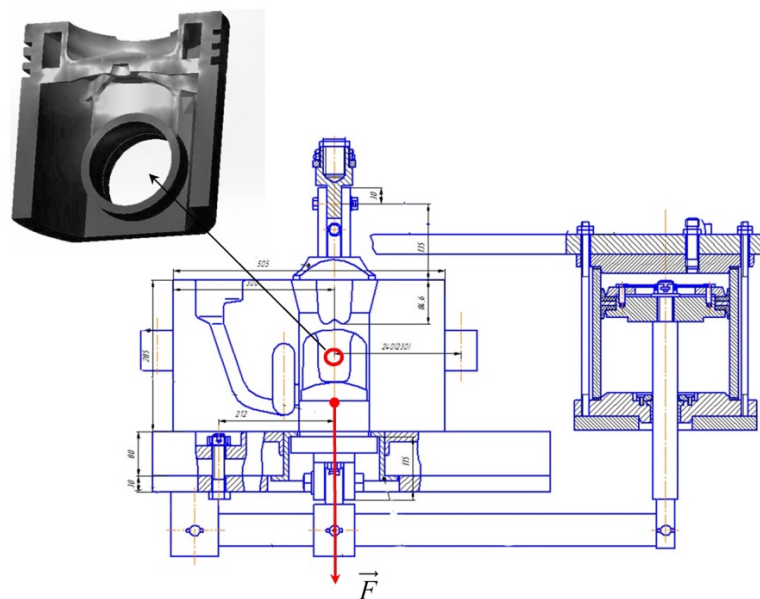


Рисунок 2.3 - Схемне представлення формування отворів у поршні

Варто зауважити, що виготовлення отвору під палець в шатуні може не передбачати технологічну операцію ливарного виробництва, тобто стрижень для цього не використовується. Отвір формується механічною обробкою, але відповідне технічне рішення залежить від масо-габаритних характеристик шатунно-поршневої групи та, відповідно, розміру шатуна.

Але те, що стосується виготовлення внутрішньої порожнини в самому поршні, потребує відповідного врахування на етапі проєктування через названі вище причини. При цьому, власне поршень може бути віднесений до першого варіанту номенклатури виливків з додаванням до ключових вимог, наведених на рис. 2.2, геометричної точності порожнини.

Стосовно конструкторсько-технологічної підготовки виробництва чавунних поршнів можуть бути використані рішення, що базуються на формуванні секторної єдиної модульної системи організації [113]. В такому випадку система організації модульного проєктування чавунних поршнів має вигляд, представлений на рис. 2.4.

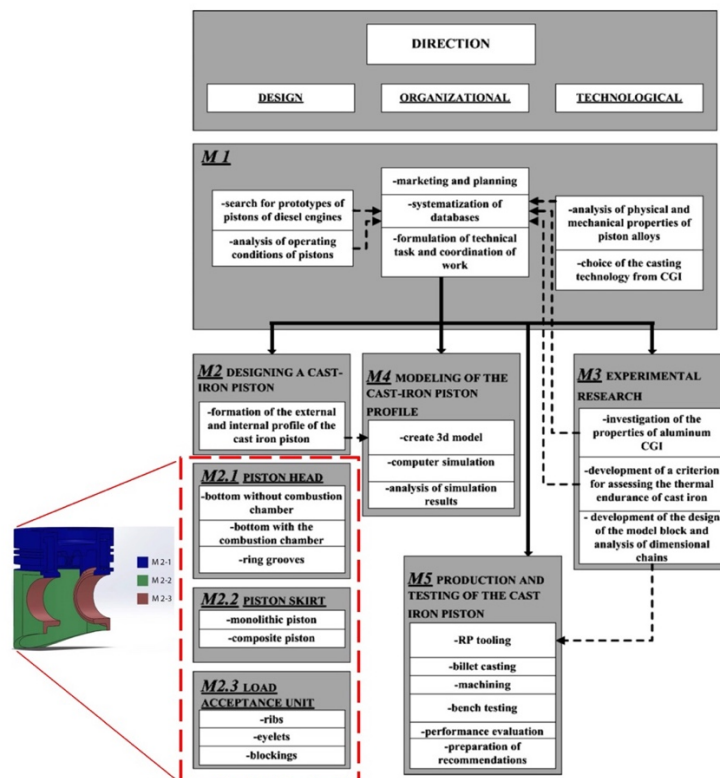


Рисунок 2.4 - Система організації модульного проєктування чавунних поршнів ДВЗ. Зроблено з використанням [113]

Принцип модульного підходу полягає в наступному. Створення різних варіантів конструкцій поршнів, наприклад, монолітного або складового, здійснюється шляхом поділу модуля М-2 на три підмодулі конструкторського напрямку проектування.

Серед складових модулів:

- підмодуль М 2-1 головки поршня, включаючи днище з камерою згоряння, кільцевий пояс і ребра жорсткості – для універсальних варіантів поршнів);
- підмодуль М 2-2 – юбка поршня з бобишками для поршневого пальця – для монолітних поршнів;
- Підмодуль М 2-3 – вузла прийому навантаження з вушами для передачі навантаження на поршневий палець і спідницю (для складових поршнів).

Система працює таким чином, щоб забезпечити можливість вдосконалення існуючої або розробки нової конструкції поршня. При цьому реалізація технічного завдання на проектування починається з виконання проектування в рамках компетенції модуля М-2 конструкторського напрямку, а також модулів М-3 технологічного та М-4 організаційного напрямків, використовуючи базу даних модуля М-1 організаційного спрямування.

На етапі конструкторсько-технологічного проектування виконуються найбільш трудомісткі роботи з формування фізичної та математичної моделей поршня, розробляються тривимірні моделі проєктованих поршнів із застосуванням модульного проектування.

Під час розробки профілю чавунного поршня необхідно враховувати, що окрім вирішення завдань виконання функціональних вимог, що пред'являються до поршня, профіль поршня повинен мати можливість його отримання технологічними прийомами ливарного виробництва. У зв'язку з цим мають розглядатися компромісні рішення між конструкторськими та технологічними модулями, які можуть накладати деякі обмеження як на конструкцію поршня, так і на технологію його виробництва.

Відповідно до названої вище проблеми, пов'язаної з необхідністю забезпечення заданої геометрії по конструктивних елементах поршня та шатуна,

яка може виникнути на етапі проєктування чи в процесі виготовлення шатунів та поршнів, до другого варіанту номенклатури виливків є набір ключових вимог, представлених на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 - Представник виливків «шатун» та ключові показники, по яких оцінюється ефективність проєктування

Незважаючи на те, що шатун не є корпусною деталлю, проєктування технології його виготовлення має передбачати необхідність урахування складності конструкції поршня, як корпусної деталі, зокрема його внутрішньої частини.

Представники третього варіанту номенклатури – шків – можуть відрізнятися по конструктивних елементах. Серед таких елементів можуть бути:

- зовнішній обід, залежно від того, для якої передачі призначений шків – плоскопасової чи клинопасової передачі,
- форма внутрішньої частини шків – внутрішні ребра жорсткості чи отвори в тілі,

– форма ступиці – торцові частини ступиці урівень з торцевими частинами шківу чи ні, симетрично чи ні торці ступиці розташовані по відношенню до центральної горизонтальної осі шківа.

Але, незважаючи на такі відмінності, шків – це деталь з віссю симетрії, тому з точки зору ливарної технології шків є універсальною деталлю для виготовлення виливку, тобто описується таким самим набором вимог. З цих міркувань на рис. 2.6 представлено узагальнений вигляд шківу, як представника третього варіанту номенклатури виливків.



Рисунок 2.6 - Представник виливків типу «шків» та ключові показники, по яких оцінюється ефективність проєктування

Незважаючи на те, що виливки другого та третього варіантів номенклатури безпосередньо не відносяться до корпусних, технології їх виготовлення можуть бути складними, з урахуванням можливих різновидів конструкції та сплавів, які використовуються. Окрім того, деталі, наприклад, типу «шків» можуть включати різні складові елементи конструкції, які передбачають установку в них інших деталей, перетворюючи їх в корпусні деталі. Прикладом можуть бути корпусні

деталі енергетичного машинобудування [114], які за ознаками конструкції (циліндрична форма як мінімум з двома осями симетрії) схожі до шківів (рис. 2.7).

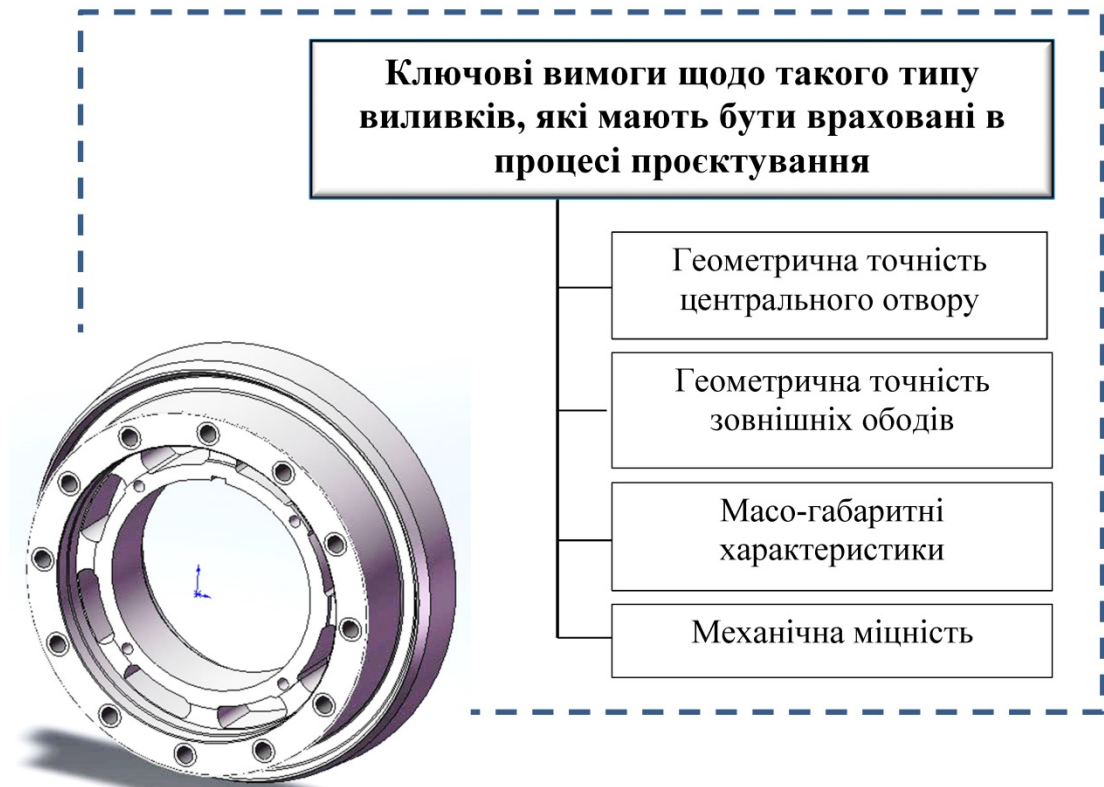


Рисунок 2.7 - Представник корпусних виливків, що має схожі ознаки з конструкцією типу «шків», та ключові показники, по яких оцінюється ефективність проєктування

Із сказаного випливає, що з точки зору проєктування доцільно розглядати виливки машинобудування на основі саме ключових вимог до виливків, які можуть перетинатися для різних варіантів номенклатури.

Перший етап проєктування, що передуює розробці технології виливку та подальших етапів (рис. 2.1), базується на формуванні загальної конструкції деталі, відповідно до її функціонального призначення та обмежень, що накладаються на габарити. Основним в такому етапі, після визначення заданих габаритів та вибору матеріалу деталі, є розрахунки міцності, для чого розглядається напружено-деформований стан деталі, зокрема з урахуванням технологічних факторів, серед яких пріоритетним є термонапружений стан. Аналіз такого стану має базуватися на

скінчено-елементному моделюванні. Такий підхід дозволяє на практиці перейти до визначення напружено-деформованого стану, статичного аналізу міцності, міцнісного динамічного аналізу, теплового аналізу, термо-міцнісного аналізу, нестационарного температурного аналізу. Кожне з цих завдань має свої особливості рішення, завдання початкових та граничних умов, які в тій чи іншій формі враховані у математичних моделях виливків. Процедура загалом реалізується в три кроки, наведені нижче.

Крок 1.

Проведення аналізу на статичну міцність, що базується на визначенні матриці жорсткості деталі та вектору переміщень.

Крок 2.

Проведення аналізу на динамічну міцність, що базується на визначенні матриці мас, матриці опорів, матриці жорсткостей, вектору вузлових прискорень, вектору вузлових швидкостей, вектору вузлових переміщень, вектору навантаження. Усі ці змінні розраховуються в функції часу.

Крок 3.

Проведення нестационарного температурного аналізу, що базується на визначенні матриці питомих теплоємностей, похідної за часом температури в кожному вузлі, матриці ефективної теплопровідності, вектору вузлових температур, вектору ефективного теплового потоку у вузлі. При цьому мають враховуватися три типи граничних умов:

- температури, що розглядаються, діють на певній поверхні S_1 ,
- задані теплові потоки діють на певній поверхні S_2 ,
- задані поверхні S_3 з конвективним теплообміном.

Розрахунки виконуються відповідно до названих кроків, застосовуючи обраний принцип нанесення скінчено-елементної сітки. Для прикладу корпусної деталі блок-картеру ДВЗ, вузли можуть виглядати так, як показано на рис. 2.8, де сірим кольором показано умови закріплення у вузлах двох ступенів свободи. На рис. 2.9 представлено електронну та твердотільну модель блок-картера.

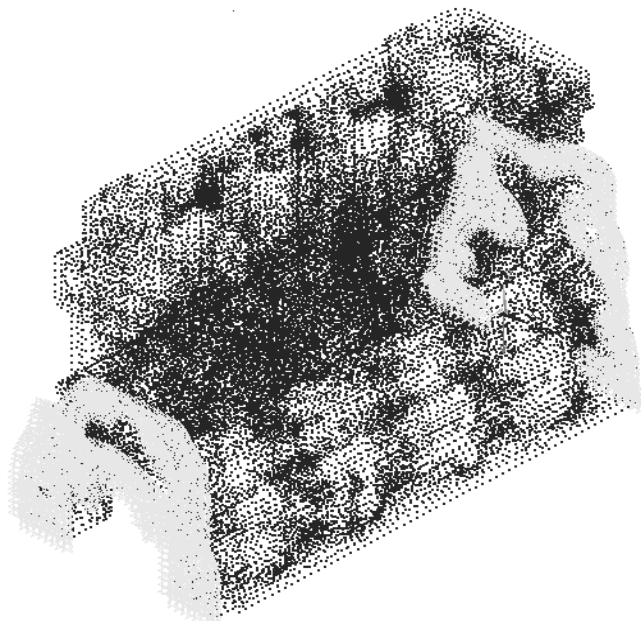
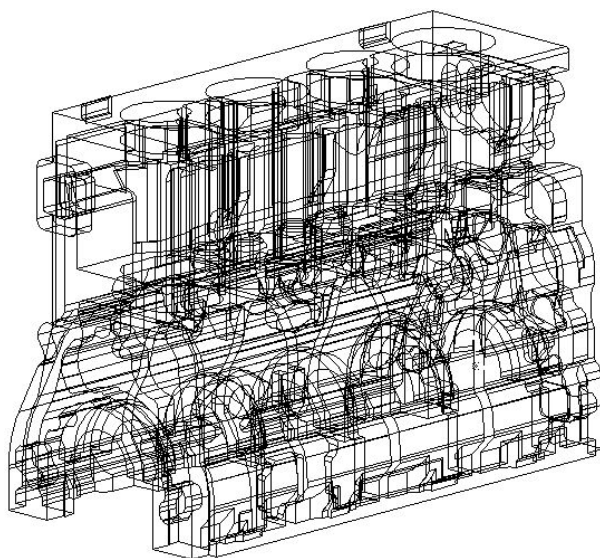
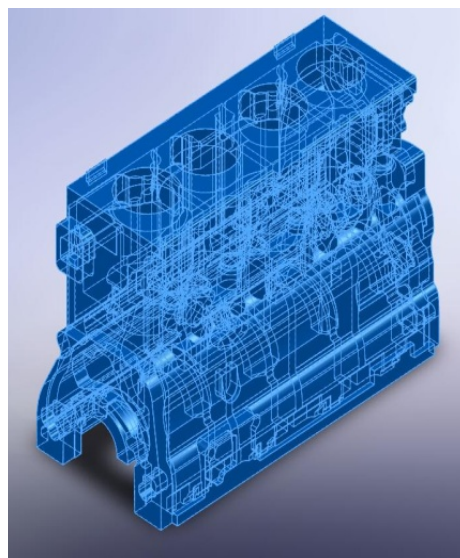


Рисунок 2.8 - Вузли скінчено-елементної моделі блок-картеру [115]



а



б

Рисунок 2.9 - Електронна та твердотільна модель блок-картеру [115]:

а – електронна модель, б – твердотільна модель

Прийнята на основі проведеного моделювання конструкція є вихідною для розробки технології виливку.

2.2 Підхід до проєктування технології виливку на основі теорії статистичних ігор

Розробка технології виливку є багатоваріантною задачею, бо на кожен виливок може буде запропоновано n технологічних рішень. Кожне з цих рішень може бути реалізовано з використанням m варіантів обладнання та k варіантів технологічних режимів для кожної технологічної операції виготовлення виливків. Відповідно, кожен з варіантів може буде оцінено в одиницях витрат на реалізацію. Таким чином, вибір того чи іншого варіанту технології має ґрунтуватися на оцінці витрат, пов'язаних з її реалізацією. При такому розгляді етапу проєктування технології цей процес формально може бути представлений у вигляді певної технологічної гри, базуючись на теорії статистичних ігор. Тому можна ввести такі визначення.

Технологічна гра (ТГ) – формалізована модель вибору обладнання та технологічних режимів виготовлення ливарної форми, що представляє собою сукупність правил, які описують принципи вибору технологічних рішень для виготовлення виливку.

Гравці – технолог-конструктор (Т-К) та технолог-економіст (Т-Е). Це може бути одна й та сама особа, але перед нею стоїть задача урахування двох критеріїв з наявністю можливих конфліктів між цими критеріями. Перший критерій – це необхідність знаходження можливих варіантів технологічних рішень на етапі проєктування технології, на основі відомих методів проєктування технології виливку. Другий критерій – це необхідність вибору такого варіанту обладнання для кожної технологічної операції при виготовленні ливарної форми та відповідних технологічних режимів, які забезпечують мінімізацію витрат на виготовлення виливку.

Партія гри – це кожен конкретний процес проєктування технології.

Хід – це конкретна дія по вибору певного технологічного рішення або обладнання.

Особистий хід – це вибір Т-К або Т-Е одного з множини можливих варіантів технології чи обладнання.

Випадковий хід – це вибір одного з множини варіантів технології чи обладнання, але вибір здійснюється Т-К або Т-Е, з використанням певного механізму випадкового вибору, внаслідок чого отримується результат ходу.

Стратегія гравця – це однозначний опис технології виливка за кожного можливого варіанту вибору обладнання та технологічних режимів виготовлення елементів ливарної форми.

За таких визначень ТГ G визначається трійкою

$$G=(X, Y, L), \quad (2.1)$$

де X – множини технологічних рішень,

Y – множина обладнання та технологічних режимів виготовлення елементів ливарної форми,

L – функція втрат, що є обмеженою числовою функцією.

ТГ задається матрицею втрат:

$$Q = [q_{ij}] = \begin{bmatrix} q_{11} & \dots & q_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

де $q_{ij}=L(x_i, y_j)$ – матриця ТГ, що описує результат гри.

Основне завдання полягає у знаходженні оптимальної стратегії, яка передбачає такі технологічні рішення щодо виливку та ливарної форми, які забезпечуються за мінімальних витрат на реалізацію технологічного процесу. Тобто, на відміну від класичної гри, де один з гравців намагається збільшити свій виграш, а другий зменшити свій програш, при виборі оптимальної стратегії щодо рішень відносно технології виливку та ливарної форми, обидві гравці переслідують одну й ту саму ціль – мінімізувати втрати від неправильно чи не оптимально прийнятих рішень щодо остаточної технології виливку. Але, якщо говорити про варіанти вибору Т-Е з множини Y , то важливо зазначити, що ці варіанти

характеризуються певною невизначеністю. Наприклад, при виготовленні якогось елемента ливарної форми та вибору відповідного обладнання з наявного в цеху, немає впевненості в тому, що сировина відповідає вимогам високої якості або обладнання забезпечує можливість отримання якісного продукту цієї технологічної операції через свій моральний чи фізичний знос. Якщо говорити про технологічну операцію виготовлення формувальної чи стрижньової суміші, то піски, зв'язуючі тощо можуть бути від різних постачальників або їх властивості псуються через невідповідне зберігання в бункерах, закромах, або через дію температур, вологості в цеху тощо. Те ж саме стосується шихти для плавки, флюсів, феросплавів. Тобто якість матеріалів не є детермінованою величиною, а тому можливо оцінити її лише з деякою ймовірністю. Таким чином можна говорити про зовнішній стан v , за якого Т-К та Т-Е мають приймати рішення. Зважаючи на різноманітність обладнання та технологічних режимів, які можуть бути використані для однієї технології виливку, існує певна множина зовнішніх станів $\theta = (v_1, \dots, v_m)$. Таким чином, відомим може бути лише апіорний розподіл ймовірностей $\xi(v)$ на просторі зовнішніх станів θ , що є змішаною стратегією, яка має обирати Т-Е.

Задача Т-К полягає в тому, щоб прийняти якесь рішення щодо варіанту технології на основі вибору з принципово можливих рішень: a_1, a_2, \dots, a_n . Кожне з цих рішень є чистою стратегією Т-К, а множина $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ є простором чистих стратегій Т-К. Відповідно він повинен вміти оцінити кожен зі своїх дій. Для цього він припускає, що роблячи дію a , можна зазнати збитку $L(v, a)$, яка залежить як від обраного ним варіанту технології, так і від зовнішнього стану v , який може бути невизначеним.

По аналогії з (2.2) формується матриця втрат, де $q_{ij} = L(v_i, a_j)$ – це функція втрат. Знання функції втрат дозволяє Т-К зробити дії, які є найкращими за умов наявної в нього інформації щодо доступних варіантів обладнання, його фізичного стану, а також якості сировини та відповідних технологічних режимів виготовлення елементів ливарної форми. Знання такої статистики дозволяє визначити середні

втрати в технологічному процесі при виборі конкретного варіанту технології виливку:

$$L(\xi, a) = \sum_{v \in \theta} L(v, a) \xi(v). \quad (2.3)$$

Найкращою буде байєсівська дія a^* , що відповідає такому варіанту технології виливка, за якого втрати від реалізації технологічного процесу будуть мінімальними та дорівнювати

$$R^*(\xi) = L(\xi, a^*) = \min_{a \in A} L(\xi, a). \quad (2.4)$$

Т-К може не обмежуватись вибором чистих стратегій, а використовувати змішані стратегії. Вони можуть полягати, наприклад, в тому, що використовується частина технологічних рішень від однієї стратегії, а частина від іншої. Якщо варіантів технології більше двох, то, відповідно, змішаних стратегій буде більше. Інший варіант – це використання «суміші» чистих стратегій в тому розумінні, що вибір кожного варіанту здійснюється з певним законом розподілення ймовірностей. Для визначення такого закону мають бути статистичні дані щодо використання кожного варіанту технології для різних виливків в рамках однієї номенклатури. Це означає, що, маючи вибірку існуючих даних по технологіям таких виливків, Т-К може визначити закон розподілу ймовірностей $\eta(a) = (\eta^{(1)}, \dots, \eta^{(m)})$, що визначає ймовірності, з якими зазвичай використовуються технологічні рішення a_1, a_2, \dots, a_n , і, відповідно, він буде використовувати саме такі стратегії. Загалом Т-К «розпоряджується» набором змішаних стратегій $H = (\eta_1(a), \dots, \eta_v(a))$, що формують простір змішаних стратегій Т-К.

У випадку, якщо Т-К застосовує змішану стратегію $\eta(a)$, а Т-Е застосовує змішану стратегію $\xi(v)$, то середні втрати на реалізацію технологічного процесу будуть складати

$$L(\xi, \eta) = \sum_{v, a} L(v, a) \xi(v) \eta(a). \quad (2.5)$$

Задача Т-К полягає в тому, щоб обрати таку стратегію $\eta^*(a) \in H$, за якої середні втрати $L(\xi, \eta^*)$ будуть мінімальними:

$$L(\xi, \eta^*) = \min_{\eta \in H} L(\xi, \eta). \quad (2.6)$$

Стратегія $\eta(a)$ є допустимою, якщо не можна знайти жодної стратегії $\eta'(a)$, яка є кращою за $\eta(a)$. Це означає, що не існує такої стратегії, для якої втрати при її реалізації менші, ніж втрати при реалізації стратегії $\eta(a)$, або дорівнюють їм:

$$L(v, \eta') \leq L(v, \eta). \quad (2.7)$$

Відповідно, стратегія $\eta(a)$ є неприпустимою, якщо існує стратегія $\eta'(a)$ краща, ніж $\eta(a)$. В такому випадку стратегію $\eta(a)$ слід виключити, віддавши перевагу стратегії $\eta'(a)$.

Допустимі стратегії можна визначити з графіка, що відображає S-гру, а саме: допустимими є стратегії, що відповідають нижній межі S-області, що знаходиться всередині межі. Такий графік будується в системі координат « $L(v_1, a) - L(v_2, a)$ », а дані беруться з таблиці втрат $q_{ij} = L(v_i, a_j)$ (табл. 2.1)

Таким чином, таблиця для побудови S-гри та визначення допустимих стратегій містить в кожній комірці величину втрат, які будуть мати місце при виборі того чи іншого варіанту технології та того чи іншого варіанту її реалізації.

Таблиця 2.1 - Матриця технологічної гри

	a_1	a_2	...	a_n
v_1	$L(v_1, a_1)$	$L(v_1, a_2)$...	$L(v_1, a_n)$

v_2	$L(v_2, a_1)$	$L(v_2, a_1)$...	$L(v_2, a_n)$
...
v_m	$L(v_m, a_1)$	$L(v_m, a_2)$...	$L(v_m, a_n)$

За величину втрат для кожного з варіантів пропонується обирати сумарні витрати на реалізацію технології, що містить складові втрат по кожній технологічній операції виготовлення виливку:

$$q_{ij} = L(v_i, a_j) = B_{\Sigma}(v_i, a_j) = \sum_{s=1}^9 B_s(v_i, a_j), \quad (2.7)$$

де індекс s відповідає технологічній операції при реалізації обраного варіанту технології та задається наступним чином:

- $s = 1$ – технологічна операція виготовлення модельного комплекту,
- $s = 2$ – технологічна операція виготовлення стрижньових ящиків,
- $s = 3$ – технологічна операція виготовлення формувальної суміші,
- $s = 4$ – технологічна операція виготовлення стрижньової суміші,
- $s = 5$ – технологічна операція виготовлення форми,
- $s = 6$ – технологічна операція виготовлення стрижнів,
- $s = 7$ – технологічна операція виготовлення розплаву,
- $s = 8$ – технологічна операція збірки та заливки форм,
- $s = 9$ – фінішні технологічні операції (вибивки, видалення литників, зачистка, ґрунтовка).

Задля універсалізації розрахунків та створення можливостей для масштабування підходу, що пропонується, усі дані мають бути нормовані. Для цього за 1, що відповідає 100% витрат, може бути прийнято собівартість 1 тони литва (C). В такому разі кожна складова витрат представляється як частка від C :

$$B_s(v_i, a_j) = k_{sl} C, \quad (2.8)$$

де k_{sl} – коефіцієнт, що відображає частку витрат на s -ю технологічну операцію.

Для вибору оптимальної стратегії може бути використано принцип мінімаксу, згідно з яким Т-К вибирає таку змішану стратегію $\eta(a)$, при якій середні втрати $L(v, \eta)$ будуть мінімальними за найгірших зовнішніх умов v . Такі умови відповідають ситуації найгіршого вибору обладнання та/чи технологічних режимів диференційовано по видам обраного обладнання. Найгіршим буде таке $v \in \theta$, за якого величина $L(v, \eta)$ буде максимальна. Саме цю величину Т-К має мінімізувати, тобто вибрати стратегію $\eta^*(a)$, яка забезпечує виконання умови:

$$L(v, \eta^*) = \min_{\eta} \max_v L(v, \eta). \quad (2.9)$$

Зважаючи на те, що допустимі стратегії відповідають нижній межі, аналізуватися мають лише ті відрізки в координатах « $L(v_1, a) - L(v_2, a)$ », які відповідають цим нижнім границям. Загальне рівняння для визначення кожного такого відрізка $L(v_i, a_j)L(v_i, a_{j+1})$ має вигляд

$$S = \omega S_1 + (1 - \omega) S_2, \quad (2.10)$$

де ω змінюється в діапазоні: $0 \leq \omega \leq 1$, а через S_1 та S_2 позначено крайні точки кожного відрізка на графіку S-гри.

Проектування відрізка $L(v_i, a_j)L(v_i, a_{j+1})$ на осі координат визначає рівняння:

$$\begin{aligned} L(v_1, \eta) &= L(v_i, a_j) \cdot \omega + L(v_i, a_{j+1})(1 - \omega); \\ L(v_2, \eta) &= L(v_{i+1}, a_j) \cdot \omega + L(v_{i+1}, a_{j+1})(1 - \omega). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Це рівняння визначає змішану стратегію $\eta(a) = (\omega, 1 - \omega, 0)$.

Проектування відрізка $L(v_i, a_{j+1})L(v_i, a_{j+2})$ на осі координат визначає рівняння:

$$\begin{aligned} L(v_1, \eta) &= L(v_i, a_{j+1}) \cdot \omega + L(v_i, a_{j+2})(1 - \omega); \\ L(v_2, \eta) &= L(v_{i+1}, a_{j+1}) \cdot \omega + L(v_{i+1}, a_{j+2})(1 - \omega). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Це рівняння визначає змішану стратегію $\eta(a) = (0, \omega, 1 - \omega)$

За таким же принципом будуються інші рівняння, кількість яких для кожного зовнішнього стану залежить від кількості чистих стратегій Т-К, тобто від кількості принципово можливих варіантів технології виливку. Сумісний аналіз цих рівнянь дозволяє на основі (2.9) визначити ω , а по ній оптимальну змішану стратегію $\eta^*(a)$, за якою втрати будуть не більшими за будь-яких зовнішніх станів, тобто за будь-якого вибору обладнання та технологічних режимів.

Формування матриці технологічної гри можливо й для кожного окремого технологічного процесу, якщо ставиться задача знаходження оптимального технологічного рішення для обраної технологічної операції s . При цьому побудова графіків технологічної гри дозволяє візуалізувати наявність допустимих стратегій та графічно визначити наявність оптимального рішення на основі принципу мінімаксу (2.9).

2.3 Визначення вхідних даних для проєктування технології ливарної форми на основі прогнозування програми виробництва.

Розробка технології виливку передбачає на першому етапі визначення характеру виробництва – одиничне, серійне (дрібносерійне, серійне, багатосерійне), масове. Зокрема це передуює розрахунку припусків на механічну обробку і є основою для вибору обладнання та ступеня його завантаженості. А ці складові закладаються в подальші розрахунки сумарних витрат на реалізацію технології (2.7). Якщо такий критерій обирати за основу визначення оптимальних технологічних рішень, що забезпечують ресурсо- та енергозаощадження для виробництва, та відповідне обладнання та технологічні режими, то має бути

алгоритм визначення реальних прогнозованих потреб у виливках. Але це пов'язано із певною невизначеністю, бо нестабільні зовнішні фактори не дають змогу однозначно визначити необхідну виробничу програму як по окремому виливку, так і по номенклатурі виливків. В разі, якщо номенклатура відома, то є потреба у вирішенні задачі прогнозу по кількості виливків цієї номенклатури.

Ще одна складність полягає в тому, що за існуючих змінних зовнішніх умов може виникнути потреба в швидкому освоєнні виливків нової номенклатури, які до цього не виготовлялися в базовому виробництві. Тобто необхідно швидко вирішувати питання оптимальної конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

Необхідність вкладання коштів в придбання нового обладнання ливарного цеху та комплекс заходів щодо адаптації такого обладнання до технологічних процесів, що реалізуються в цеху, стає додатковим фактором збільшення витрат, що мають враховуватися в критерії (2.7). Тому важливим є визначення резервів виробництва, пов'язаних з можливістю раціонального розподілу завантаження обладнання на всіх ділянках ливарного цеху. Таким чином, в рамках вибору оптимальної стратегії проектування технології виливку варто враховувати результати визначення можливих резервів при оцінці зовнішніх умов в контексті технологічної гри з боку Т-Е. Саме тому першим завданням, на рішенні якого має базуватися розробка технології виливку, стає визначення необхідного прогнозного обсягу литва. Це дозволить розраховувати фактичну потребу у формувальній та стрижневій суміші, стрижнях, оснастці, формах відповідно до плану виробництва. Наявність результатів розрахунків за фактичними потребами за окремими виробничими ділянками цеху та технологічними операціями дозволить, у свою чергу, виявити фактичне завантаження обладнання та знайти його раціональний варіант під фактичну потребу у матеріалах (MRP). Для цього можна скористатися методом визначення необхідної прогнозованої кількості виливків різної номенклатури «партія за партією», як це запропоновано в роботі [116]. Отримані результати реалізації такого методу можуть бути використані при оцінці з боку Т-Е кожного технологічного рішення, що пропонується з боку Т-К, і покладені в

основу визначення найбільш доцільного розподілу завантаження обладнання на усіх ділянках цеху по усіх технологічних операціям виготовлення виливків.

Для реалізації цього методу використовується прогнозний лінійний тренд, що будується на основі даних по кількості виливків номенклатури протягом одного року. Цей лінійний тренд є лінійної функцією необхідної прогнозованої кількості виливків диференційовано по місяцях прогнозного періоду.

На першому етапі будується фактична залежність кількості виливків від номера місяця

$$Y = a + bX, \quad (2.13)$$

де X – номер прогнозного періоду відносно базового, за який приймається поточний період, який є останнім перед першим прогнозним періодом ($X=0$),

a та b – коефіцієнту тренду, що визначаються методом найменших квадратів:

$$A = (F^T F)^{-1} F^T Y, \quad (2.14)$$

де F – матриця плану, перший стовпчик якої складається з одиниць, а другий з номерів місяців, F^T – транспонована матриця плану, $(F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця плану, Y – матриця, елементами якої є кількості виливків номенклатури протягом одного року, щомісяця, A – матриця шуканих коефіцієнтів розміром (2×1) , перший елемент якої дорівнює a , другий елемент дорівнює b .

На другому етапі будується прогнозована залежність кількості виливків від номера місяця на заданий горизонт, використовуючи формулу (2.15), яка приймає вигляд

$$T = a + bX, \quad (2.15)$$

де T – прогнозна кількість виливків на заданий термін вперед, починаючи з поточного номеру місяця, який настає за базовим.

Таким чином, формула (2.15) дозволяє розрахувати прогнозні значення необхідної кількості виливків на наступні місяці, включно з замовленнями випадкових сторонніх замовників, обираючи відповідні значення X .

Далі визначаються індекси коливань на кількість виливків по замовленнях:

$$I_i^p = \frac{Y_i^p}{T_i^p}, \quad (2.16)$$

де i – порядковий номер місяця на обраному статистичному інтервалі часу.

Використовуючи цю величину можна визначити остаточний прогноз на виливку на заданий місяць вперед, тобто здійснити прогнозування на необхідний горизонт планування:

$$Y_j^F = I_j^F T_j^F \quad (2.17)$$

де j – порядковий номер місяця, на який робиться прогноз.

За отриманими результатами будується графік попиту на виливок на відповідному тренді. Результати розрахунків по кожному виливку номенклатури збираються в загальну зведену таблицю.

Планування потреб у матеріалах та оснащенні для реалізації обраного варіанту технологічного процесу базується на визначенні загального обсягу на виливки по всій номенклатурі цеху. За плановий період може бути прийнято один місяць.

Вихідними даними для побудови MRP-графіку, тобто планування потреб у матеріалах в часі за методом «партія за партією», є запас кожного виливку A , чиста потреба в ньому, цикл виготовлення. Розрахунку підлягає планова видача замовлення з цього виливку на заданий час, наприклад півроку або рік, уперед.

Технологія виготовлення виливків за такого підходу з використанням MRP-методу розбивається на етапи, які відповідають технологічним операціям, з яких складається технологічний процес виготовлення виливку відповідно до обраного

варіанту технології. Складові позначаються прямокутниками, в яких зазначено їх умовне позначення та кількість складових, що входять у готовий виріб – виливок.

Приклад подання складових та формування виливку представлений на рис. 2.10.

Маючи таку схему по кожному виливку, формується загальне уявлення по можливій реалізації технологічних процесів з урахуванням обладнання, яке міститься в ливарному цеху.

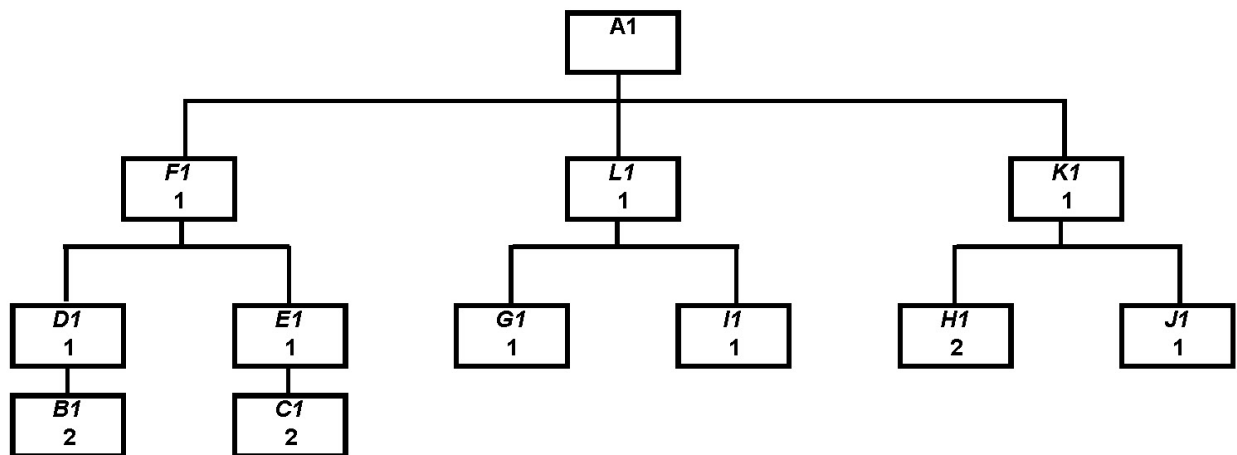


Рисунок 2.10 - Схема етапів виготовлення виливка «А».

На рис. 2.10 прийнято наступні позначення:

B1 – модель низу, *C1* – модель верху, *D1* – модельна плита низу,

E1 – модельна плита верху, *F1* – комплект модельний,

G1 – стрижньовий ящик,

H1 – опока, *I1* – стрижньова суміш, *J1* – формувальна суміш,

K1 – форма, *L1* – стрижень.

Схема етапів виготовлення виливка дозволяє формалізувати опис технологічного процесу виготовлення кожного виливку номенклатури. Так, відповідно до наведеного прикладу на рис. 2.9, для виготовлення виливку використовується модельний комплект, що складається з комплекту верху та низу, тобто в технології виливку передбачено розтин форми та моделі, а сам виливок має

одну порожнину, що виготовляється стрижнем, для виготовлення якого передбачено один стрижньовий ящик.

Використовуючи результати розрахунків загальних потреб у матеріалах та оснащенні за складовими технологічного процесу виготовлення виливків, визначається загальна потреба у ливарному цеху для виконання всієї програми. При цьому, на основі характеристик ливарного обладнання, що експлуатується в цеху, може бути визначено фактичне завантаження обладнання ділянками цеху, його коефіцієнт корисної дії (ККД) та енерговитрати на реалізацію процесу. Ці дані закладаються в розрахунок за критерієм (2.7) як складові зовнішніх впливів, що оцінюються з боку Т-Е.

Результати розрахунків загальний обсягу, з урахуванням прогнозу на заданий прогнозний період та твердих замовлень, зводиться в загальну таблицю диференційовано по місяцях. Приклад формування таких результатів представлено в табл. 2.2 для планованого горизонту 6 місяців.

Таблиця 2.2 - Результати розрахунку загальної потреби у виливку «А»

	Місяць планованого горизонту					
	1	2	3	4	5	6
Прогноз	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}
Тверді замовлення	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}	T_{25}	T_{26}
Загальний обсяг потреби у виливках	$T_{11}+T_{21}$	$T_{12}+T_{22}$	$T_{13}+T_{23}$	$T_{14}+T_{24}$	$T_{15}+T_{25}$	$T_{16}+T_{26}$

Для реалізації запропонованого підходу для кожного виливку формуються вхідні дані, що представляються в табличному вигляді, приклад якого представлено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Вихідні технологічні дані для побудови MRP-графіка по виливку А1

Необхідна кількість, шт	n
Маса виливку, кг	m_v
Матеріал виливку	Чавун
Кількість виливків у формі	k
Щільність сплаву, кг/м ³	7200
Кількість стрижнів в стрижньовому ящику	l
Габарити стрижня, мм	
Довжина	L_c
Ширина	B_c
Висота	H_c
Габарити форми, мм	L_ϕ
Довжина	B_ϕ
Ширина	H_ϕ
Висота	
Об'єм стрижня, м ³	V_c
Об'єм полої форми, м ³	$V_{n\phi}$
Об'єм моделі, м ³	V_m
Об'єм стрижнів в формі, м ³	$V_{c\phi}$
Об'єм робочої порожнини форми, м ³	$V_{pn\phi}$
Маса стержня, кг	m_c

На рис. 2.11 представлено технологію виливку «Шкив», відповідно до схеми етапів, показної на рис. 2.10.

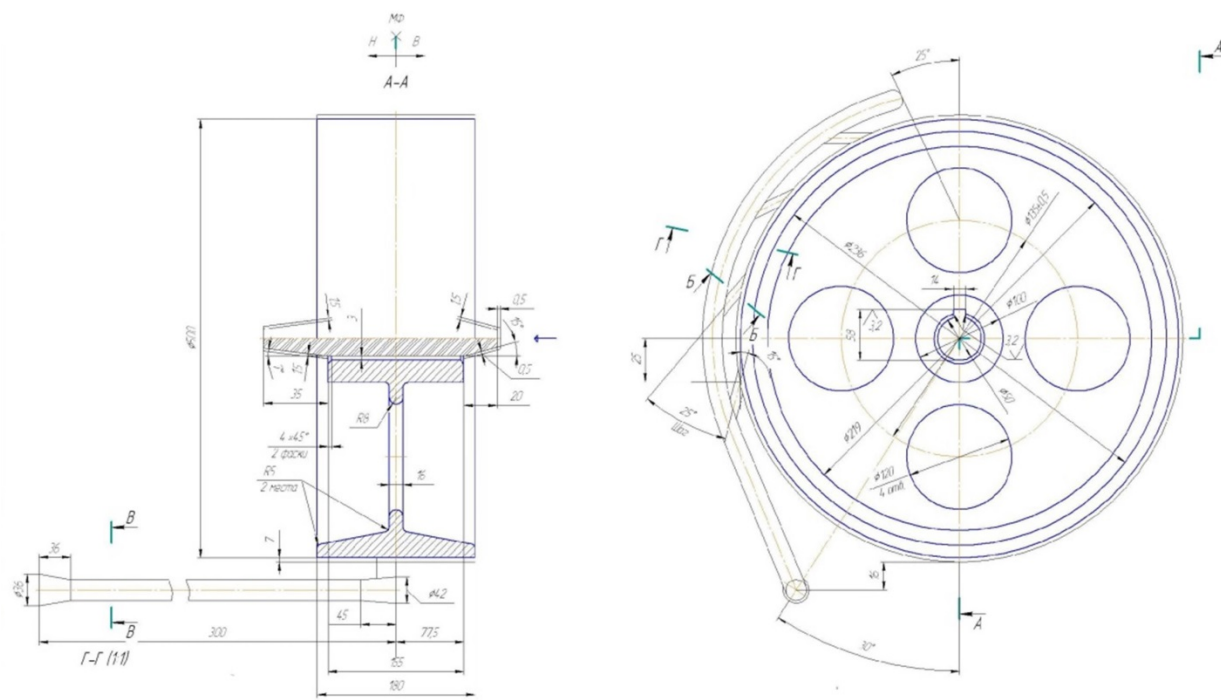


Рисунок 2.11 - Технологія виливку «Шкив»

Пан розміщення виливків форми (табл. 2.3) показано на рис. 2.12.

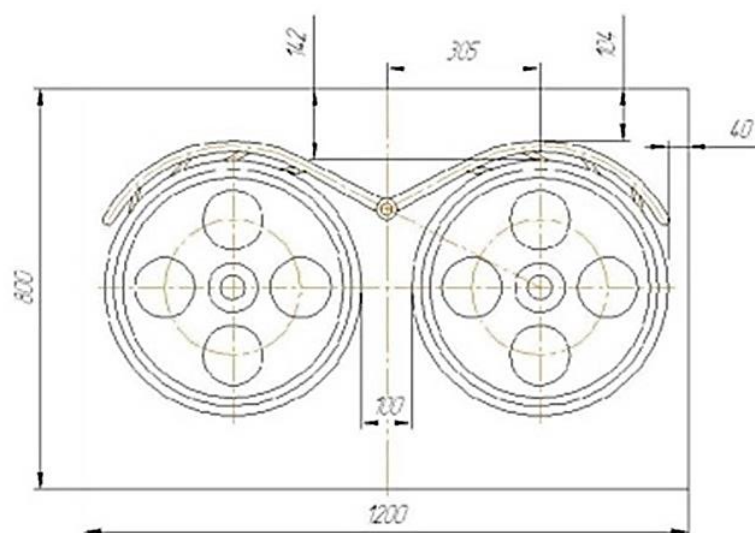


Рисунок 2.12 - План розміщення виливку «Шкив» в ливарній формі

На рис. 2.13 показано конструкцію стрижньового ящика (GI, рис. 2.10)

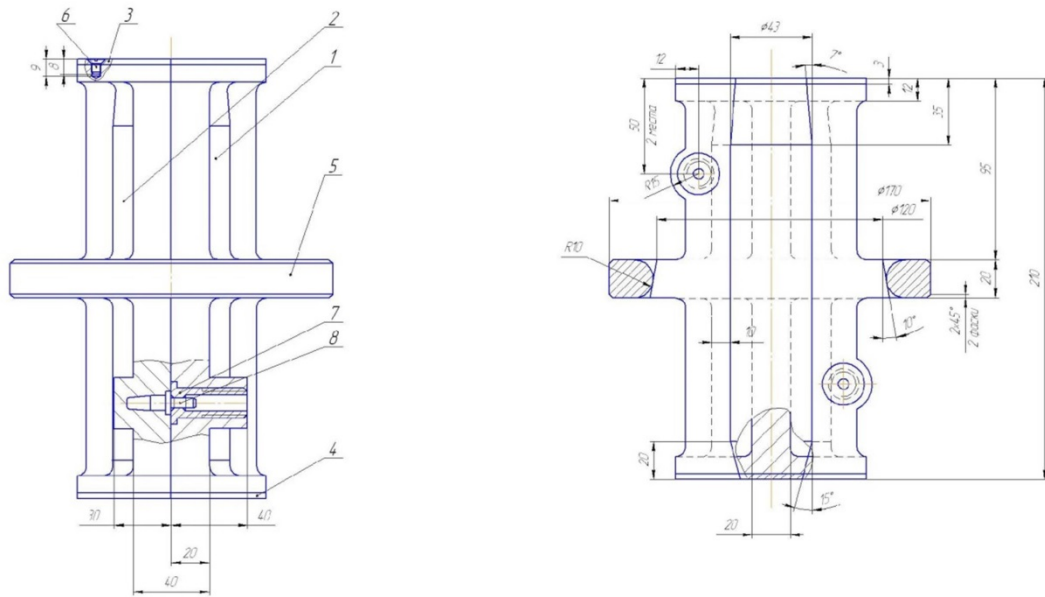


Рисунок. 2.13 - Стрижньовий ящик для виготовлення стрижня для виливку
«Шкив»

Модельний комплект верху (C1+ E1, рис. 2.10) показано на рис. 2.13.

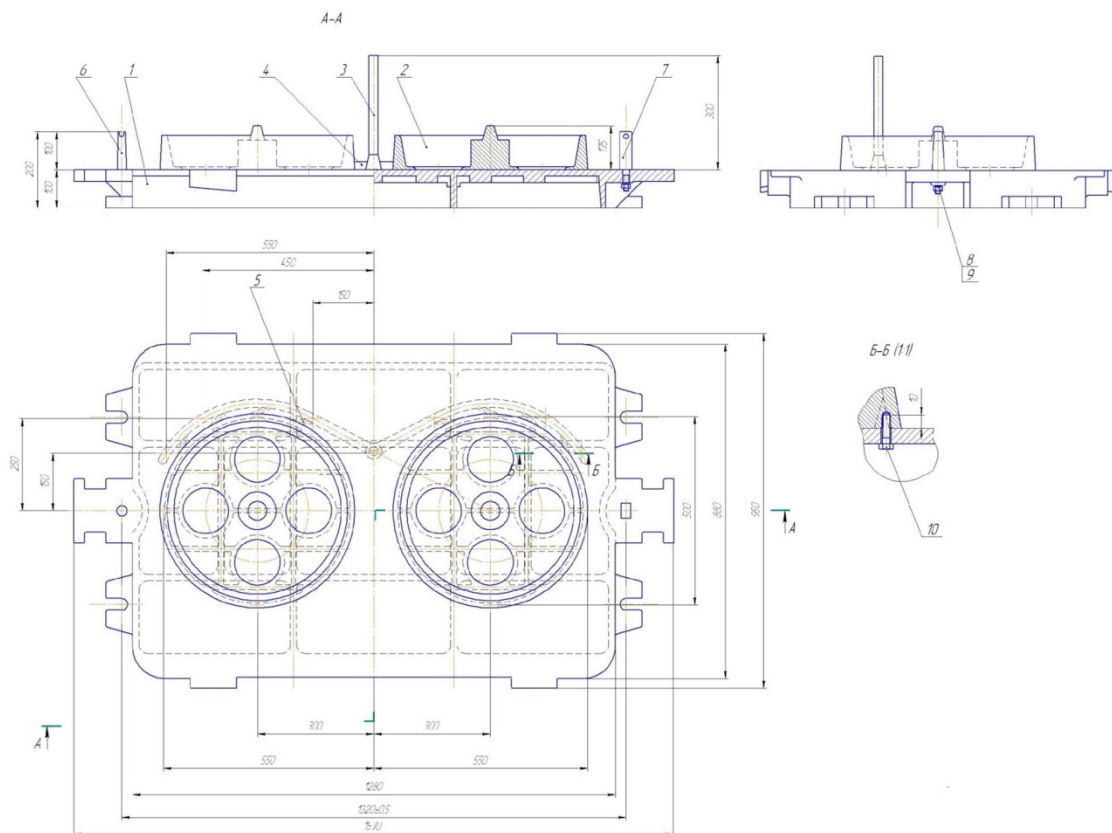


Рисунок 2.14 - Модельний комплект верху для виготовлення напівформи
верху виливку «Шкив»

проектування, але й зворотних зв'язків між ними. Це обґрунтовується тим, що конструкторсько-технологічна підготовка ливарного виробництва передбачає комплекс заходів, спрямованих не лише на конструювання виливків чи оснастки, але й на розробку та відпрацювання технології, результати якої мають бути враховані для доопрацювання конструкцій, або виливку, або технологічної оснастки. Тому запропонована схема конструкторсько-технологічного проектування виливків на основі зворотних зв'язків може бути взята за основу концепції раціонального конструкторсько-технологічного проектування виливків. Така схема включає в себе зворотній зв'язок по конструкторському етапу проектування та зворотній зв'язок по технологічному етапу проектування.

2. Запропонована класифікація по представниках корпусних виливків та ключові показники, по яких має оцінюватись ефективність проектування. Серед них диференційовано визначено ключові показники: механічні властивості, масо-габаритні характеристики, геометрична та розмірна точність. З точки зору проектування доцільно розглядати виливки на основі саме таких ключових вимог, які можуть перетинатися для різних варіантів номенклатури.

3. Вибір того чи іншого варіанту технології виливку має ґрунтуватися на оцінці витрат, пов'язаних з її реалізацією. При такому розгляді етапу проектування технології цей процес формально може бути представлений у вигляді певної технологічної гри, базуючись на теорії статистичних ігор. Введені такі визначення: Технологічна гра, Гравці, Партія гри, Хід, Особистий хід, Випадковий хід, Стратегія гравця. За таких визначень основне завдання полягає у знаходженні оптимальної стратегії, яка передбачає такі технологічні рішення щодо виливку та ливарної форми, які забезпечуються за мінімальних витрат на реалізацію технологічного процесу. Для визначення оптимальної стратегії запропоновано формування таблиці S-гри, відповідно до якої в кожній комірці визначається величина втрат, які будуть мати місце при виборі того чи іншого варіанту технології виливку та форми, а також того чи іншого варіанту їх реалізації.

4. Для вибору оптимальної стратегії запропоновано використовувати принцип мінімаксу. При цьому побудова графіків технологічної гри дозволяє візуалізувати

наявність допустимих стратегій щодо вибору варіанту технології форми та конструкції оснастки та графічно визначити наявність оптимального рішення на основі принципу мінімаксу.

5. Показано, що вибір характеру виробництва є важливим фактором визначення технології ливарної форми, особливо в разі виготовлення корпусних виливків, де найбільш важливим є фактор сумарних витрат на реалізацію обраного варіанту технології. Якщо такий критерій обирати за основу визначення оптимальних технологічних рішень, що забезпечують ресурсо- та енергозаощадження для виробництва, та відповідне обладнання та технологічні режими, то має бути алгоритм визначення реальних прогнозованих потреб у виливках. Для цього запропоновано використовувати прогнозний лінійний тренд, що будується на основі даних по кількості виливків номенклатури протягом одного року і є лінійною функцією необхідної прогнозованої кількості виливків диференційовано по місяцях прогнозного періоду. Це дозволить визначати потребу в технологічних матеріалах за методом «партія за партією».

6. При плануванні потреб у технологічних матеріалах та оснащенні в часі за методом «партія за партією», розрахунку підлягає планова видача замовлення з цього виливку на заданий час, наприклад півроку або рік, уперед. Запропоновано технологію виготовлення виливків за такого підходу розбивати на етапи, які відповідають технологічним операціям, з яких складається технологічний процес виготовлення виливку відповідно до обраного варіанту технології. Отримані результати фактичного завантаження обладнання, виходячи з можливих рішень щодо технології виливку з урахуванням існуючого обладнання в цеху, можуть бути використані для оцінки процесу з позиції теорії статистичних ігор, тобто враховуватись в запропонованій матриці технологічної гри. При цьому фактична потреба у виливках, що розрахована за MRP-методом, може бути закладена на початковому етапі проєктування технології виливків.

РОЗДІЛ 3 НАПРЯМКИ ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЛИВКУ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ОСНАСТКИ

3.1 Визначення загальної потреби у виливках та типу виробництва

Нехай для виробництва планується номенклатура з п'яти виливків, частина з яких має бути виготовлення з чавуну, а частина зі сталі. На одному з перших етапів розробки технології необхідно розрахувати припуски на механічну обробку. Для цього необхідно визначити класи точності розмірів та мас та ряди припусків на механічну обробку. Вихідними даними є складність виливків та тип виробництва, зокрема класи точності розмірів та мас обираються виходячи з таких прийнятих міркувань:

- менші значення класів точності відносяться до простих виливків, що виготовляються в умовах масового автоматизованого виробництва,
- більші значення класів точності відносяться до складних виливків, що виготовляються в умовах малосерійного чи одиничного виробництва,
- проміжні значення класів точності відносяться до виливків середньої складності, що виготовляються у механізованому серійному виробництві.

Нехай для визначеності номенклатура та кількість диференційовано по виливках відповідає даним, наведеним в табл. 3.1.

Отриманим даним передувало:

- визначення матеріалу виливків,
- вибір розтину моделі та форми,
- визначення кількості та способів установки стрижнів,
- визначення ухилів на моделях, стрижнях, зазорів в стрижнях,
- вибір кількості виливків у формі з урахуванням формувального обладнання, що наявне в цеху,
- визначення необхідної кількості стрижньових ящиків з урахуванням обладнання для виготовлення стрижнів та кількості стрижнів у ящиках, з

урахуванням габаритів стрижньових ящиків, відповідно розробка конструкції стрижнів, способів їх виготовлення та установки в форму.

Таблиця 3.1 - Вхідні дані для розрахунку потребу у виливках та типу виробництва

Характеристика	Значення по виливках				
	A1	A2	A3	A4	A5
Маса вилівка, кг	5	150	30	90	250
Матеріал вилівка	Чавун СЧ250	Сталь 35Л	Сталь 25Л	Сталь 35Л	Чавун СЧ250
Кількість виливків в формі	2	1	1	1	1
Щільність матеріалу, кг/м ³	7200	7200	7200	7200	7200
Кількість стрижнів в ящику	1	2	1	2	1
Габарити стрижня, мм					
Довжина	300	250	400	600	600
Ширина	50	70	80	200	500
Висота	80	90	40	100	150
Габарити форми, мм					
Довжина	600	1000	700	1000	1000
Ширина	500	800	500	800	600
Висота	250	300	200	300	250
Об'єм стрижня, м ³	0,0102	0,005	0,0124	0,0075	0,0173
Об'єм полої форми, м ³	0,15	0,48	0,14	0,48	0,3
Об'єм моделі, м ³	0,00139	0,02083	0,00417	0,0125	0,03472
Об'єм стрижнів в формі, м ³	0,0102	0,015	0,0248	0,015	0,0692
Об'єм робочої порожнини форми, м ³	0,13841	0,44417	0,11103	0,4525	0,19608
Маса стрижня, кг	16,32	8	19,84	12	27,68

Схема етапів виготовлення вилівка А1 відповідає наведений на рис. 3.1.

Принцип позначення складових схеми відповідає наведеному до рис. 2.10.

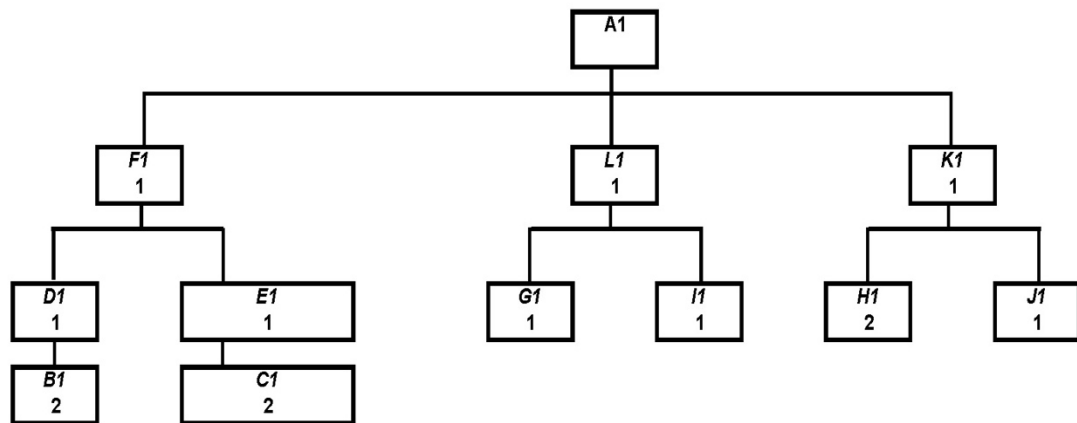


Рисунок. 3.1 - Схема етапів виготовлення виливка A1

Аналізом цієї схеми та даних з табл. 3.1 визначається, що виливок A1 є нескладним, а технологія передбачає розміщення в одній формі двох виливків, в кожному з яких є порожнина, що виготовляється одним стрижнем.

Схема етапів виготовлення виливка A2 відповідає наведеній на рис. 3.2.

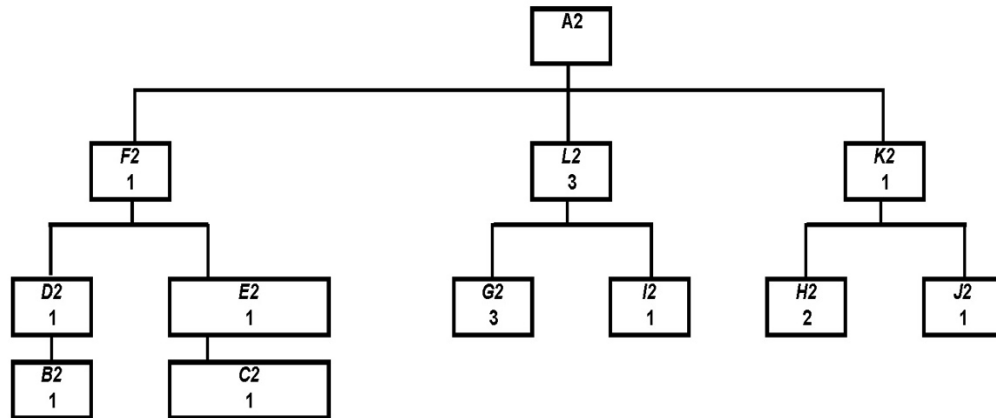


Рисунок. 3.2 - Схема етапів виготовлення виливка A2

Аналізом цієї схеми та даних з табл. 3.1 визначається, що виливок A2 є складним, з урахуванням масо-габаритних характеристик, кількості стрижнів та типу сплаву а технологія передбачає розміщення в одній формі одного виливку, складна порожнина якого виготовляється трьома стрижнями.

Схема етапів виготовлення виливка A3 відповідає наведеній на рис. 3.3.

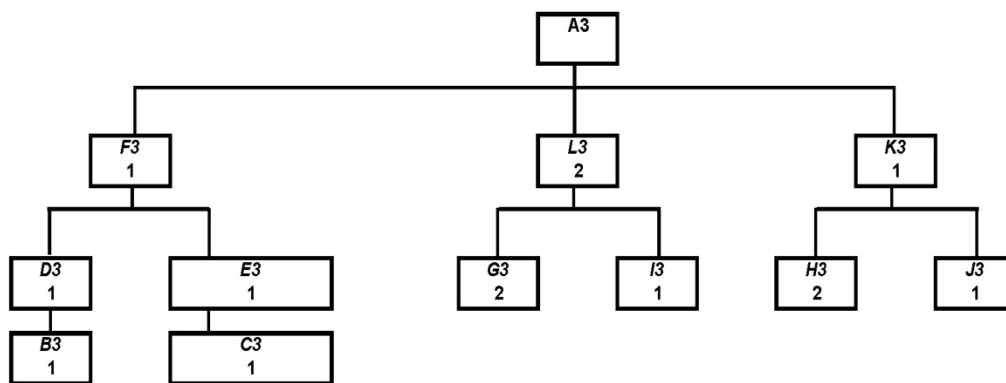


Рисунок. 3.3 - Схема етапів виготовлення виливка А3

Аналізом цієї схеми та даних з табл. 3.1 визначається, що виливок А3 є середньої складності, з урахуванням кількості стрижнів та типу сплаву, а технологія передбачає розміщення в одній формі одного виливку, в кожному з яких порожнина виготовляється двома стрижнями.

Схема етапів виготовлення виливка А4 відповідає наведеній на рис. 3.4.

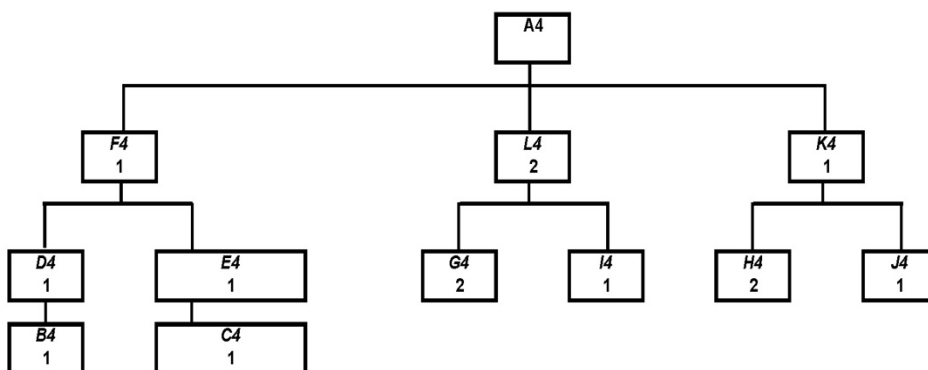


Рисунок 3.4 - Схема етапів виготовлення виливка А4

Аналізом цієї схеми та даних з табл. 3.1 визначається, що виливок А4 є середньої складності, з урахуванням кількості стрижнів та типу сплаву, а технологія передбачає розміщення в одній формі одного виливку, в кожному з яких порожнина виготовляється двома стрижнями.

Схема етапів виготовлення виливка А5 відповідає наведеній на рис. 3.5.

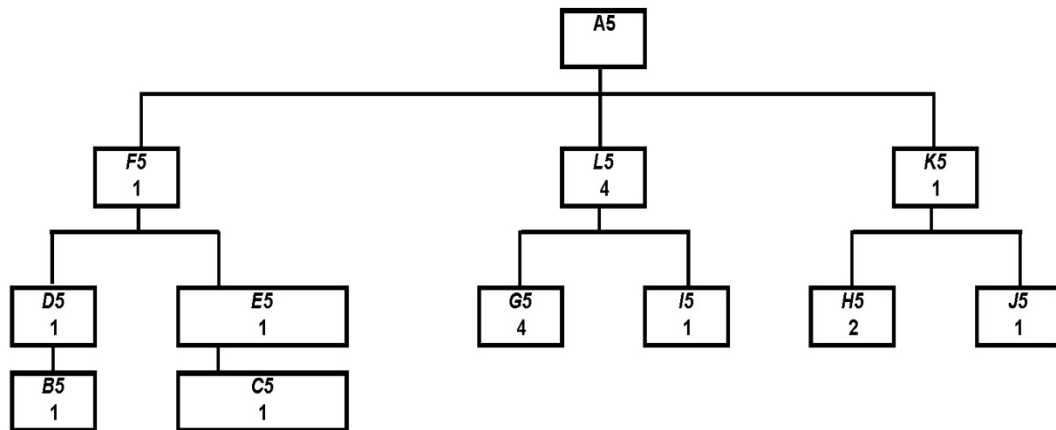


Рисунок 3.5 - Схема етапів виготовлення вилівка А5

Аналізом цієї схеми та даних з табл. 3.1 визначається, що вилівок А5 є складним, з урахуванням масо-габаритних характеристик та кількості стрижнів, а технологія передбачає розміщення в одній формі одного вилівку, складна порожнина якого виготовляється чотирма стрижнями.

В табл. 3.2 наведено вхідні дані, за якими можна визначити загальну потребу у виливках на річну програму та побудувати прогнозний тренд.

Таблиця 3.2 - Вхідні дані для розрахунку потребу у виливках та типу виробництва

Виливо к	Кількість виливків відповідно до замовлень протягом року, тис. шт											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A1	1.2	1.32	3.96	0	0	6.36	1.44	1.56	2.4	4.8	0.6	0.36
A2	0.6	4.8	6.6	1.2	0	0	5.4	7.2	0	6	6	7.8
A3	0.8	0	8.8	0	4	2.4	1.6	1.6	10.4	0.96	0.96	8.8
A4	0.45	0	0	0	5.4	5.85	6.3	4.5	2.25	0.9	2.7	3.6
A5	0.3	120	0	0	0	0	0	0	150	0	0	0
Загало м, тис.шт	3,35	126,12	19,36	1,2	9,4	14,61	14,74	14,86	165,05	12,66	10,26	20,56
Загалом , т.	235.5	30726.6	1273.8	180	606.	630.3	1432.2	1540.8	38026.5	1033.8	1174.8	1759.8

В табл. 3.3 представлені підсумкові дані розрахунку на річну програму

Таблиця 3.3 - Загальна потреба у виливках на річну програму

Виливок	Потужність виробництва		
	тис. шт	кг	т
A1	24	120000	120
A2	45.6	6840000	6840
A3	40.32	1209600	1209,6
A4	31.95	2875500	2875,5
A5	270.3	67575000	67575
Загалом	78620.1	78620100	78620,1

На рис. 3.6 показано MRP-графік по виливку A1, який фактично відображає динаміку потреби у виливку A1 відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед.

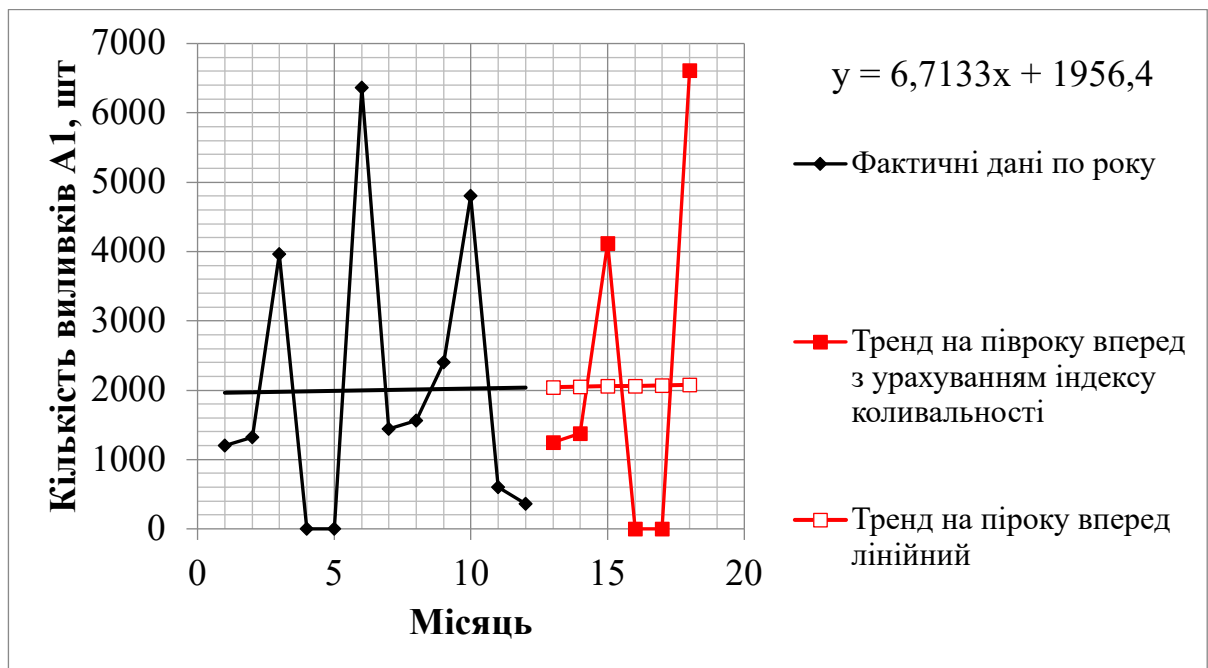


Рисунок 3.6 - Динаміка потребу у виливку A1 відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед

З рис. 3.6 видно, що протягом року потреба у виливку А1 практично не змінюється, при цьому індекс коливальності I_i^p , що визначається за формулою (2.16) знаходиться в діапазоні (0.611; 3.185).

На рис. 3.7 показано MRP-графік по виливку А2, який відображає динаміку потреби у виливку А2 відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед.

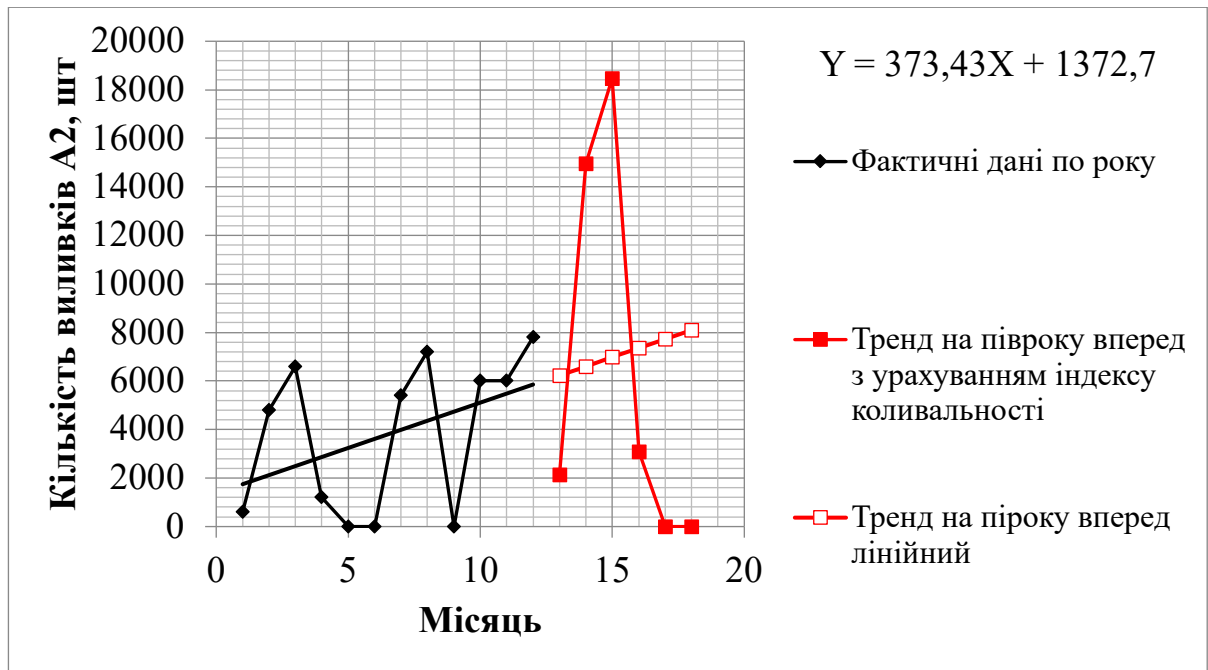


Рисунок 3.7 - Динаміка потреби у виливку А2 відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед

З рис. 3.7 видно, що протягом року потреба у виливку А2 зростає, що може означати необхідність передбачення можливості зростання потужності виробництва по цьому виливку.

Індекс коливальності I_i^p , що визначається за формулою (2.16) знаходиться в діапазоні (0.344; 2.647).

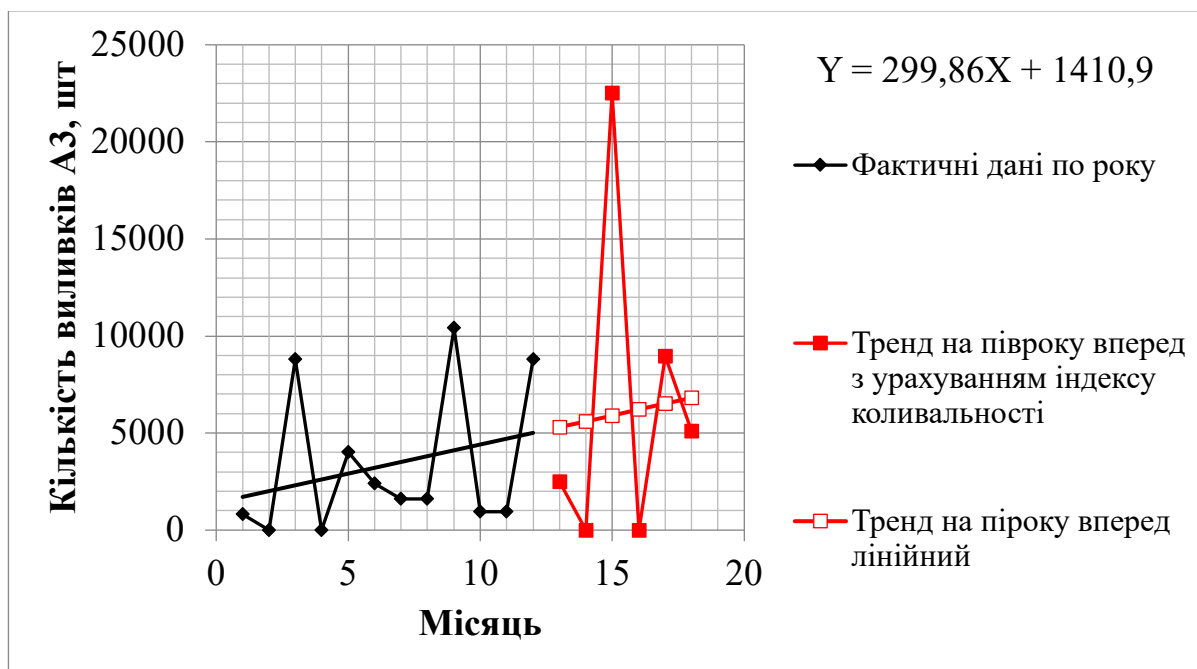


Рисунок 3.8 - Динаміка потребу у виливку АЗ відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед

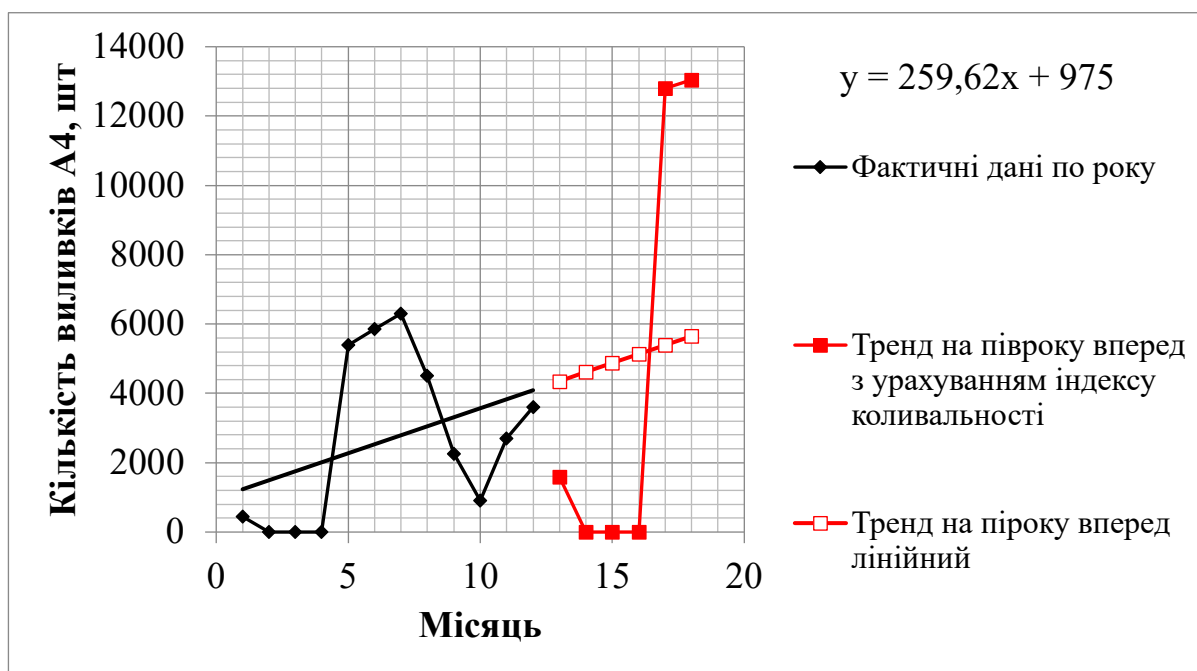


Рисунок 3.9 - Динаміка потребу у виливку А4 відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед

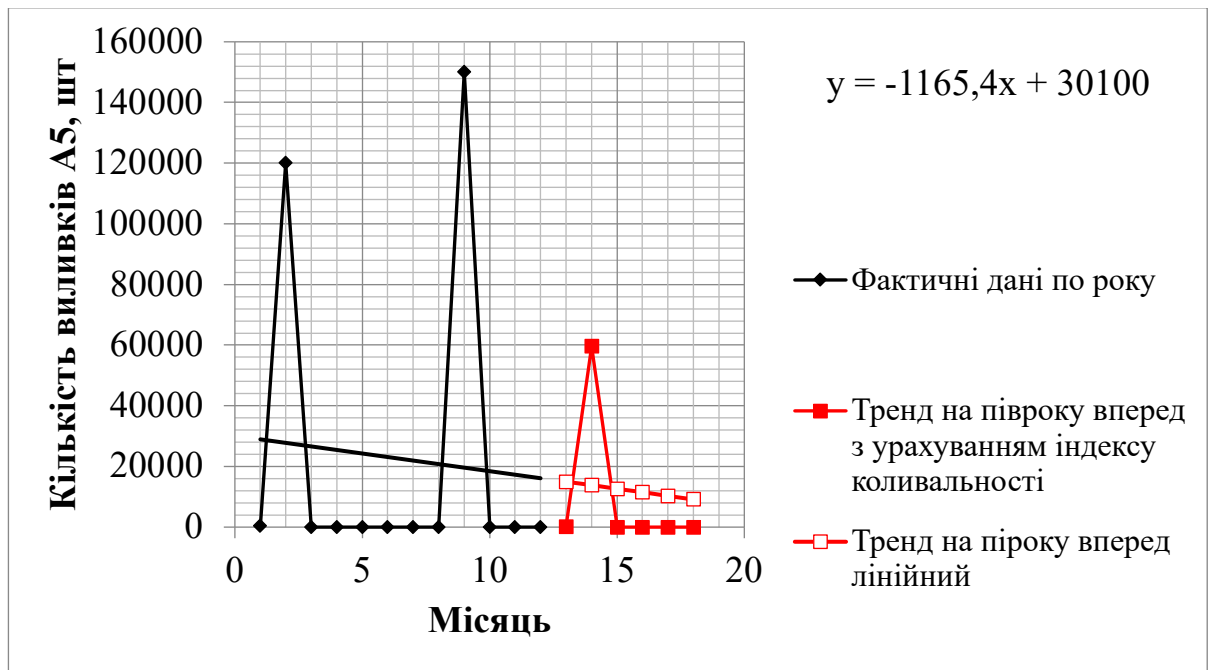


Рисунок 3.10 - Динаміка потребу у виливку А5 відповідно до річної програми та тренду на півроку вперед

Виходячи з рис. 3.6–3.10 та даних табл. 3.2, 3.3, можна визначити тип виробництва по кожному виливку:

- виливок А1 – масове,
- виливок А2 – серійне,
- виливок А3 – серійне,
- виливок А4 – серійне,
- виливок А5 – масове,

Такий висновок може бути обґрунтований тим, що кількість виливків А1 велика та існує стабільний запит на цей виливок. Кількість виливків А5 теж велика, але з негативною динамікою по запитах, відповідно в тренді характер виробництва може змінитися на серійний.

По виливках А2, А3, А4 існує позитивна динаміка, тобто дана номенклатура затребувана та може бути розширена однотипними конструкціями, що є відмінними рисами серійного характеру виробництва.

Відповідно можна обрати класи точності розмірів диференційовано по виливках заданої номенклатури.

3.2 Визначення напрямів конструкторсько-технологічних рішень як основи для вибору стратегії розробки технології виливку та проектування оснастки

Кожна стратегія розробки технології виливку та проектування оснастки може бути представлена на основі формального опису, який базується на класифікації, що включає в себе горизонтальний та вертикальний компонентні рівні. На рис. 3.11 представлено компоненти, що формують такі рівні та дозволяють формалізувати опис стратегії для виливку «Корпус ДВЗ».

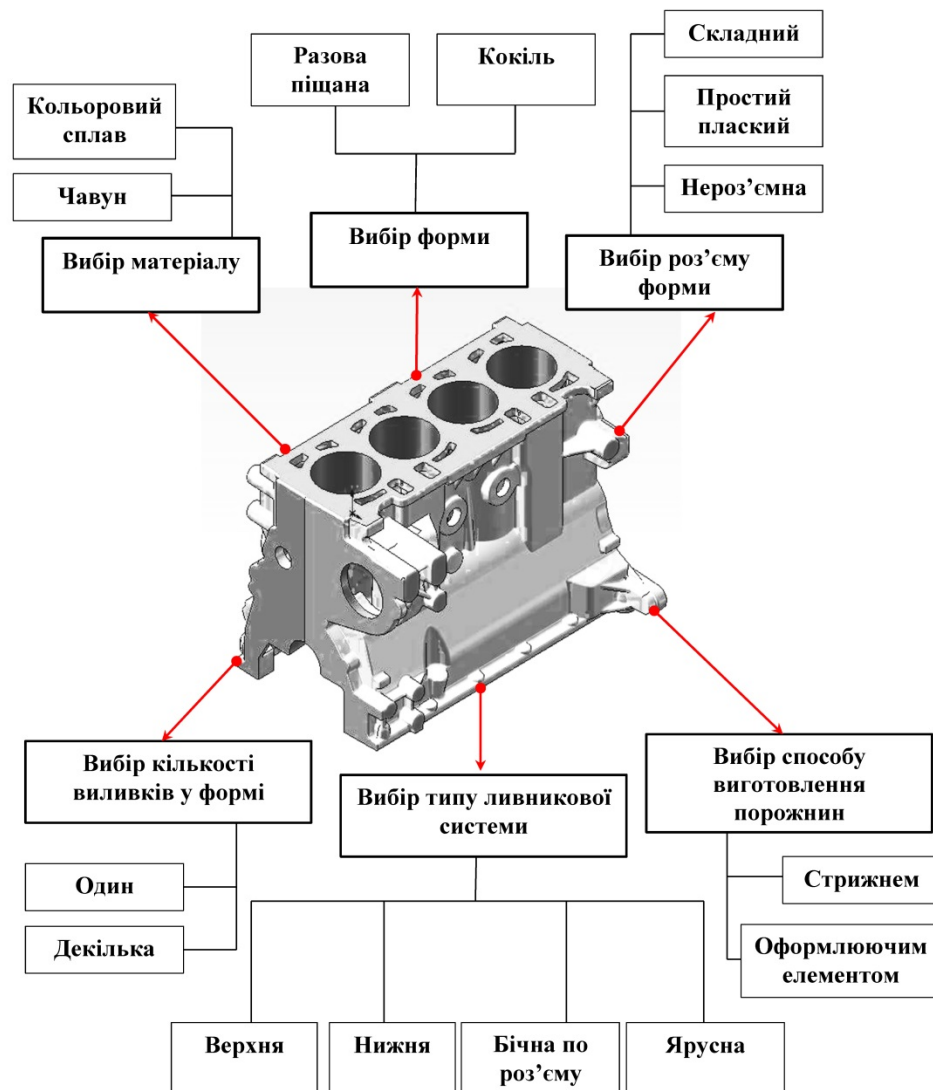


Рисунок 3.11 - Структурна схема компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проектування оснастки для виливку «Корпус ДВЗ»

Складові, що формують стратегію розробки технології виливку та проектування оснастки, узагальнено можуть бути представлені у вигляді трьох компонентів із введенням відповідних позначень:

- складова технології – Т,
- складова матеріалів – М,
- складова конструкції – К.

Для ідентифікації елементу стратегії на горизонтальному рівні такої класифікації, тобто на рівні однієї складової, може бути використано цифрове позначення, а для ідентифікації елементу стратегії всередині такої класифікації на вертикальному рівні може бути використано подвійне цифрове позначення, де перша цифра ідентифікує компоненту, а друга – елемент всередині компоненти. Відповідно до такої класифікації, згідно рис. 3.11, складовими технології (Т) є:

- вибір форми (Т1),
- вибір кількості виливків у формі (Т2),
- вибір способу виготовлення порожнин (Т3).

Тобто горизонтальний рівень для складової Т включає в себе три компоненти: Т1, Т2, Т3.

Компонента Т1 включає в себе два елементи:

- разова піщана (Т1.1),
- кокіль (Т1.2)

Компонента Т2 включає в себе два елементи:

- в формі знаходиться один вилівок (Т2.1),
- в формі знаходиться декілька виливків (Т2.2).

Компонента Т3 включає в себе два елементи:

- порожнина у виливку виготовляється стрижнем (Т3.1),
- порожнина у виливку виготовляється оформлюючим елементом (Т3.2).

Складовими матеріалів (М) є вибір матеріалу (М1), ця компонента включає в себе два елементи:

- кольоровий сплав (М1.1)
- чавун (М1.2)

Складовими конструкції (К) є:

- Вибір розтину форми (К1),
- Вибір типу ливникової системи (К2).

Тобто горизонтальний рівень для складової К включає в себе два компоненти: К1, К2.

Компонента К1 включає в себе три елементи:

- Нероз'ємна (К1.1),
- Простий плаский роз'єм (К1.2)
- Складний роз'єм (К1.3)

Компонента К2 включає в себе чотири елементи:

- Верхня ливникова система (К2.1),
- Нижня ливникова система (К2.2),
- Бічна ливникова система, встановлена по роз'єму (К2.3),
- Ярусна ливникова система (К2.4).

За такої класифікації будь яка стратегія (а), наприклад в разі опису технології на рис. 2.10–2.14, може бути представлена в такому вигляді:

$$a: T1.1-T2.2- T3.1-M1.2-K1.2-K2.3. \quad (3.1)$$

Це означає, що виливок, який проєктується, виготовляється з чавуну в разових піщаних формах, а в кожній формі знаходиться більше одного виливку. Форма виготовляється в двох опоках, ливникова система бічна з підведенням металу по роз'єму.

Подальша деталізація щодо визначення процедур конструкторсько-технологічної підготовки відбувається відповідно до схем етапів виготовлення виливка, які відображаються графічною ієрархічною схемою, принцип якої продемонстровано на рис. 2.9 та приклади для виливків наведені на рис. 3.1–3.5.

На рис. 3.12 представлено компоненти, що формують горизонтальний та вертикальний рівні стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки для виливків шатунно-поршневої групи.

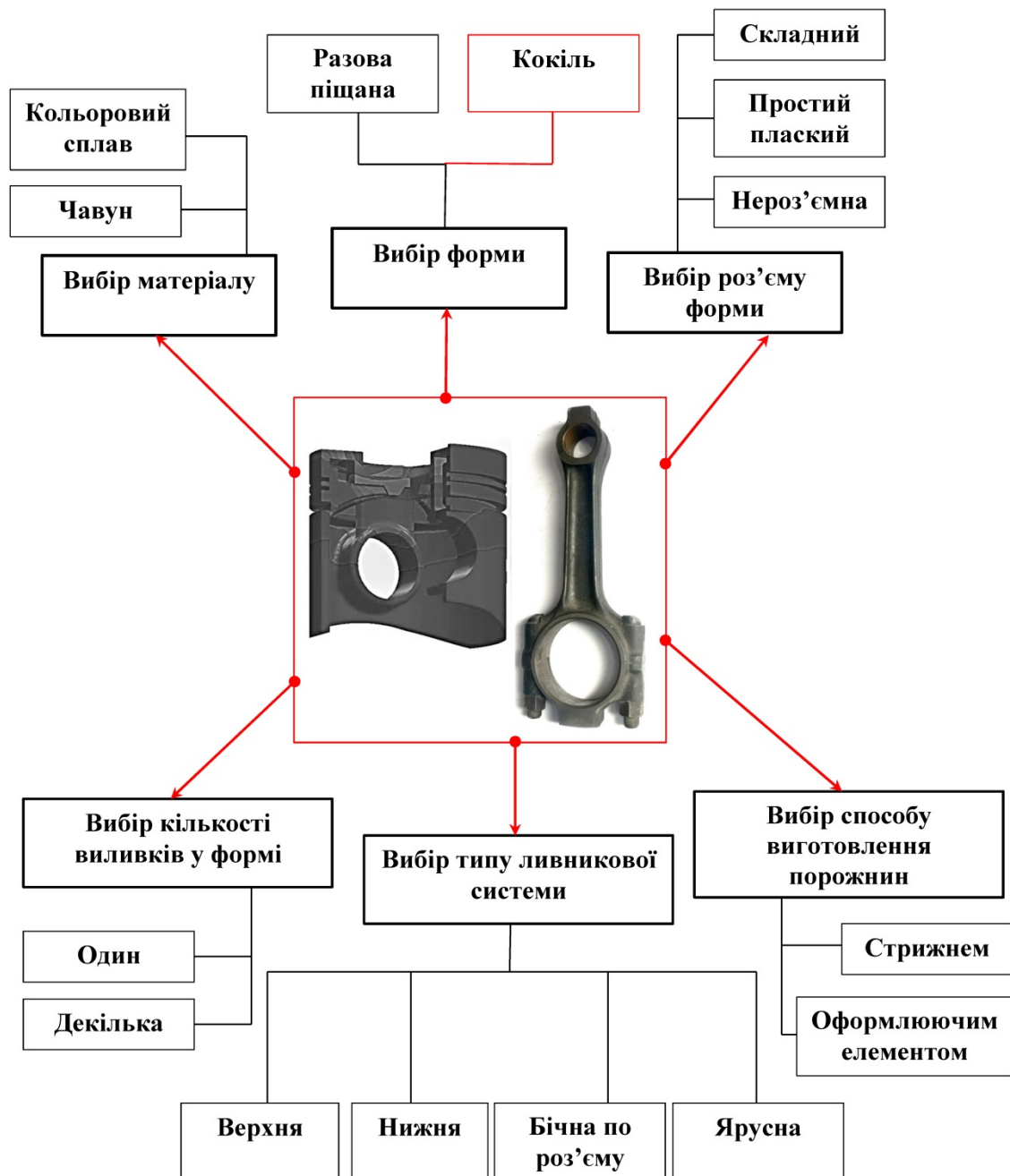


Рисунок 3.12 - Структурна схема компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки для виливків шатунно-поршневої групи

На рис. 3.12 червоним кольором позначено пріоритетне рішення відносно компоненти T1 для такого типу виливків. Загалом, відповідно до запропонованої класифікації, згідно рис. 3.12, складовими технології (T) є:

- вибір форми (T1),
- вибір кількості виливків у формі (T2),

- вибір способу виготовлення порожнин (Т3).

Тобто горизонтальний рівень для складової Т включає в себе три компоненти: Т1, Т2, Т3.

Компонента Т1 включає в себе два елементи:

- разова піщана (Т1.1),
- кокіль (Т1.2)

Компонента Т2 включає в себе два елементи:

- в формі знаходиться один виливок (Т2.1),
- в формі знаходиться декілька виливків (Т2.2).

Компонента Т3 включає в себе два елементи:

- порожнина у виливку виготовляється стрижнем (Т3.1),
- порожнина у виливку виготовляється оформлюючим елементом (Т3.2).

Складовими матеріалів (М) є вибір матеріалу (М1), ця компонента включає в себе два елементи:

- кольоровий сплав (М1.1)
- чавун (М1.2)

Складовими конструкції (К) є:

- Вибір розтину форми (К1),
- Вибір типу ливникової системи (К2).

Тобто горизонтальний рівень для складової К включає в себе два компоненти: К1, К2.

Компонента К1 включає в себе три елементи:

- Нероз'ємна (К1.1),
- Простий плаский роз'єм (К1.2)
- Складний роз'єм (К1.3)

Компонента К2 включає в себе чотири елементи:

- Верхня ливникова система (К2.1),
- Нижня ливникова система (К2.2),
- Бічна ливникова система, встановлена по роз'єму (К2.3),
- Ярусна ливникова система (К2.4).

За такої класифікації будь яка стратегія (*a*), наприклад в разі вибору пріоритетного рішення по компоненті T1, представленого на рис. 3.12, може бути записана в такому вигляді:

– в разі виготовлення поршня з алюмінієвого сплаву:

$$a: T1.2-T2.1-T3.2-M1.1-K1.2-K2.2, \quad (3.2)$$

– в разі виготовлення поршня з чавуну:

$$a: T1.2-T2.1-T3.2-M1.2-K1.2-K2.2, \quad (3.3)$$

Варіанти стратегій, представлених формулами (3.2) та (3.3), мають наступний текстовий опис: поршень виготовляється з кольорового сплаву, наприклад алюмінієвого (3.2), або чавуну (3.3) в кокіль, а в кожній формі знаходиться один виливок, порожнина у виливку виготовляється оформлюючим елементом. Кокіль роз'ємний з одним простим пласким роз'ємом, ливникова система нижня.

Приклад технічної реалізації стратегій розробки технології виливку та проєктування оснастки, представлених формулами (3.2), (3.3) показаний на рис. 2.3. В даному випадку оформлюючим елементом, що формує порожнину в поршні, є металевий стрижень, який встановлюється в кокіль та вилучається з готового виливку механізмом, що включає в себе важільну систему та пневмо- або гідропривод.

На рис. 3.13 представлено компоненти, що формують горизонтальний та вертикальний рівні стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки для корпусних виливків зі сталі, що мають схожі ознаки з конструкцією типу «шків», представлений на рис. 2.7.

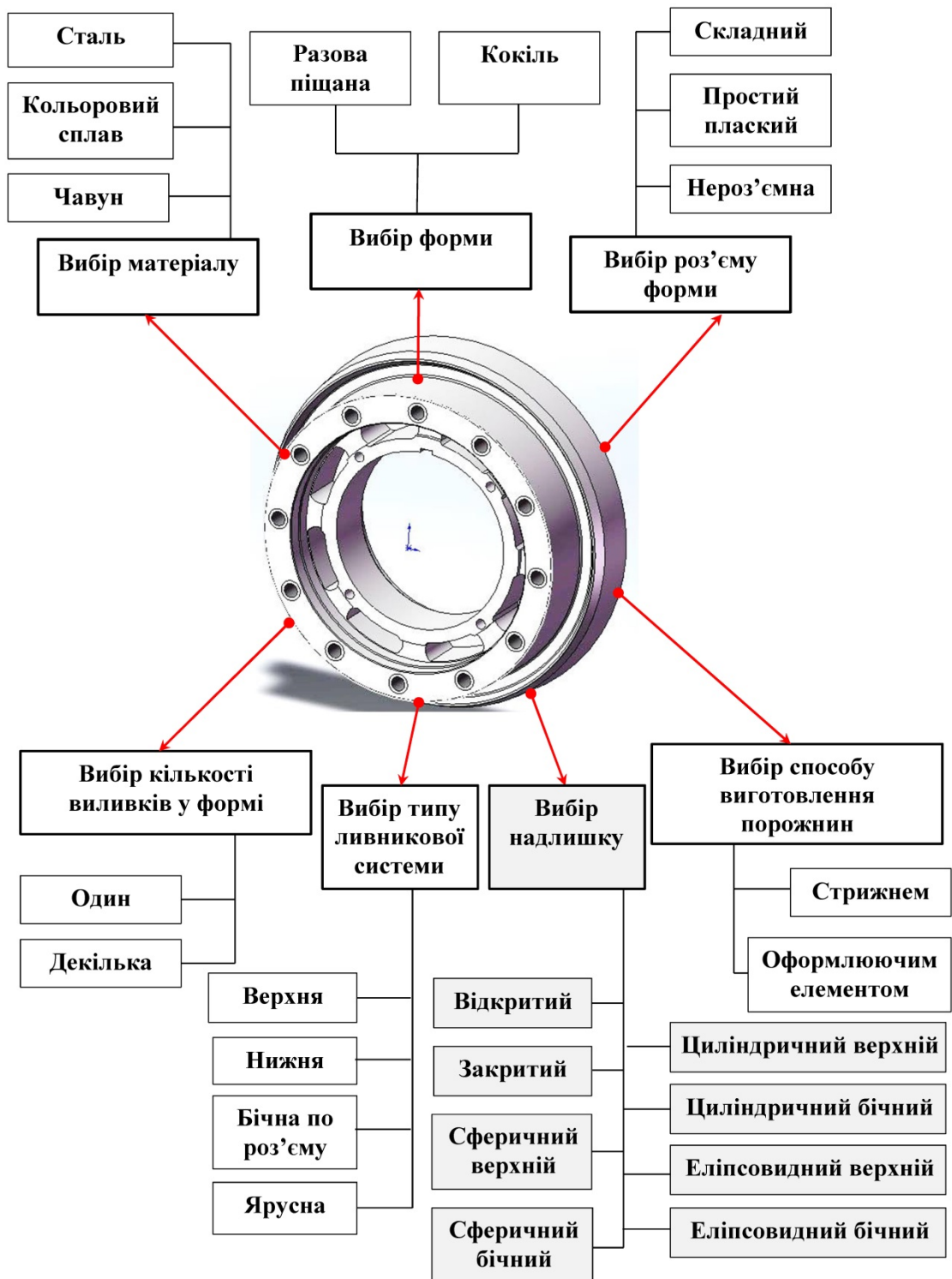


Рисунок 3.13 - Структурна схема компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки для корпусних виливків зі сталі, що мають схожі ознаки з конструкцією типу «шків»

На рис. 3.13 сірою заливкою позначена особливість розробки технології виливку та проєктування оснастки для виливків зі сталі, що полягає у необхідності

встановлення надлишків. Загалом, відповідно до запропонованої класифікації, згідно рис. 3.13, складовими технології (Т) є:

- вибір форми (Т1),
- вибір кількості виливків у формі (Т2),
- вибір способу виготовлення порожнин (Т3).

Тобто горизонтальний рівень для складової Т включає в себе три компоненти: Т1, Т2, Т3.

Компонента Т1 включає в себе два елементи:

- разова піщана (Т1.1),
- кокіль (Т1.2)

Компонента Т2 включає в себе два елементи:

- в формі знаходиться один виліток (Т2.1),
- в формі знаходиться декілька виливків (Т2.2).

Компонента Т3 включає в себе два елементи:

- порожнина у виливку виготовляється стрижнем (Т3.1),
- порожнина у виливку виготовляється оформлюючим елементом (Т3.2).

Складовими матеріалів (М) є вибір матеріалу (М1), ця компонента включає в себе два елементи:

- кольоровий сплав (М1.1)
- чавун (М1.2),
- сталь (М1.3).

Складовими конструкції (К) є:

- Вибір розтину форми (К1),
- Вибір типу ливникової системи (К2).

Тобто горизонтальний рівень для складової К включає в себе три компоненти: К1, К2, К3.

Компонента К1 включає в себе три елементи:

- Нероз'ємна (К1.1),
- Простий плоский роз'єм (К1.2)
- Складний роз'єм (К1.3)

Компонента К2 включає в себе чотири елементи:

- Верхня ливникова система (К2.1),
- Нижня ливникова система (К2.2),
- Бічна ливникова система, встановлена по роз'єму (К2.3),
- Ярусна ливникова система (К2.4).

Компонента К3 включає в себе вісім елементів:

- Надлишок відкритий (К3.1),
- Надлишок закритий (К3.2),
- Надлишок циліндричний верхній (К3.3),
- Надлишок циліндричний бічний (К3.4)
- Надлишок сферичний верхній (К3.5),
- Надлишок сферичний бічний (К3.6),
- Надлишок еліпсоподібний верхній (К3.7),
- Надлишок еліпсоподібний бічний (К3.8).

Прикладом реалізації технології виливку зі сталі, представленого на рис. 3.13, є рішення, представлене на рис. 3.14, а відповідна 3D-модель представлена на рис. 3.15 [114].

Відповідно до такого рішення, корпусний виливок, який має схожі ознаки з конструкцією типу «шків», та проєктується, виготовляється із сталі в разових піщаних формах, а в кожній формі знаходиться один виливок. Форма виготовляється в двох опоках, ливникова система бічна з підведенням металу по роз'єму. Конструкція модельної оснастки включає в себе циліндричний бічний надлишок.

Для такого варіанту технології стратегія *a* описується наступним чином:

$$a: T1.1-T2.1- T3.1-M1.3-K1.2-K2.3-K3.2-K3.3. \quad (3.4)$$

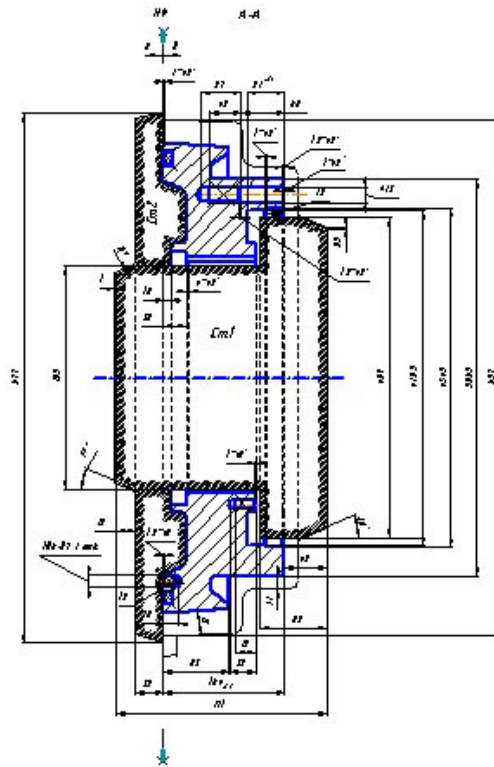


Рисунок 3.14 - Технологія корпусного виливку зі сталі, що має схожі ознаки з конструкцією типу «шків». Надлишок умовно не показаний

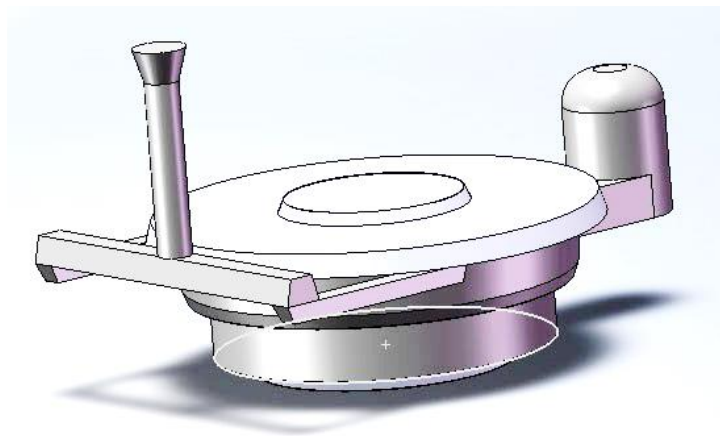


Рисунок 3.15 - 3D-модель виливку з ливниковою системою

Важливо відзначити, що кількість надлишків на запропонованій схемі (рис. 3.13) не фіксується, що пов'язано з особливостями розрахунку надлишків – їх кількість на об'єм кожного, або об'єм одного загального, має бути таким, щоб поглинути цілком усадкову раковину. Ці конструктивні рішення мають бути визначені на етапі проєктного розрахунку засобами комп'ютерного 3D-моделювання.

3.3 Приклад визначення оптимальної стратегії проєктування технології виливку на основі теорії статистичних ігор

Нехай обрано 3 варіанти стратегії відносно технології виливку:

$$a_1: T1.2-T2.1- T3.2-M2.1-K1.2-K2.2. \quad (3.5)$$

$$a_2: T1.2-T2.1- T3.2-M2.1-K1.2-K2.4. \quad (3.6)$$

$$a_3: T1.2-T2.2- T3.1-M2.1-K1.2-K2.4. \quad (3.7)$$

Принципова різниця між першим та другим варіантом полягає в способі підводу ливникової системи – в першому варіанті знизу, в другому – ярусним способом.

Принципова різниця між другим та третім варіантом полягає в способі виготовлення порожнини – в другому варіанті оформлюючими металевими елементами кокілю, в третьому – піщаним стрижнем.

Нехай також зовнішній стан v описуються наступним чином:

v_1 – цех має комплект обладнання повністю придатного для реалізації технологій за будь-яким з трьох варіантів стратегії,

v_1 – цех має комплект обладнання для реалізації технологій за будь-яким з трьох варіантів стратегії, але має стан фізичного чи морального зносу, що викликає ризики отримання неякісних виливків внаслідок реалізації технології.

Для вибору оптимальної змішаної стратегії по критерію мінімізації витрат $q_{ij} = L(v_i, a_j) \rightarrow \min$, складається матриця технологічної гри у формі, яка представлена в табл. 2.1.

Визначення витрат на реалізацію кожного варіанту технології за одного з двох варіантів зовнішніх умов відбувається відповідно до формул (2.7), (2.8). Нехай отримані дані мають вигляд, наведений в табл. 3.4

Таблиця 3.4 - Матриця технологічної гри для визначення оптимальної змішаної стратегії щодо технології виливку

Зовнішні умови	Варіанти стратегій		
	a_1	a_2	a_3
v_1	0.15	0.23	0.25
v_2	0.25	0.18	0.2

За таких даних рівняння (2.10) набуває для змішаної стратегії $\eta(a)$ вигляду двох рівнянь у формі (2.11):

$$\begin{aligned} L(v_1, \eta) &= 0.15\omega + 0.23(1 - \omega); \\ L(v_2, \eta) &= 0.25\omega + 0.18(1 - \omega). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Ці рівняння визначають змішану стратегію $\eta(a) = (\omega, 1 - \omega, 0)$ та відображається на графіку S-гри прямою $L(v_1, a_1) L(v_2, a_1) - L(v_1, a_2); L(v_2, a_2)$ (рис. 3.16).

Спрощення рівняння (3.8) приводить до наступного рівняння цієї змішаної стратегії:

$$\begin{aligned} L(v_1, \eta) &= 0.23 - 0.08\omega; \\ L(v_2, \eta) &= 0.18 + 0.07\omega. \end{aligned} \quad (3.9)$$

За даних, наведених в табл. 3.4, рівняння (2.10) набуває для змішаної стратегії $\eta(a)$ вигляду двох рівнянь у формі (2.11):

$$\begin{aligned} L(v_1, \eta) &= 0.23\omega + 0.25(1 - \omega); \\ L(v_2, \eta) &= 0.18\omega + 0.2(1 - \omega). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Це рівняння визначає змішану стратегію $\eta(a) = (0, \omega, 1 - \omega)$ та відображається на графіку S-гри прямою $L(v_1, a_2); L(v_2, a_2) - L(v_1, a_3); L(v_2, a_3)$ (рис. 3.16).

Спрощення рівняння (3.10) приводить до наступного рівняння цієї змішаної стратегії:

$$\begin{aligned} L(v_1, \eta) &= 0.25 - 0.02\omega; \\ L(v_2, \eta) &= 0.2 - 0.02\omega. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Змішану стратегію $L(v_1, a_1) L(v_2, a_1) - L(v_1, a_3); L(v_2, a_3)$ можна не визначати, бо вона не відповідає умові (2.7) – відповідна пряма на рис. 3.16 знаходиться вище.

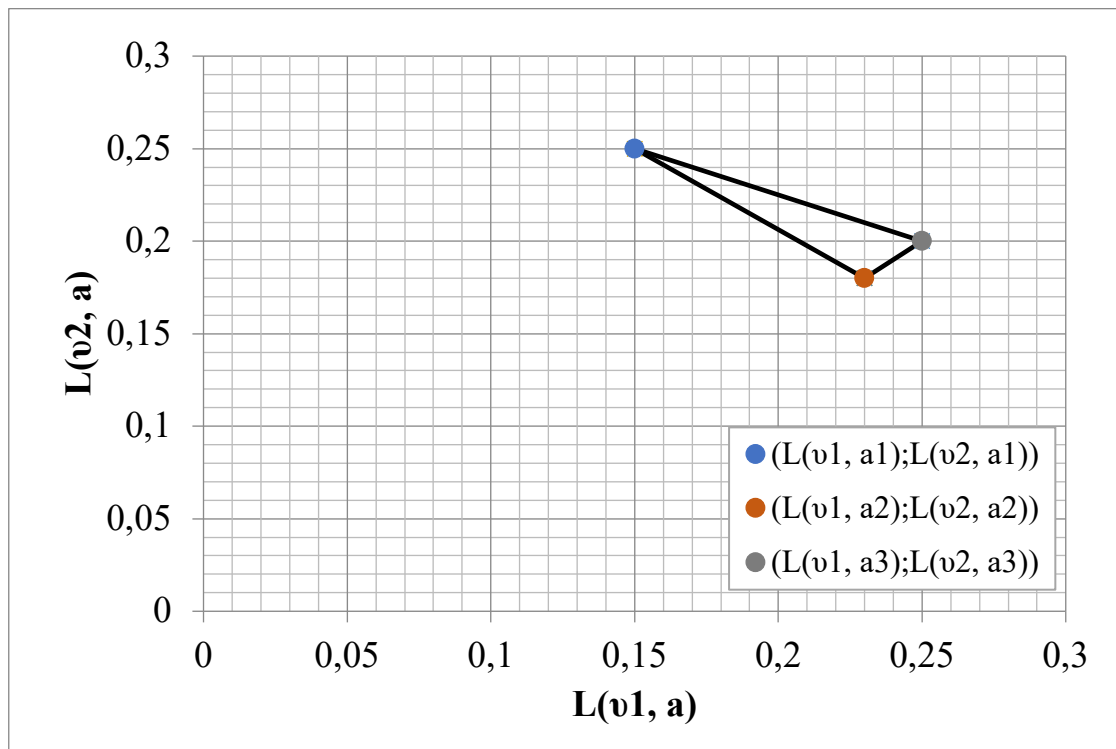


Рисунок 3.16 - Графічне відображення S-гри для вибору допустимих стратегій відносно технології виливку

З отриманих результатів випливає, що оптимальна змішана стратегія має шукатися на основі рівнянь (3.9) та (3.11), тобто для $L(v_1, a_1)L(v_2, a_1) - L(v_1, a_2)L(v_2, a_2)$ та $L(v_1, a_2)L(v_2, a_2) - L(v_1, a_3)L(v_2, a_3)$.

Для цього треба скористатися основі принципом мінімаксу (2.9).

На рис. 3.17 представлено графічне рішення вибору оптимальної змішаної стратегії за принципом мінімаксу для відрізка $L(v_1, a_1)L(v_2, a_1) - L(v_1, a_2)L(v_2, a_2)$.

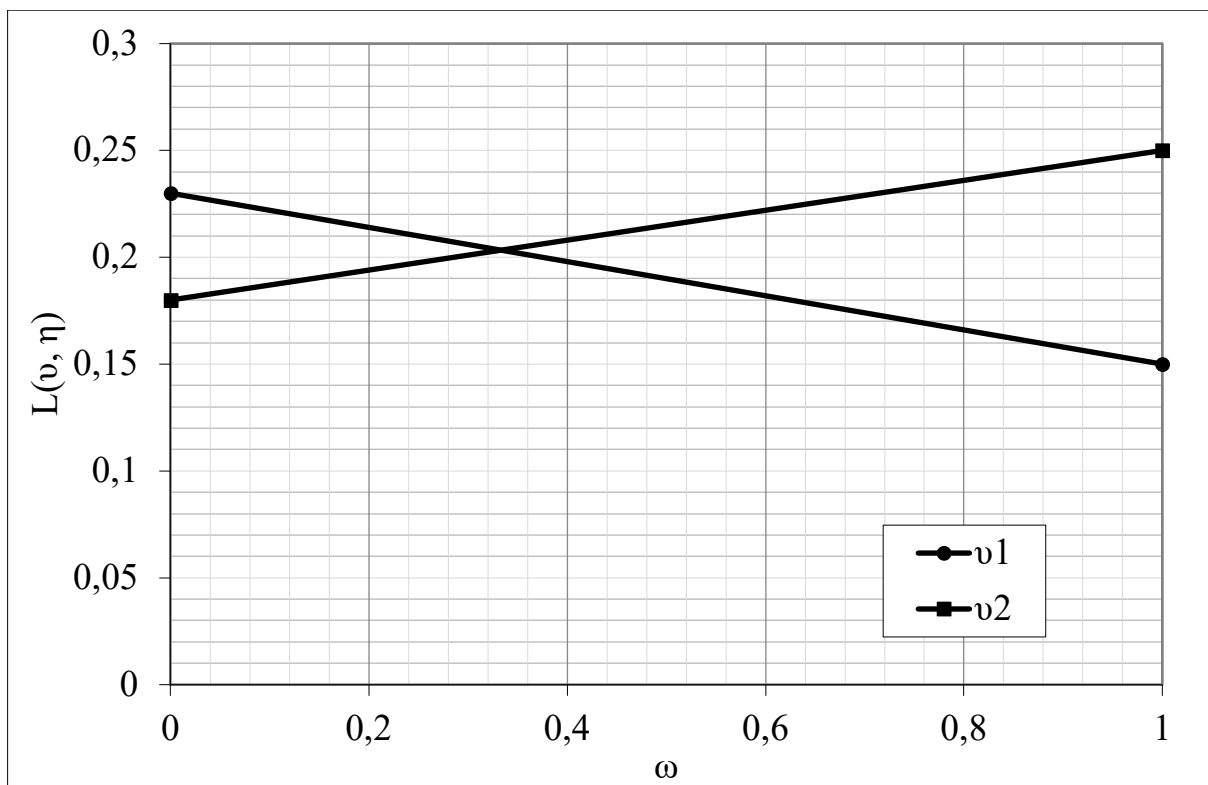


Рисунок 3.18 - Визначення оптимальної стратегії за принципом мінімаксу для відрізка $L(v_1, a_1)L(v_2, a_1) - L(v_1, a_2)L(v_2, a_2)$

На рис 3.18 представлено графічне рішення вибору оптимальної змішаної стратегії за принципом мінімаксу для відрізка $L(v_1, a_2)L(v_2, a_2) - L(v_1, a_3)L(v_2, a_3)$.

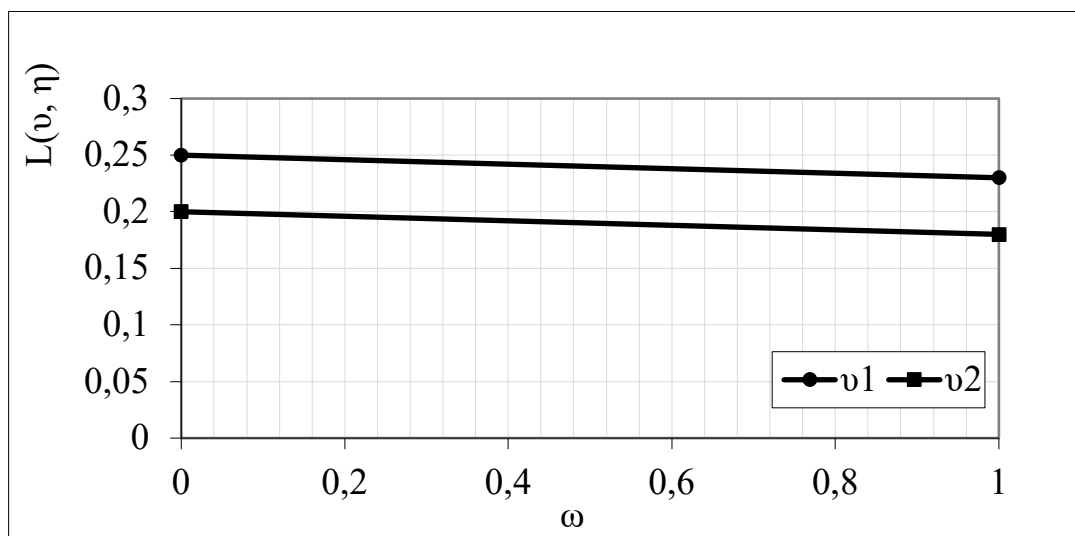


Рисунок 3.18 - Визначення оптимальної стратегії за принципом мінімаксу для відрізка $L(v_1, a_2)L(v_2, a_2) - L(v_1, a_3)L(v_2, a_3)$

З рис. 3.17 видно, що умова мінімаксу (2.9) забезпечується на перетині прямих в рівнянні (3.9), тобто за значення $\omega = 0.34$, яке забезпечує величину витрат $L(v, \eta) = 0.2$. Це визначає змішану стратегію $\eta(a) = (0.34, 0.66, 0)$

З рис. 3.18 видно, що умова мінімаксу (2.9) забезпечується на правому краї верхньої прямої в рівнянні (3.11), тобто за значення $\omega = 1$, яке забезпечує величину витрат $L(v, \eta) = 0.23$. Це визначає змішану стратегію $\eta(a) = (0, 1, 0)$

На основі цих результатів робиться висновок, що оптимальною є змішана стратегія $\eta(a) = (0.34, 0.66, 0)$, яка забезпечує, згідно принципу мінімаксу (2.9), мінімальну величину витрат $L(v, \eta) = 0.2$. Таким чином, з ймовірністю 66% краще використовувати стратегію a_2 , що задається формулою (3.6).

Фактор невизначеності у заданні зовнішніх умов може полягати в тому, що успішна реалізація технології, яка втілюється в конкретні конструкторські рішення та виготовлення оснастки, можлива лише з певною ймовірністю. В такому випадку зовнішні умови можуть бути описані наступним чином:

v_1 – цех має комплект обладнання повністю придатного для реалізації технологій за будь-яким з трьох варіантів стратегії, але це може бути визначено лише з певним ступенем ймовірності.

v_1 – цех має комплект обладнання для реалізації технологій за будь-яким з трьох варіантів стратегії, але має стан фізичного чи морального зносу, що викликає ризики отримання неякісних виливків внаслідок реалізації технології, що визначається з певним ступенем ймовірності.

Це означає, що існує апіорний розподіл ймовірності $\xi(v)$, з яким можна стверджувати, що виготовлення оснастки буде якісним.

За такого опису найкращою буде стратегія, що задовольняє умові $L(\xi, \eta^*) = L(\xi, \eta) \rightarrow \min$, де величина витрат за кожної обраної стратегії для кожного зовнішнього стану визначається формулою (2.5).

Нехай отримані дані мають вигляд, наведений в табл. 3.4, але з певними значеннями ймовірностей $\xi(v)$ (табл. 3.5)

Таблиця 3.5 - Матриця технологічної гри для визначення оптимальної змішаної стратегії щодо технології виливку в разі невизначеності зовнішніх умов

Зовнішні умови	Апріорний розподіл ймовірності	Варіанти стратегій		
		a_1	a_2	a_3
v_1	0.7	0.15	0.23	0.25
v_2	0.3	0.25	0.18	0.2

За таких даних усереднені сумарні витрати відповідно до формули (2.5) для відрізка $L(v_1, a_1)L(v_2, a_1) - L(v_1, a_2)L(v_2, a_2)$ складуть

$$L(\xi, \eta) = 0.7(0.23 - 0.08\omega) + 0.3(0.18 + 0.07\omega). \quad (3.12)$$

Відповідно усереднені сумарні витрати для відрізка $L(v_1, a_2)L(v_2, a_2) - L(v_1, a_3)L(v_2, a_3)$ складуть

$$L(\xi, \eta) = 0.7(0.25 - 0.02\omega) + 0.3(0.2 - 0.02\omega). \quad (3.13)$$

Спрощення рівняння (3.12) призводить до наступної формули визначення витрат:

$$L(\xi, \eta) = 0.215 - 0.035\omega. \quad (3.14)$$

Спрощення рівняння (3.13) призводить до наступної формули визначення витрат:

$$L(\xi, \eta) = 0.235 - 0.02\omega. \quad (3.15)$$

Аналіз рівняння (3.14) показує, що умова $L(\xi, \eta^*) = L(\xi, \eta) \rightarrow \min$ досягається за $\omega = 1$ і становить $L(\xi, \eta^*) = 0.18$. Таким чином, оптимальною є змішана стратегія $\eta(a) = (\omega, 1 - \omega, 0) = (1, 0, 0)$.

Аналіз рівняння (3.15) показує, що умова $L(\xi, \eta^*) = L(\xi, \eta) \rightarrow \min$ досягається за $\omega = 1$ і становить $L(\xi, \eta^*) = 0.215$. Таким чином, оптимальною є змішана стратегія $\eta(a) = (0, 1, 0)$.

Це означає, що за будь якого зовнішнього стану витрати не перевищать 0.215, якщо використовувати стратегію a_1 або a_2 , тобто можна використовувати чисті стратегії a_1 або a_2 , які за обраних ймовірностей стану $\xi(v)$, наведених в таблиці 3.5, є рівнозначними. Якщо значення ймовірностей стану будуть іншими, то будуть іншими й оптимальні стратегії, але вони обов'язково будуть чистими стратегіями.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Формалізована задача визначення типу виробництва, який є в числі вхідних даних для проєктування технології виливків, що особливо важливим є для корпусних виливків, зважаючи на їх масо-габаритні характеристики. Ця формалізація заснована на побудові схеми етапів виготовлення виливку та використанні лінійних трендів прогнозу відповідно до MRP-планування.

2. На прикладі п'яти виливків різних масо-габаритних характеристик з різних сплавів визначена загальна потреба у виливках на річну програму та, відповідно, тип виробництва по них – для двох виливків це масове виробництва, для трьох – серійне. Це пояснене кількістю виливків відповідної номенклатури, стабільністю запитів на них та динамікою по запитах в умовах невизначеності стосовно плану виробництва, що формує запит на проєктування технології виливків.

3. Запропоновано принцип класифікації складових, що формують стратегію розробки технології виливку та проєктування оснастки. Вони узагальнено представляються у вигляді трьох компонентів із введенням відповідних позначень: складова технології, складова матеріалів, складова конструкції. При цьому для

ідентифікації елементу стратегії на горизонтальному рівні такої класифікації, тобто на рівні однієї складової, може бути використано цифрове позначення, а для ідентифікації елементу стратегії всередині такої класифікації на вертикальному рівні може бути використано подвійне цифрове позначення, де перша цифра ідентифікує компоненту, а друга – елемент всередині компоненти. Таким чином, визначено, що кожна стратегія розробки технології виливку та проєктування оснастки може бути представлена на основі формального опису, який базується на класифікації, що включає в себе горизонтальний та вертикальний компонентні рівні.

4. На прикладі корпусних виливків продемонстровано реалізацію принципу класифікації та формування формального опису для визначення стратегії раціонального конструкторсько-технологічного проєктування. Зокрема розроблено структурну схему компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки для виливків «Корпус ДВЗ», виливків шатунно-поршневої групи та корпусних виливків зі сталі, що мають схожі ознаки з конструкцією типу «шків».

5. На основі структурних схем компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки промодельовані 3 варіанти стратегії вибору технології виливку. Принципова різниця між обраними варіантами – в способі підводу ливникової системи – або знизу, або ярусним способом, а також в способі виготовлення порожнини у виливку – або оформлюючими металевими елементами кокіля, або піщаним стрижнем. Відповідно цьому побудована матриця технологічної гри для визначення оптимальної змішаної стратегії щодо технології виливку та продемонстровано на основі принципу мінімаксу визначення оптимальної стратегії.

6. Інтерпретовано фактор невизначеності у заданні зовнішніх умов – він може полягати в тому, що успішна реалізація технології, яка втілюється в конкретні конструкторські рішення та виготовлення оснастки, можлива лише з певною ймовірністю. В цьому разі зовнішні умови можуть бути описані наступним чином: цех має комплект обладнання повністю придатного для реалізації технологій за

будь-яким з трьох варіантів стратегії, але це може бути визначено лише з певним ступенем ймовірності, або цех має комплект обладнання для реалізації технологій за будь-яким з трьох варіантів стратегії, але має стан фізичного чи морального зносу, що викликає ризики отримання неякісних виливків внаслідок реалізації технології, що визначається з певним ступенем ймовірності. Це означає, що існує апріорний розподіл ймовірності, з яким можна стверджувати, що виготовлення оснастки буде якісним. За такого опису продемонстровано вибір найкращої стратегії, який базується на мінімізації середніх витрат при виборі будь-якої стратегії конструкторсько-технологічного проектування виливку.

РОЗДІЛ 4 КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОРПУСНИХ ВИЛИВКІВ

4.1 Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусу блок-картеру ДВЗ з алюмінієвого сплаву

Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусних виливків реалізує блоки «Розробка технології виливку» та «Проектування оснастки» в схемі конструкторсько-технологічного проєктування виливків на основі зворотних зв'язків, представлених на рис. 2.1. Метою є визначення на етапі розробки технології можливих проблемних місць задля запобігання виникнення дефектів у виливках, яке прямо впливає на величину витрат $q_{ij} = L(v_i, a_j)$ при визначенні оптимальної стратегії проєктування. Кінцевим варіантом такого проєктування є визначення раціональної конструкції оснастки, яка мінімізує можливий брак виливків по ключових вимогах, представлених на рис. 2.2, 2.5–2.7 диференційовано по типу виливків.

Для складних корпусних виливків це особливо важливо, бо вплив багатьох факторів в процесі формування виливку невідмінно підвищує ризик формування у виливках дефектів різної природи. Прикладом таких складних корпусних виливків є корпус блок-картеру ДВЗ.

Відповідно до вимог, які формуються на основі експлуатаційних характеристик транспортного засобу або енергетичної установки, які мають бути, такі виливки виготовляються або з кольорових сплавів, або з чавуну. Перший варіант має ті переваги, що дозволяє зменшити масо-габаритні характеристики двигуна, що позитивно впливає та динамічні характеристики транспортного засобу. Натомість литий корпус ДВЗ з чавуну має більші механічні властивості.

На рис. 4.1 представлено литий блок-картер дизеля 4ДТНА1.

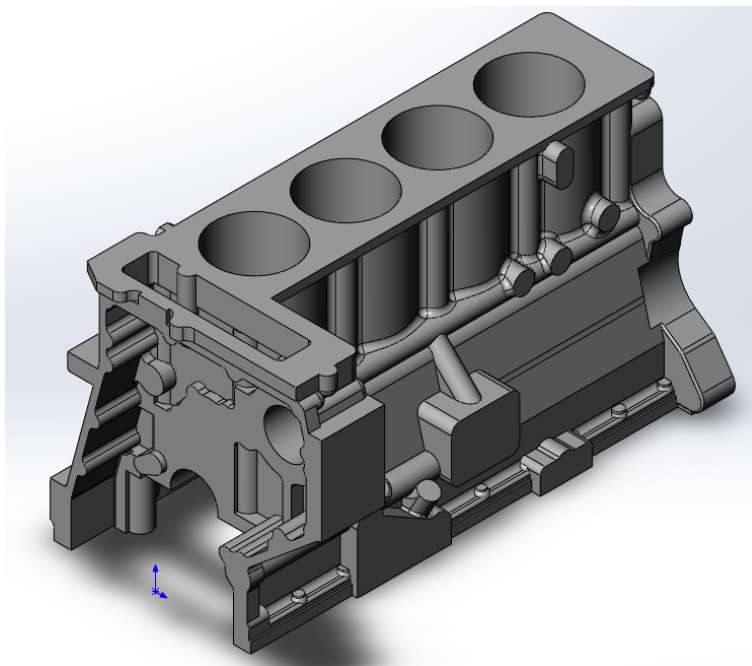


Рисунок 4.1 - Литий блок-картер дизеля 4ДТНА1

Створений в ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування» автомобільний дизель 4ДТНА1 є унікальним продуктом науково-технічних потужностей Харківського регіону в сучасній Україні.



Рисунок 4.2 - Стенд для дослідницьких та приймально-здавальних випробувань дизелів серії ДТНА

В якості стратегії технології виливку обрано стратегію (3.5).

В інформаційно-комп'ютерної системи (ІКС) SolidWorks була створена 3D-модель виливка блок-картера з технологічною ливниково-живильною системою (рис. 4.3).

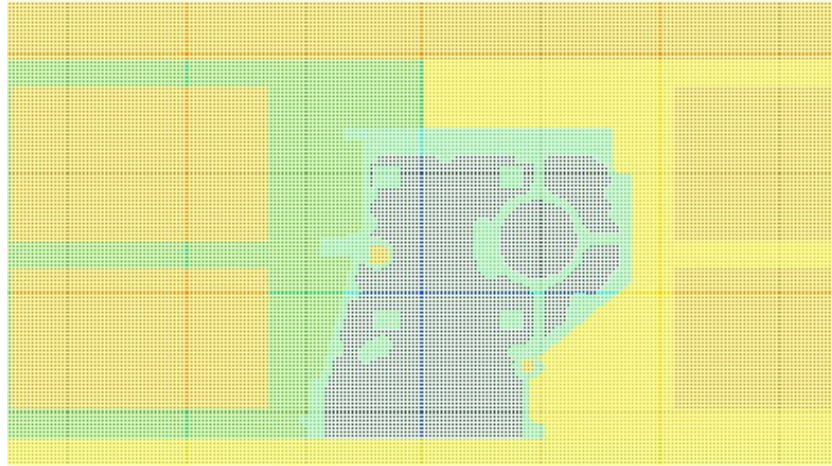


Рисунок 4.3 - Скінчено-об'ємна модель виливка в кокоті з відображеними осередками.

З використанням модуля 3D-імпорту, вбудованого в ІКС NovaFlow, модель блок-картера з ливарно-живильною системою, а також моделлю і кокотем можна конвертувати в звичайно-об'ємну модель.

Оптимальні параметри осередків, виходячи з вимог час розрахунку—адекватність результатів:

- розмір осередку – 3,7 мм;
- кількість осередків – 7 672 320 шт.

Граничні умови та вихідні дані для моделювання задавалися відповідно до наступної послідовності:

- 3D-імпорт (конвертування файлу у формат *.stl) та створення скінчено-різницевої моделі;
- призначення матеріалу для виливки та технологічного оснащення, а також розділового покриття, що наноситься на поверхні оснастки;

- призначення початкової температури розплаву та технологічного оснащення, її охолодження різними теплоносіями;
- призначення загального часу циклу виробництва одного виливка.

Призначення граничних умов для матеріалу елементів виливку і технологічної оснастки проводився шляхом розбиття збірки на окремі частини, кожній з яких надається свій колір:

- матеріал виливки блок-картера – АК5М ДСТУ 2839-94;
- матеріал технологічної оснастки – Сталь 45, СЧ200 ДСТУ 8833:2019.
- на формотворчих частинах кокілью нанесена кокільна фарба товщиною 0,2 мм, яка має теплопровідність $\lambda = 0,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Для запобігання попадання вологи на формоутворювальну поверхню і високою різниці температур при заливці розплавом, технологічне оснащення попередньо прогрівається до $t=250\div 280^\circ\text{C}$.

Температура розплаву перед заливкою в форму становила $T = 710^\circ\text{C}$.

Аналіз динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються останніми, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру.

Остаточний висновок будується виходячи з аналізу результатів розташування дефектів, виражених в ІКС NovaFlow критерієм Niyama. Цей критерій призначений для визначення місць розташування газоусадкових дефектів і їх величини, для передбачення мікропористості і газоусадкової пористості, досить великою для виявлення її методом радіографічного тестування. Таким чином, критерій Niyama є надійним провісником пористості для простих відливок, але в разі виливків зі складною геометрією його використання вимагає більш ретельного аналізу результатів моделювання, оскільки багато чинників впливають на утворення газоусадкової пористості.

Отримані результати дослідження та моделювання гідродинамічних процесів заливки та кристалізації виливку блок-картера циліндрів автомобільного дизеля 4ДТНА1 з використанням інженерного моделювання представлені графічно на рис. 4.4–4.6.

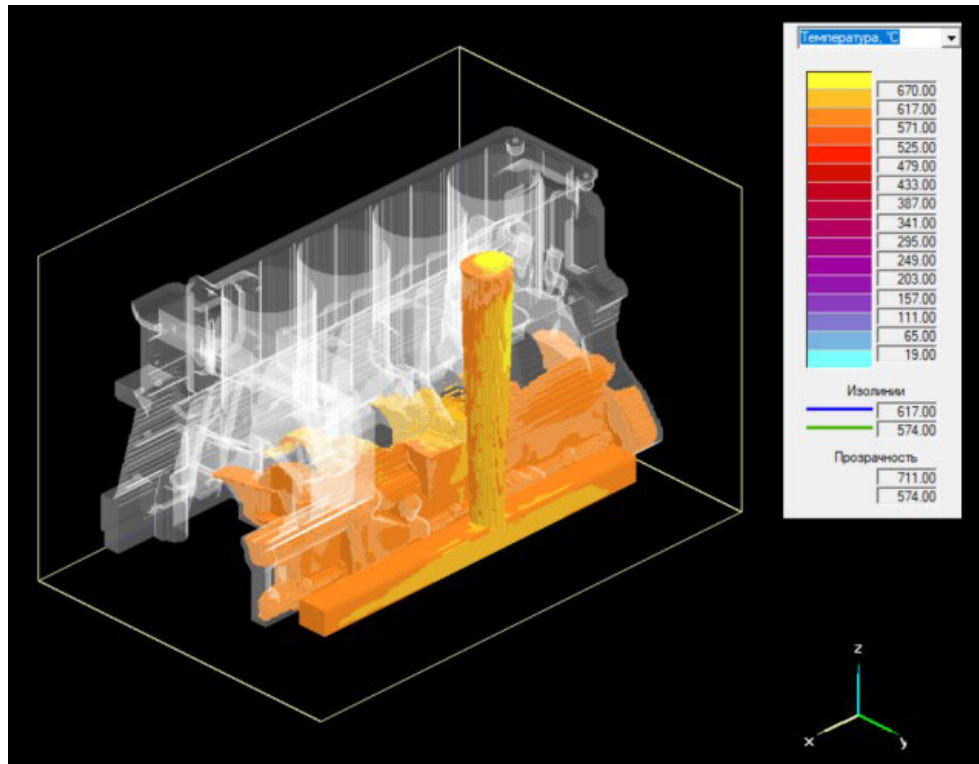


Рисунок 4.4 - Розподіл температур на стадії заливки 25 %

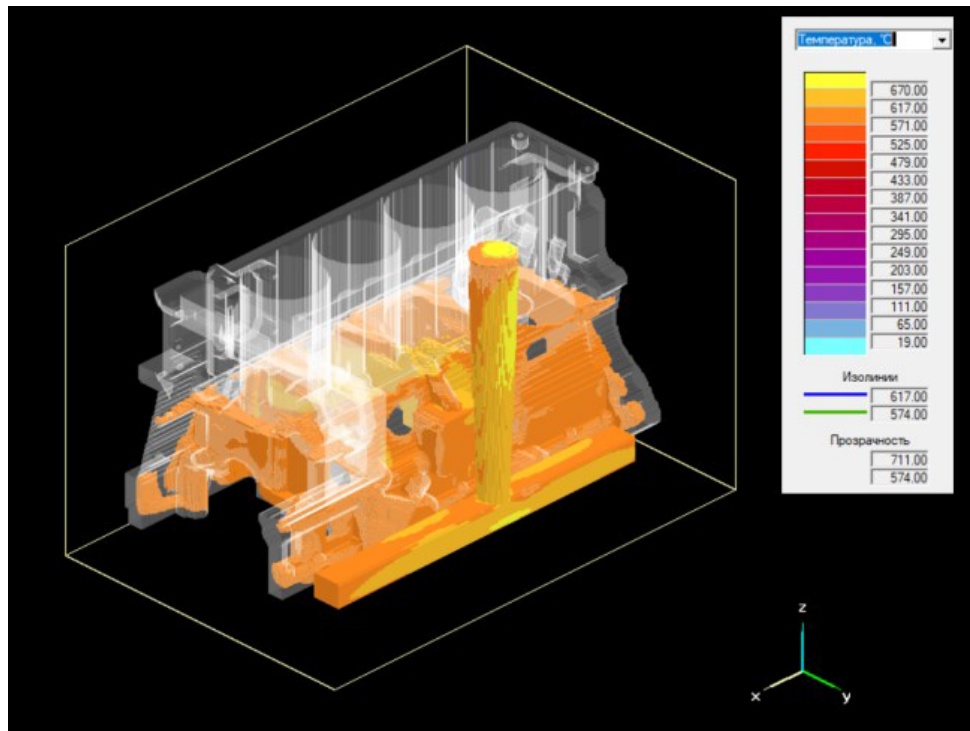


Рисунок. 4.5 - Розподіл температур на стадії заливки 50%

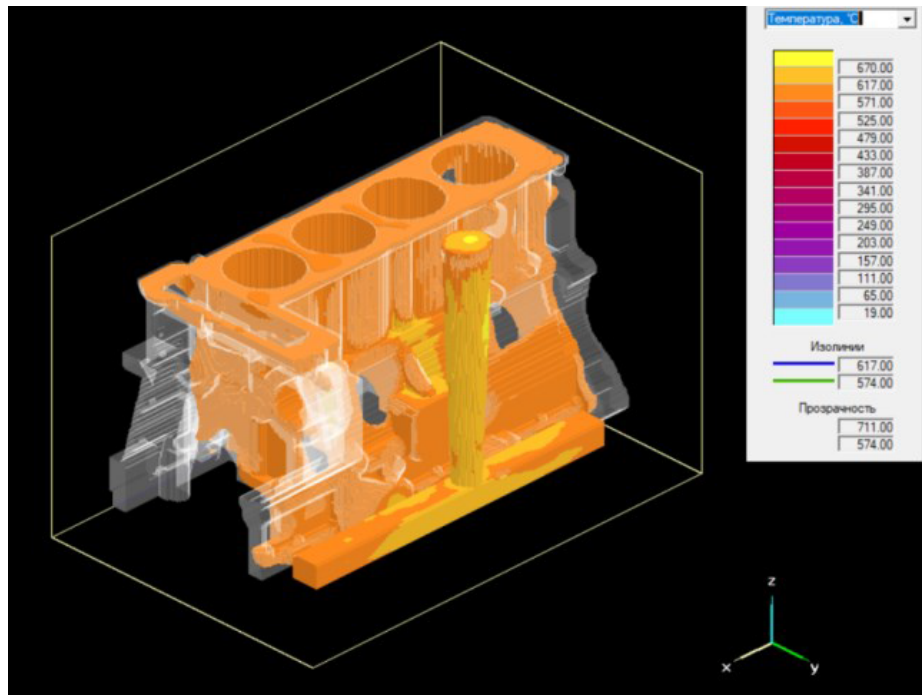


Рисунок. 4.6 - Розподіл температур на стадії заливки 100%

За результатами інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття блок-картера виявлено, що дефекти газоусадкового характеру можуть бути концентраторами напружень в конструктивних елементах деталі, а тому можуть вплинути на характеристики міцності в процесі експлуатації.

Аналіз місць розташування дефектів показав, що найбільш схильні до усадочних явищ:

- кромки порожнин циліндрів;
- верхня площина в передній частині блоку, в місцях кріплень під головку;
- масиви бобишок з боків блоку.

Результати моделювання формування дефектів у виливку дозволяють зробити прогноз, що його брак за обраного варіанту технології відповідно до стратегії (3.5) може становити 5–6 %.

Для подальшого відпрацювання технології виливку обрано стратегію (3.6) та в ІКС SolidWorks була створена 3D-модель виливка блок-картера з ярусною ливниково-живильною системою (рис. 4.7).

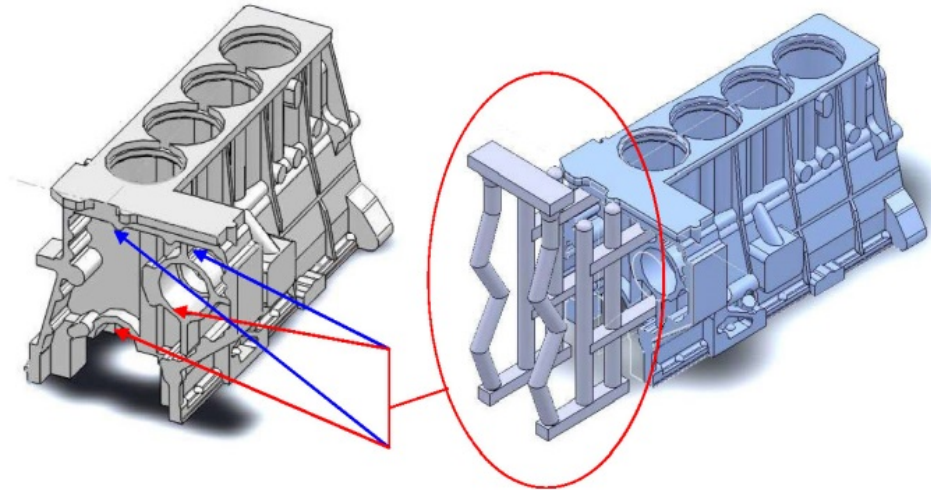


Рисунок 4.7 - 3D-модель виливка блок-картера з ярусною ливниково-живильною системою

Вихідні параметри задавалися ідентичними. Імовірність формування залишкових напруг закладається ще на етапі заповнення форми розплавом та головних причин тут дві: гальмування усадки з боку ливарної форми та нерівномірне відведення тепла від різних частин форми, що може виражатися також у порушенні принципів спрямованої кристалізації. Загальний вид заповнення форми розплавом показано на рис. 4.8.

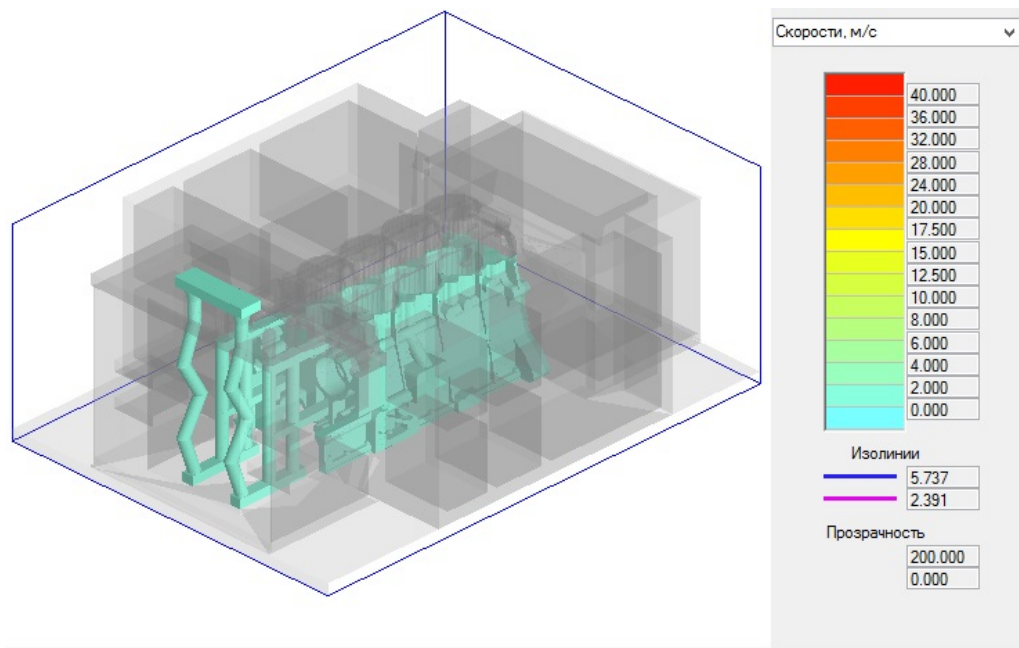


Рисунок 4.8 - Загальний вид заповнення форми розплавом

Аналіз динаміки охолодження виливка, фазового переходу, зв'язаності зон, що кристалізуються останніми, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газо-усадкового характеру.

Результат моделювання показав, що швидкість руху розплаву при обраному технічному рішенні з оформлення кокілю в процесі заповнення форми в окремо взятих частинах не досягала критичних значень $V_{кр} < 0,8$ м/с. Дані результати моделювання дають можливість зрозуміти, що рух розплаву у формі можна вважати таким, що задовольняє наступним вимогам: проходячи через елементи ливникової системи, розплав не набуває турбулентного характеру руху та заповнення форми відбувається без перевищення критичних швидкостей (рис. 4.9).

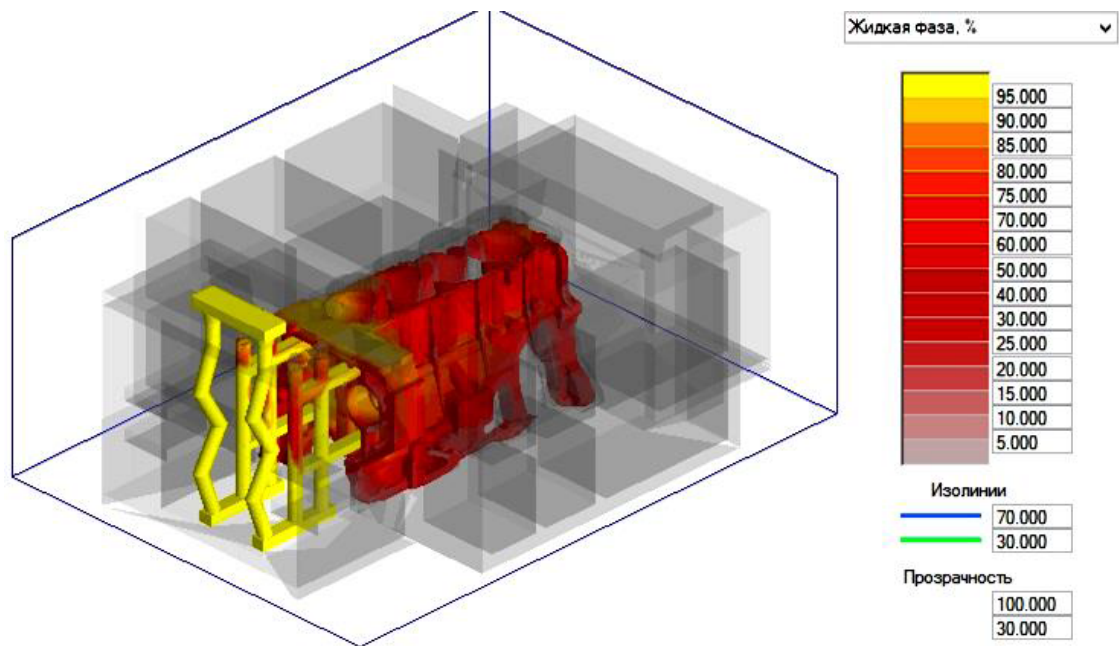


Рисунок 4.9 - Перехід з рідкої у тверду фазу в процесі охолодження деталі в кокілі

При такому фактичному заповненні форми розподіл за обсягом виливки газо-усадкової пористості відповідає наведеному на рис. 4.10.

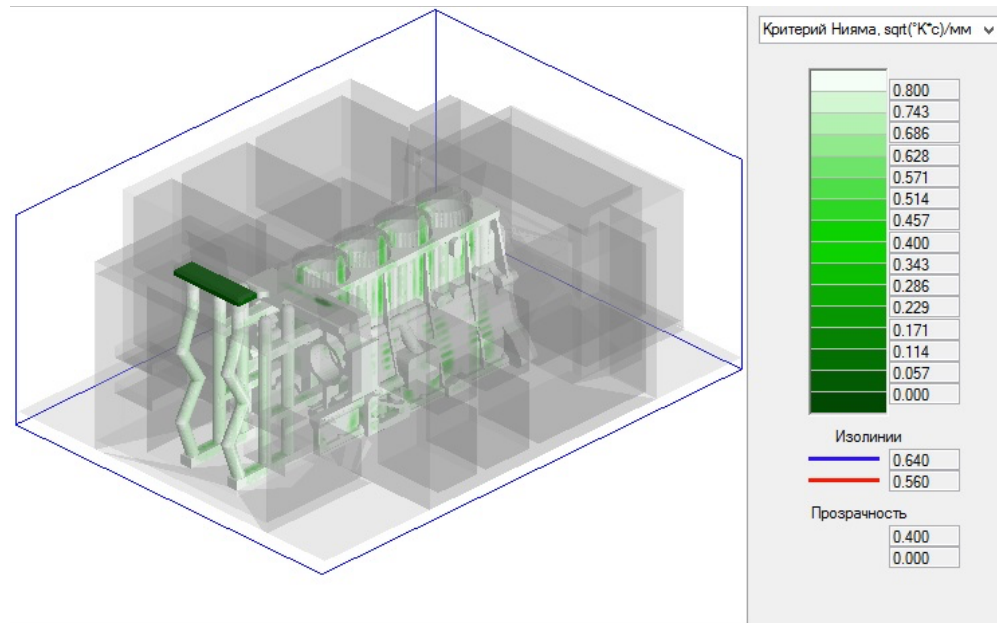


Рисунок 4.10 - Місця розташування дефектів газоусадкового характеру згідно з критерієм Niyama

Візуалізація процесів формування дефектів у виливку блок-картера у вигляді двомірної 2D-проекції наведена на рис. 4.11.

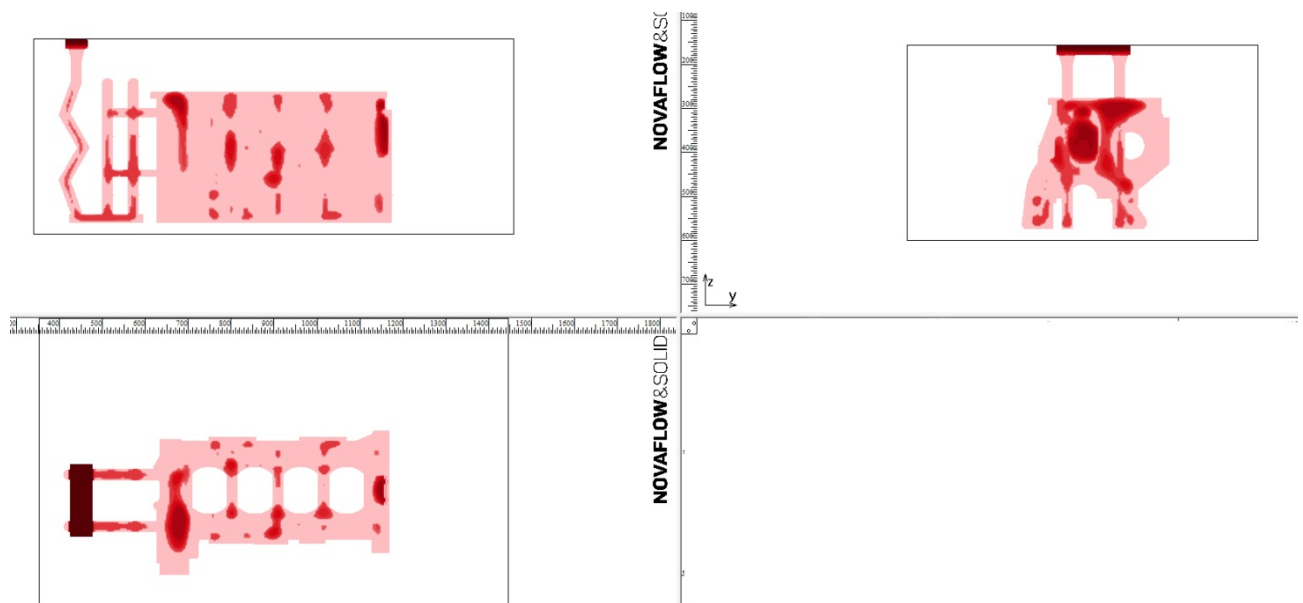


Рисунок 4.11 - Візуалізація процесів формування дефектів у 2D-проекції

На рис. 4.12 показано формування дефектів у виливку блок-картера у вигляді тримірної 3D-моделі.

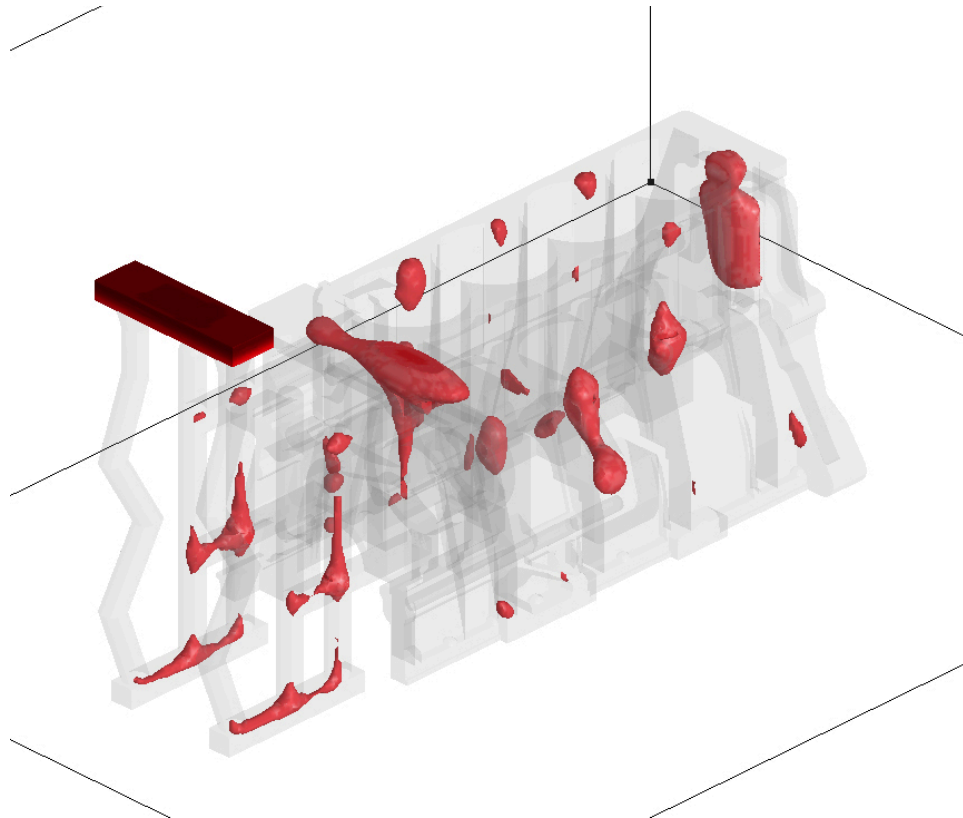


Рисунок 4.12 - Візуалізація процесів формування дефектів у 3D-моделі

Аналіз місць розташування дефектів показав, що найбільш схильними до усадкових явищ є:

- крайки порожнин циліндрів;
- верхня площина у передній частині блоку, у місцях кріплень під головку;
- масиви бобишок з боків блоку.

Знайдені дефекти дозволяють стверджувати, що брак литого виробу може становити 5–6%..

З результатів інженерного моделювання теплових і гідродинамічних процесів лиття блок-картера впливає, що дефекти газо-усадочного характеру можуть бути концентраторами напруг в конструктивних елементах деталі, а значить можуть вплинути на характеристики міцності в процесі експлуатації. Відповідно, перевищення норми браку завищує витрати

$$q_{ij} = L(v_i, a_j).$$

4.2 Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусу блок-картеру ДВЗ з чавуну

Виготовлення корпусу блок-картеру ДВЗ з чавуну стикається з проблемою регулювання структуроутворення. Це пов'язано з тим, що за високих швидкостей охолодження формування мікроструктури буде йти по метастабільній схемі. Це призведе до формування відбілу, що буде браком виливку, який потребує подальшої термічної обробки, спрямованих на розпад цементиту. В негативному сценарії це може бути браком виливку, який, як і попередньому варіанті, призведе до підвищення величини $q_{ij} = L(v_i, a_j)$.

Проблема ускладняється тим, що в процесі охолодження формуються градієнти температур, бо товщини стінок виливку різні, масивні частини конструкції виливку стикаються з менш масивними, відбувається гальмування усадки з боку конструктивних елементів стрижнів. При виготовленні литого корпусу блок-картеру величини відносної деформації можуть становити $\varepsilon = (-41 \cdot 10^{-5}) - (-81 \cdot 10^{-5})$ МПа. Найбільше гальмування усадки створюється з боку стрижнів, тому раціональним конструкторським рішенням є цілеспрямована зміна конструкції стрижня та стрижневих знаків. Для підтвердження істотного впливу даного конструкторсько-технологічного рішення виконувались промислові випробування – у дослідній партії, виготовленій із змінами технології виготовлення стрижнів, величина відносної деформації склала $\varepsilon = (-45 \cdot 10^{-5}) - (-107 \cdot 10^{-5})$ МПа. У комбінації з подальшою технологією відпалу ця величина змінюється ще значно, при цьому величина залишкових напруг мінімізується.

Аналіз місць розташування дефектів та його зіставлення з місцем підведення металу показав, що найбільш схильні до усадкових явищ зони, розташовані в центральній частині литого блок-картера. Саме в цих місцях у процесі фазового переходу формується найбільше гальмування усадки з боку стрижнів. Дефекти такої природи є концентраторами напруг у конструктивних елементах литої деталі, а, отже, можуть вплинути на характеристики міцності в процесі експлуатації. При

цьому результати комп'ютерного моделювання теплових та гідродинамічних процесів лиття можуть бути використані для формування граничних та початкових умов у процесі моделювання напружено-деформованого стану блок-картера. Наявність такого роду дефектів призводить до того, що реальна частка браку литого блоку-картера може підвищуватися. Ця величина може бути оцінена за ймовірністю утворення усадкової пористості в критичних місцях конструкції (рис. 4.13).

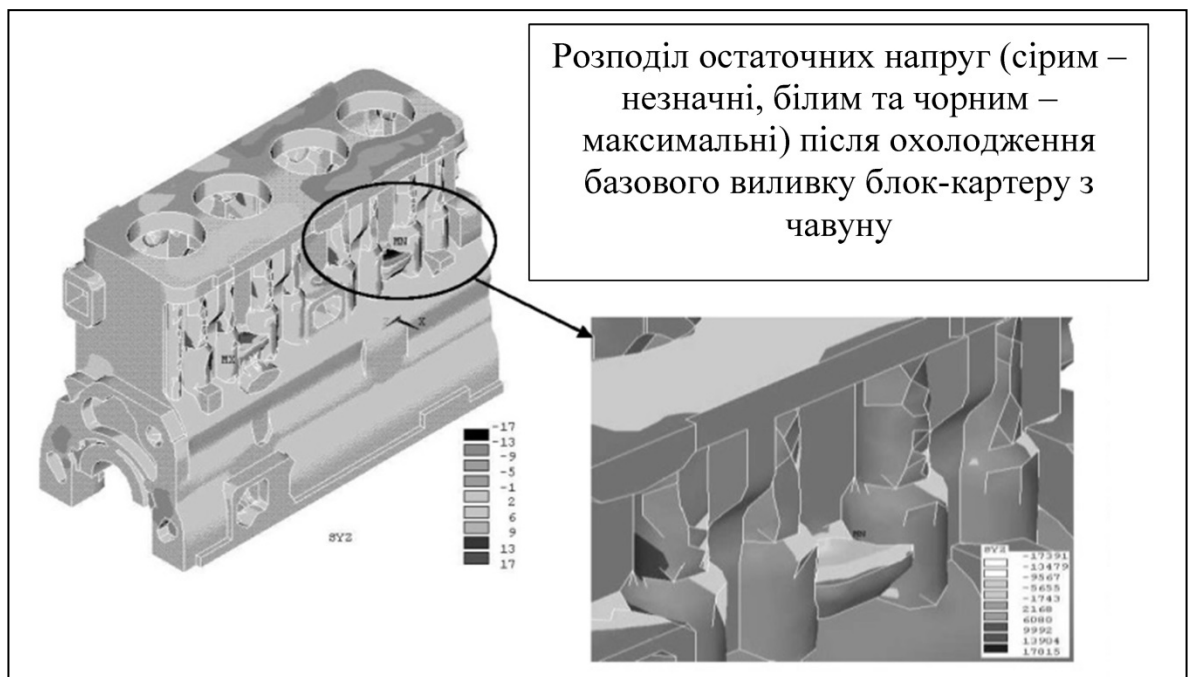


Рисунок 4.13 - Зони максимальної інтенсивності залишкових напруг (збігаються із зоною виникнення втомної тріщини) на скінчено-елементній моделі виливки блок-картера

Усунення проблеми можливе застосуванням комплексного підходу, що включає наступні заходи:

- зміни конструкції ливникової системи як фактору, що впливає на протікання гідро-і газодинамічних процесів в момент заповнення форми розплавом;
- зміною конструкції стрижнів з метою зменшення гальмування усадці, особливо в найбільш критичних місцях литої деталі;

- підбір модифікатора та режимів модифікування, що забезпечують необхідний перебіг процесів графітизації, залежно від хімічного складу базового сплаву;
- вибором режимів термічної обробки, що забезпечують мінімізацію залишкових напруг.

Перші дві заходи реалізуються на етапах «Розробка технології виливку» та «Проектування оснастки» та «Виготовлення дослідної партії виливків» в схемі конструкторсько-технологічного проектування виливків на основі зворотних зв'язків, представлений на рис. 2.1.

Третій та четвертий заходи частково пов'язані та потребують сумісного залучення емпіричних даних та експериментально-промислових випробувань. Для цього мають бути визначені статистичні та фактичні дані щодо термічних напруг у чавуні корпусу, зазвичай марок СЧ200 ДСТУ 8833:2019 та СЧ250 ДСТУ 8833:2019, а також мікроструктури чавуну, модифікованого різними типами модифікаторів. Для цього чавун для виготовлення блок-корпусу ДВЗ був оброблений модифікатором ФС75 з наступним визначенням металографічним аналізом кількість перліту в мікроструктурі, максимальне значення якого за відсутності вільного цементиту дозволяє вважати отриманий результат раціональним. Наявність дрібнодисперсного графіту при цьому також дає підставу вважати, що механічні властивості будуть високими.

Підвищення механічних властивостей за рахунок регулювання мікроструктури забезпечує можливість зниження масо-габаритних характеристик литих деталей за рахунок зменшення товщин їх стінок, тобто технологічні режими модифікування безпосередньо впливають на конструкторські рішення.

На рис. 4.14 представлено результати моделювання вмісту перліту в мікроструктурі дослідного чавуну в перетині стінки виливку.

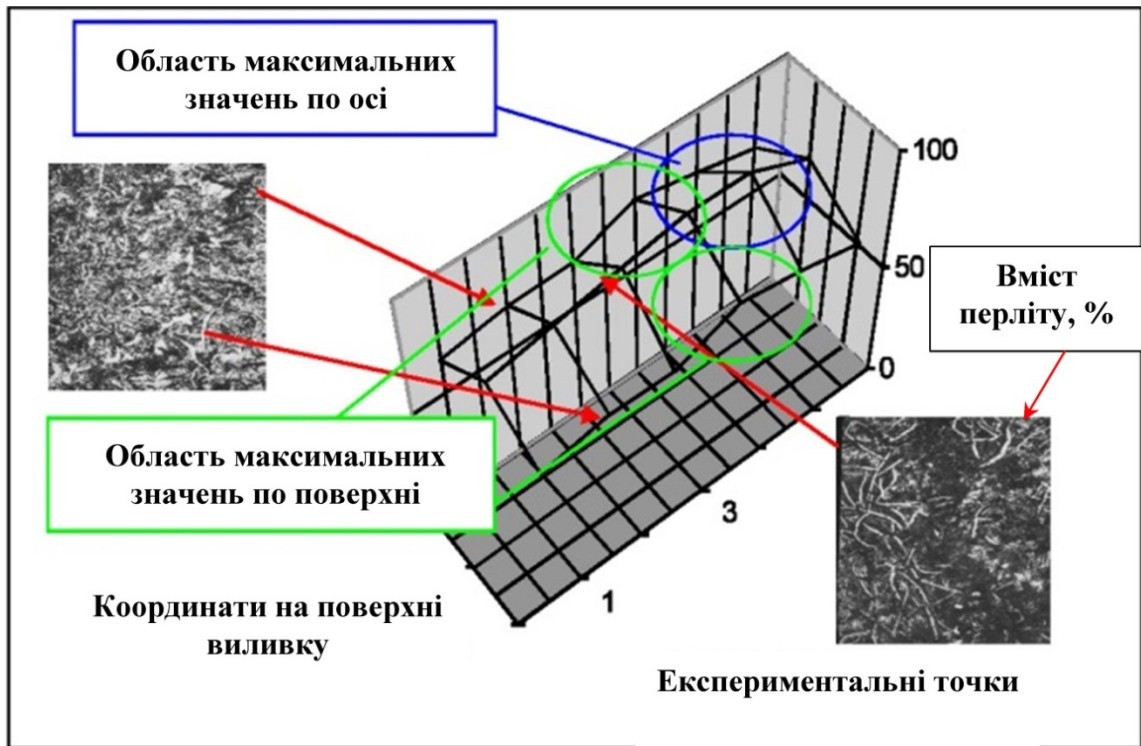


Рисунок 4.14 - Вміст перліту в чавуні корпусу блок-картеру ДВЗ, модифікованого феросиліцієм

Для виготовлення чавуну для литого блок-картера ДВЗ може бути використано чавун, що виготовляється по технології чавуноливарного цеху ПрАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» [40]. Технологія передбачає плавку в індукційній печі ІСТ-1/0.8М5 та модифікування двома типами модифікаторів: феросиліцієм ФС75 та феросілікобарієм ФС65Ба4. Температура чавуну перед модифікуванням має знаходитись в діапазоні 1380–1420 °С. Обробка розплаву модифікаторами здійснюється в ковші фракцією 1–10 мм в кількості 0,3 % від маси рідкого металу (3 кг на 1 т) після заповнення ковшу на 100–150 мм. Модифікатори ФС75 також використовуються фракцією 3–10 мм, модифікатори ФС65Ба4 в формі пластин з товщиною 0,5–3 мм та максимальними розмірами до 50 мм, по технології «чіпс-модифікування».

За результатами експериментальних плавок заливаються проби клинової форми для виготовлення в подальшому шліфів та визначення мікроструктури за стандартними методиками, передбаченими ДСТУ 3443-87.

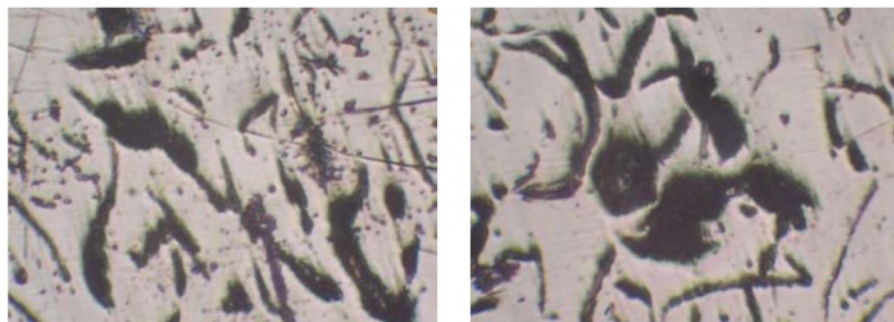
Результати визначення мікроструктури чавуну, обробленого модифікатором ФС75, наведені на рис. 4.15.



Рисунок 4.15 - Мікроструктура чавуну, модифікованого феросиліцієм ФС75, x150

Результати визначення мікроструктури чавуну, обробленого модифікатором ФС65Ба4, наведені на рис. 4.16, 4.17 [58].

Мікроструктура зразка чавуну, обробленого модифікатором ФС65Ба4, представленого на рис. 4.16, відноситься до товстого перетину зразку. Мікроструктура зразка чавуну, обробленого модифікатором ФС65Ба4, представленого на рис. 4.17, відноситься до тонкого перетину зразку.



а

б

Рисунок 4.16 - Мікроструктури чавуну в товстому перетині зразка, модифікованого феросиліцієм ФС65Ба4, x150: а – периферія, б – осьова зона

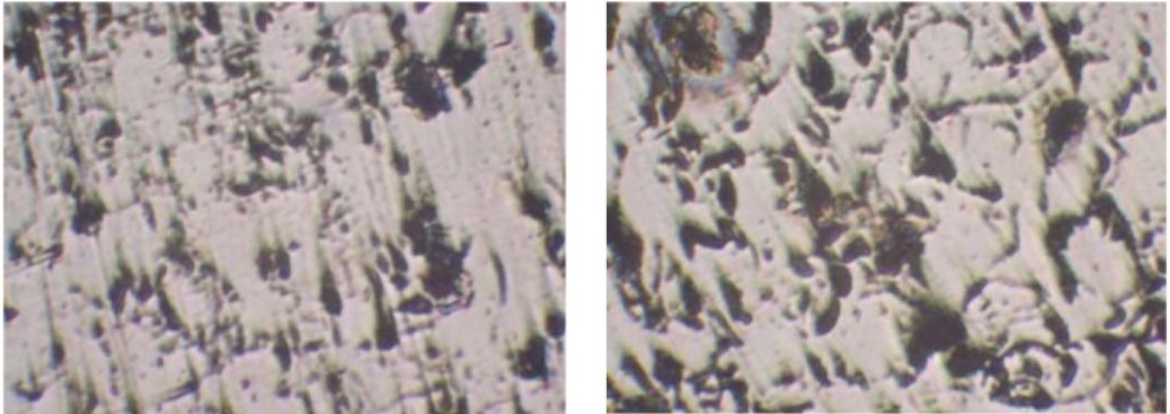


Рисунок 4.17 - Мікроструктури чавуну в тонкому перетині зразка, модифікованого феросиліцієм ФС65Ба4, х150: а – периферія, б – осьова зона

На рис. 4.18 показано поверхню відгуку, що описує розподіл розміру графіту в перетині зразку чавуну, модифікованого ФС75.

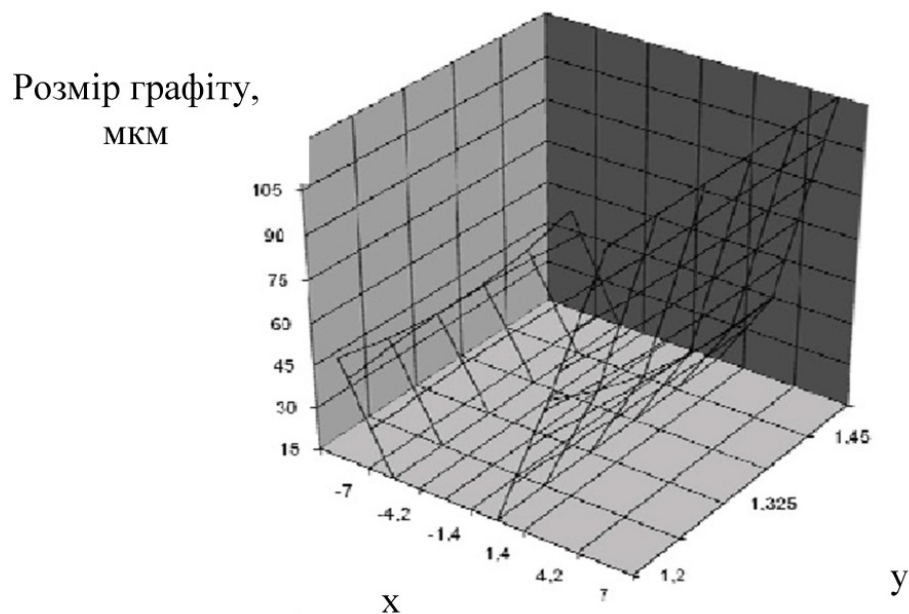


Рисунок 4.18 - Поверхня відгуку, що описує розподіл розміру графіту в перетині зразку чавуну, модифікованого ФС75

На рис. 4.19 показано поверхню відгуку, що описує розподіл розміру графіту в перетині зразку чавуну, модифікованого ФС65Ба4.

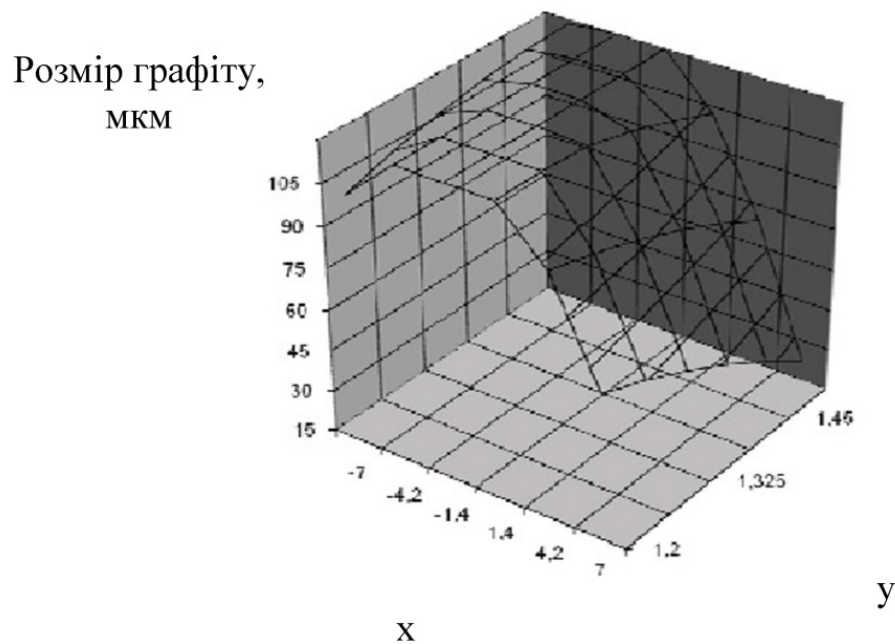


Рисунок 4.19 - Поверхня відгуку, що описує розподіл розміру графіту в перетині зразку чавуну, модифікованого ФС65Ба4

При оцінюванні якості за стандартною методикою, передбаченою ДСТУ 3443-87 було виявлено, що металічна матриця складається з перліту та фериту (П96), графіт пластинчастий, прямолінійний, структура графіту із рівномірно розподіленим пластинчастим графітом ПГф1, ПГр1, на поверхні бачиться междендритна пластинчаста орієнтація графіту ПГр9. На поверхні зразка довжина включень графіту ПГд 90-45, кількість включень ПГ6. Площа включень фосфідної евтектики сягає близько ФЕП 2000.

Після дослідження мікроструктури на зразку з чавуну, модифікованого ФС65Ба4, виявлено, що металічна матриця – перліт пластинчастий (до 92 % перліта) та ферит до 8 %. Графіт пластинчастий завихреної форми ПГф2, розподілення розеточне, довжина включень ПГД90.

З отриманих результатів видно, що використання модифікатора ФС65Ба4 забезпечує менші значення розміру графіту, що може позитивно впливати на механічні властивості чавуну, тому такий чавун та режими модифікування дозволяють рекомендувати його для виготовлення корпусів блок-картеру ДВЗ та враховувати це на етапі конструкторсько-технологічного проектування.

Однак при цьому слід враховувати, що внаслідок гальмування усадки у процесі кристалізації ймовірність формування залишкових напруг зростає. Це означає, що ефект підвищення механічних властивостей, що досягається, може зводитися «нанівець», тому що внаслідок наявності залишкових напруг можливе утворення тріщин в литих деталях. Це підтверджують результати досліджень формування тріщин втоми в зонах, що збігаються з розподілом залишкових напруг, для литих блок-картерів з сірого чавуну, модифікованого ФС75. Можливо, використання іншого модифікатора, наприклад ФС65Ба4, зменшить цей негативний фактор впливу.

Запропоновані рішення дозволяють вирішувати питання забезпечення необхідної механічної міцності, як однієї з ключових вимог до корпусних виливків, які мають бути враховані в процесі проектування (рис. 2.2, 2.7). Ідентифікація технологічних факторів, що впливають на величину залишкових напруг, забезпечує принципову можливість коригування в ході самого процесу проектування, зокрема, що стосується змін твердотільної та електронної моделей. Серед таких факторів можуть бути:

- недосконалість ливникової системи та конструкції стрижнів, що закладаються на етапі проектування технології ливарної форми;
- неправильний вибір матеріалу литої деталі, нераціональний вибір модифікаторів та режимів модифікування;
- відсутність комплексного підходу до вибору оптимального конструкторсько-технологічного рішення.

Останнє передбачає необхідність узгодження всіх етапів виготовлення литих деталей: паралельного конструкторсько-технологічного проектування та необхідності обліку всіх технологічних процесів – від плавки та позапічної обробки сплаву до термообробки готової деталі. Реалізація такого підходу забезпечує зниження залишкової напруги в корпусних виливках.

4.3 Комп'ютерно-інтегроване проєктування технології корпусного виливку зі сталі

Виготовлення корпусних виливків зі сталі стикається з проблемою поганих ливарних властивостей сталі, що виражається, зокрема, в формуванні великих усадкових раковин. Це потребує вживання спеціальних конструкторських заходів – розробки та проєктування надлишків, що відображено в структурній схемі компонентів для формалізації опису стратегії розробки технології виливку та проєктування оснастки для таких корпусних виливків (рис. 3.13).

Цей фактор має бути врахований на етапі проєктування, зокрема необхідне виявлення закономірностей формування усадкової раковини для різних видів надлишків (рис. 3.13), варіантів конструкцій та їх розмірів. Це дозволить формувати раціональні конструкторсько-технологічні рішення щодо встановлення надлишків, мінімізуючи ймовірність виникнення внутрішніх дефектів та забезпечуючи, тим самим, вимогу необхідної механічної міцності, як однієї з ключових вимог до корпусних виливків, які мають бути враховані в процесі проєктування (рис. 2.2, 2.7).

Для проведення комп'ютерного моделювання було обрано деталь «Корпус» (рис. 4.20) із середньовуглецевої сталі, виливок якої виготовляється литтям у разові піщані форми.

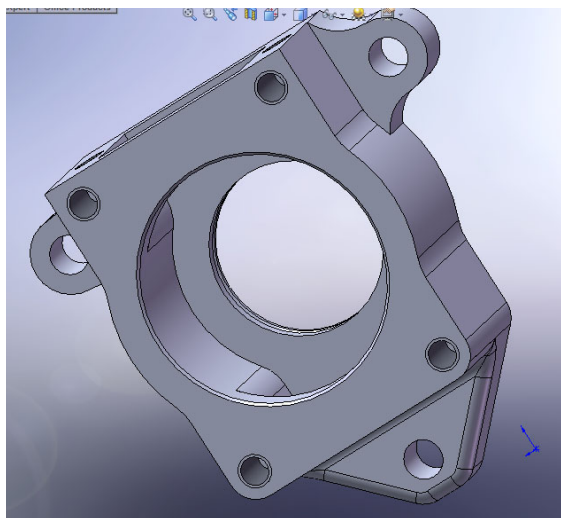


Рисунок 4.20 - Деталь «Корпус»

При виготовленні даного виливку, як представника корпусних виливків зі сталі, може виникнути ряд дефектів, пов'язаних, зокрема, з проникненням усадкової раковини в тіло виливка.

З конструкторсько-технологічних міркувань було встановлено 3 надлишки, що живлять найбільш масивні, теплові вузли виливки – великий циліндричний надлишок прямокутного перерізу з галтелями і два невеликі надлишки з боку підведення метали в порожнину форми, причому одна з них була встановлена над місцем входу живильника.

3D модель отливки приведена на рис. 4.20.

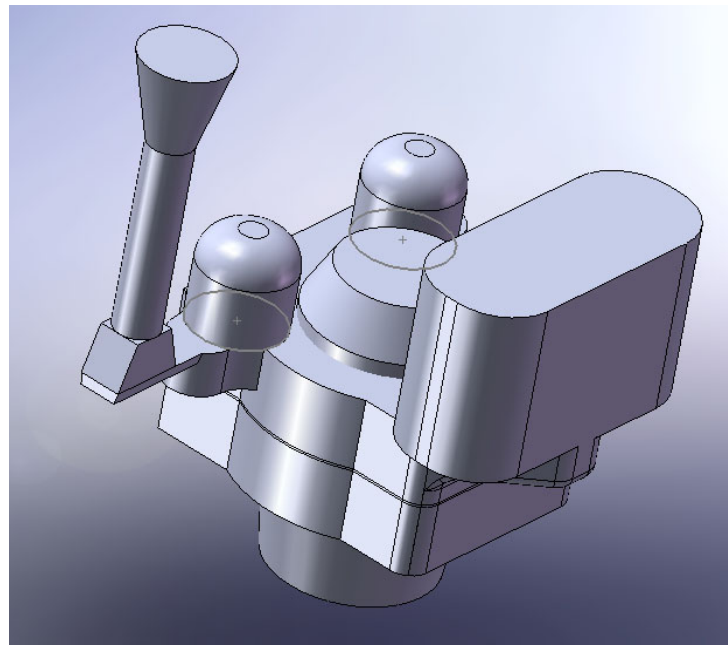


Рисунок 4.20 - 3D-модель виливку «Корпус»

Таким чином, прийнято такі поняття:

- надлишок круглого перерізу, розташований ближче до живильника, – надлишок № 1_1;
- надлишок круглого перерізу, розташований далі від живильника, – надлишок № 1_2;
- надлишок прямокутного перерізу з галтелями – надлишок № 2.

Розміри надлишків представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Розміри надлишків

Номер експерименту	Розміри надлишків, мм				
	надлишок № 1_1		надлишок № 1_2		надлишок № 2
	d	H	d	H	H
1	42	42	42	42	74
2	42	42	42	42	55
3	42	70	42	70	50
4	55	42	55	42	48
5	60	75	60	75	48

Слід звернути увагу на те, що для надлишків № 1_1 і № 1_2 змінними, що варіюються, є висота і діаметр в експериментах 1–3, а експерименти 1 і 2 проводяться при постійному значенні цих змінних, що може дозволити оцінити однорідність експериментів. Для надлишку №2 змінною, що варіюється, є висота. Вхідні дані, подані у табл. 4.1, свідчать про те, що експерименти були орієнтовані не тільки виявлення впливу змінних, що варіюються, але і вплив варіанту встановлення надлишків, на формування усадкових раковин. Результати комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини в експерименті №1 представлені на рис. 4.21.

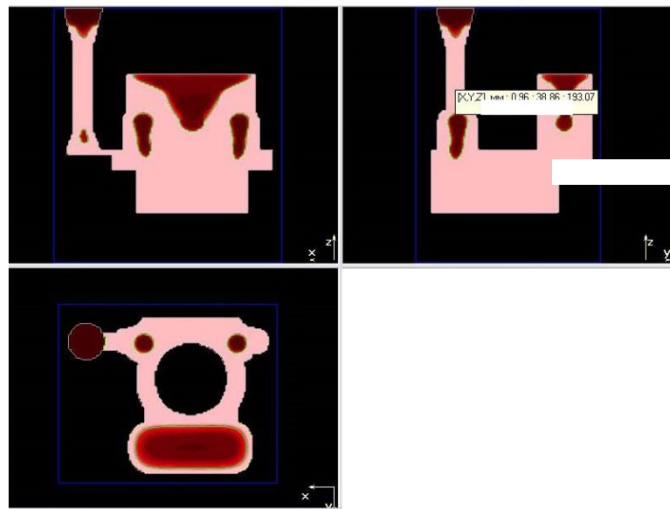


Рисунок 4.21 - Результати моделювання формування усадки у 2D-проекціях (експеримент №1)

Як видно з рис. 4.21, в експерименті № 1 спостерігалася велика глибина усадкової раковини та ймовірне проникнення її в тіло виливки для надлишку № 1_1 та надлишку № 1_2.

Результати комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини в експерименті №2 представлені на рис. 4.22.

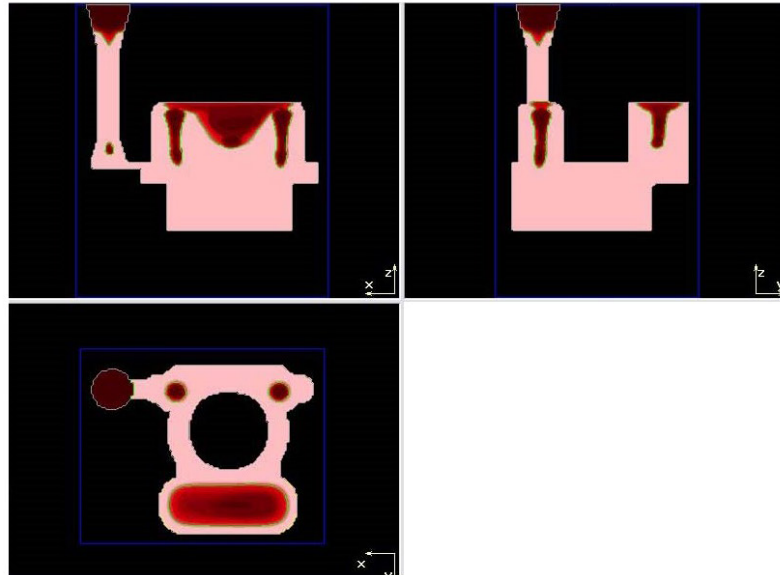


Рисунок 4.22 - Результати моделювання формування усадки у 2D-проекціях (експеримент №2)

Результати комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини в експерименті №3 представлені на рис. 4.23.

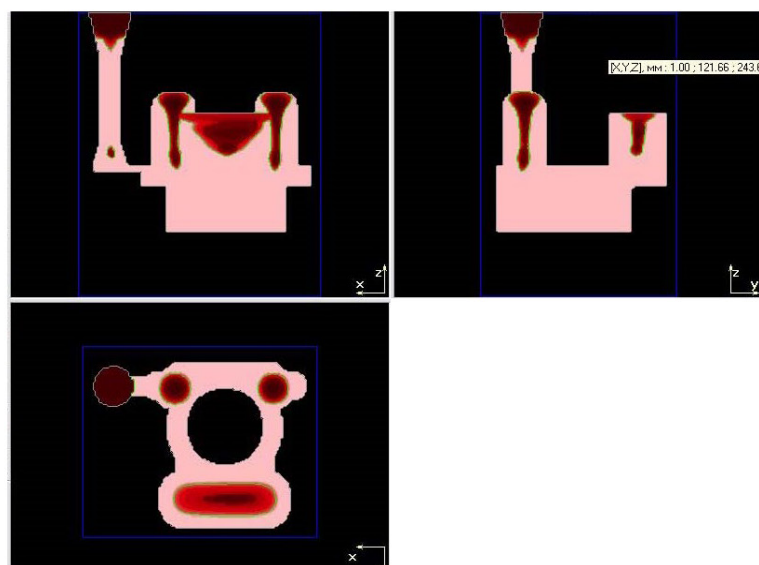


Рисунок 4.23 - Результати моделювання формування усадки у 2D-проекціях (експеримент №3)

Як видно з рис. 4.22, 4.23, в експериментах № 2 та № 3 усадкова раковина пройшла крізь надлишки, проте глибина проникнення, ймовірно, не перевищує розміру припуску на механічну обробку.

Результати комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини в експерименті №4 представлені на рис. 4.24.

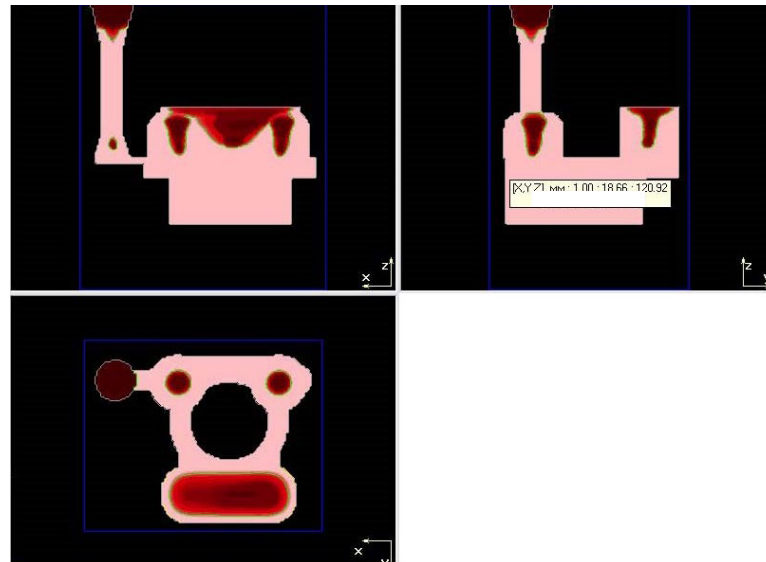


Рисунок 4.24 - Результати моделювання формування усадки у 2D-проекціях (експеримент №4)

Результати комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини в експерименті №5 представлені на рис. 4.25.

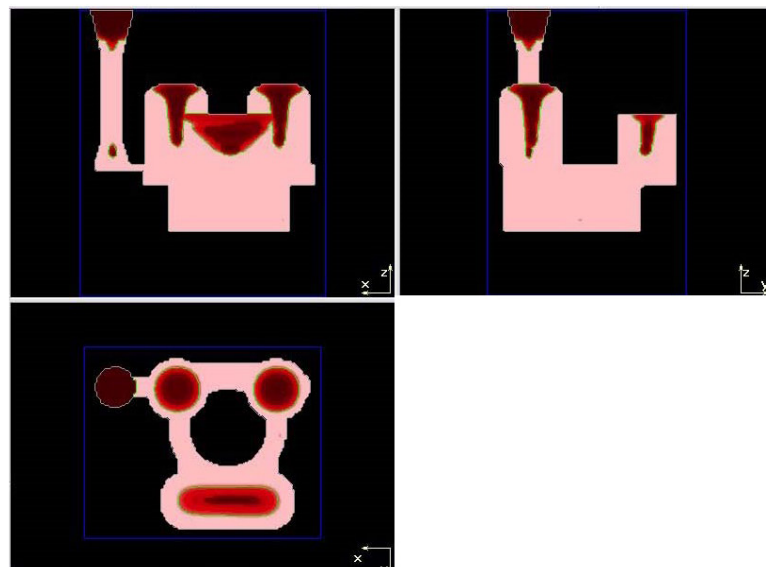


Рисунок 4.25 - Результати моделювання формування усадки у 2D-проекціях (експеримент №5)

З рис. 4.24, 4.25 можна бачити, що в експериментах № 4 та № 5 усадкова раковина залишилася повністю у надлишках № 1_1 та № 1_2. Щодо надлишку № 2, то у всіх експериментах усадкова раковина залишилася повністю в тілі надлишку.

Таким чином, можна констатувати, що результати розрахунків положення нижньої точки усадкової раковини за підсумками комп'ютерного моделювання показують, що зміна способу встановлення надлишку впливає на розміри та конфігурацію усадкової раковини.

Практичний інтерес представляє відповідь на питання, чи є вплив співвідношення розмірів надлишку (d/H) та об'єм надлишку (V) на глибину усадкової раковини (Z). Необхідно відзначити, що особливий інтерес представляє не абсолютне значення цієї величини, а відносне – приріст глибини усадкової раковини по відношенню до мінімального її значення, при якому не відбувається проникнення раковини в тіло виливка. Ця величина може бути виражена коефіцієнтом приросту (K_z) і прийнята за вихідну змінну. Цей коефіцієнт може бути розрахований за такою формулою:

$$K_z = \frac{Z_o}{Z_i}, \quad (4.1)$$

де Z_o – координата нижньої точки усадкової раковини, при якій не відбувається її проникнення в тіло виливку, Z_i – координата нижньої точки усадкової раковини в i -му варіанті конструкції надлишку.

Початок координат, при цьому, знаходиться в точці заливки металу в ливникову чашу.

Враховуючи результат моделювання, який показав, що у разі використання надлишку № 2 вся усадкова раковина знаходиться всередині надлишку, подальший аналіз проведено щодо надлишків № 1_1 та № 1_2. При цьому, враховуючи, що ці надлишки розміщені симетрично щодо осі та мають однакові розміри, можна вважати, що результати моделювання формування усадкової раковини є

результатами двох паралельних експериментів. Таким чином, може бути оцінена середня величина глибини раковини (Kz_m):

$$Kz_m = \frac{Kz_{m1_1} + Kz_{m1_2}}{2}. \quad (4.2)$$

Об'єм надлишку розраховується за такою формулою:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} H, \quad (4.3)$$

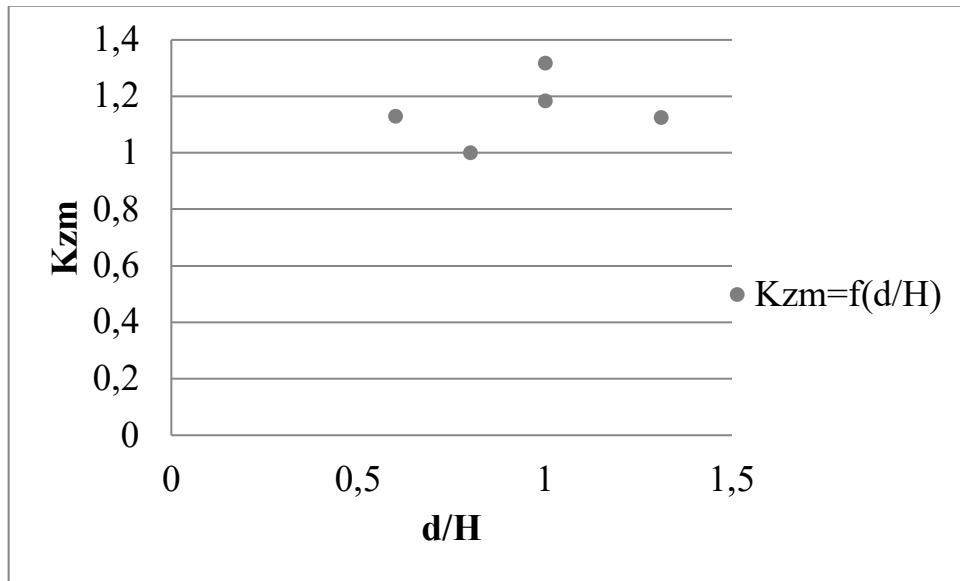
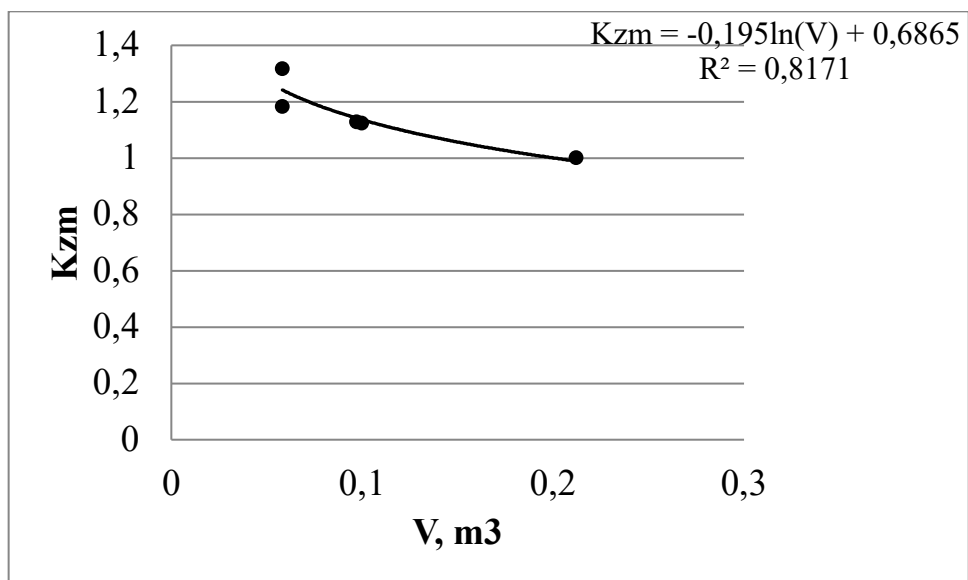
де d – діаметр надлишку; H – висота надлишку.

З огляду на це результати розрахунків Kz_m при різних значеннях d/H та V наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Результати розрахунків Kz_m для різних значень d/H та V

Номер експерименту	d/H	Kz_{m1_1}	Kz_{m1_2}	Kz_m	V, m^3
1	1	1,308916	1,323953	1,316435	0,058159
2	1	1,168054	1,196608	1,182331	0,058159
3	0,6	1,118387	1,137199	1,127793	0,096932
4	1,309524	1,126711	1,120239	1,123475	0,099734
5	0,8	1	1	1	0,21195

На рис. 4.26 представлено залежність Kz_m від відношення d/H , а на рис. 4.27 – залежність Kz_m від V .

Рисунок 4.26 - Залежність Kz_m від відношення d/H Рисунок 4.27 - Залежність Kz_m від V .

З рис. 4.26 видно, що відношення d/H не впливає на величину Kz_m , що не відповідає існуючим рекомендаціям щодо підбору співвідношень діаметра надлишку та його висоти для закритих надлишків. Однак об'єм надлишку впливає на Kz_m (рис. 4.27), причому ця залежність може бути описана рівнянням регресії

$$Kz_m = 0.6865 - 0.195 \ln V. \quad (4.4)$$

З рівняння (4.4) видно, що збільшення об'єму надлишку знижує величину Kz_m , яка прагне до 1.

Рівняння (4.4) дозволяє прогнозувати величину Kz_m при виборі об'єму надлишку, а також оцінити, який раціональний об'єм надлишку може бути прийнятий з урахуванням того, що необґрунтоване збільшення об'єму надлишку, з точки зору зменшення координати нижньої точки усадкової раковини, призведе до перевитрати металу.

Важливо відмітити, що на отримані результати накладаються обмеження в частині обраного типу та конструкції виливку, а також марки сталі. Тим не менш, отримані результати мають потенціал масштабування, бо дають змогу для аналогічних типових конструкцій корпусних деталей визначати напрями досліджень впливу типу, розмірів та способів встановлення надлишків на глибину проникнення усадкової раковини.

Таким чином, на підставі результатів комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини при використанні двох типів надлишків встановлено, що при деяких технологічних варіантах існує ризик проникнення усадкової раковини в тіло виливки. Використання циліндричного надлишку прямокутного перерізу з жолобниками забезпечує повне поглинання усадкової раковини в місці встановлення надлишку. Використання надлишку круглого перерізу в місці установки не гарантує поглинання усадкової раковини. Визначальним чинником, що впливає коефіцієнт приросту глибини усадкової раковини, є величина об'єму надлишку. Цей вплив може бути описаний функціональною залежністю логарифмічного типу із досить високим коефіцієнтом детермінації $R^2=0.82$. Відношення діаметра надлишку до її висоти не впливає на коефіцієнт приросту глибини усадкової раковини. Отримана залежність $Kz_m=f(V)$ у вигляді рівняння регресії (4.4) дозволяє встановити раціональний об'єм надлишку, що забезпечує мінімум коефіцієнт приросту за одночасного недопущення перевищення витрати металу.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Виконане комп'ютерно-інтегроване проєктування технології литого блок-картеру дизеля 4ДТНА1 з алюмінієвого сплаву, створеного в ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування». В запропонованій схемі конструкторсько-технологічного проєктування виливків на основі зворотних зв'язків цим було реалізовано блоки «Розробка технології виливку» та «Проєктування оснастки». Метою було визначення на етапі розробки технології можливих проблемних місць задля запобігання виникнення дефектів у виливках, яке прямо впливає на величину витрат при визначенні оптимальної стратегії проєктування. Кінцевим варіантом такого проєктування було визначення раціональної конструкції оснастки, яка мінімізує можливий брак виливків по ключових вимогах до такого типу корпусних виливків. Результати використання інформаційно-комп'ютерної системи (ІКС) SolidWorks та наступного аналізу динаміки охолодження виливку, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються останніми, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадкового характеру. Зокрема визначено, що брак за обраному варіанту технології відповідно до обраної стратегії проєктування (підвід ливникової системи знизу), може становити 5–6 %.

2. На основі вибору стратегії проєктування з використанням ярусної ливниково-живильною системи проведено аналіз місць розташування дефектів, який показав, що найбільш схильними до усадкових явищ є крайки порожнин циліндрів, верхня площина у передній частині блоку, у місцях кріплень під головку, масиви бобишок з боків блоку. Встановлено, що дефекти газоусадкового характеру можуть бути концентраторами напруг в конструктивних елементах деталі, а значить можуть вплинути на характеристики міцності в процесі експлуатації. Відповідно, перевищення норми браку завищує витрати на реалізацію обраної стратегії проєктування.

3. Визначено головну проблему виготовлення корпусу блок-картеру ДВЗ з чавуну, яка полягає в необхідності цілеспрямованого регулювання структуроутворення, яке унеможлиблювало б в процесі охолодження виливку формування мікроструктури по метастабільній схемі. Відсутність відповідних

умов може привести до формування відбілу, що буде браком виливку, який потребує подальшої термічної обробки, спрямованої на розпад цементиту. Це може привести до того, що обрана та обґрунтована стратегія проєктування не забезпечить очікувань та при реалізації дасть гірші варіанти.

4. Для регулювання мікроструктури запропоновано використання модифікатора ФС65Ба4, що разом із заходами конструкторського характеру у вигляді обирання раціонального варіанту ливникової системи та конструкції стрижнів дасть змогу забезпечення прийнятної перлітної структури з відсутністю або мінімальним вмістом остаточного цементиту та розподілом графіту і його розмірів, що забезпечують необхідні механічні властивості. Такий підхід реалізує етапи «Розробка технології виливку» та «Проектування оснастки» та «Виготовлення дослідної партії виливків» в схемі конструкторсько-технологічного проєктування виливків на основі зворотних зв'язків. Таким чином, необхідне узгодження всіх етапів виготовлення виливків: конструкторсько-технологічного проєктування з обліком усіх технологічних процесів – від плавки та позапічної обробки сплаву до термообробки готової деталі.

5. Було проведено комп'ютерне моделювання процесу твердіння виливку «Корпус» із середньовуглецевої сталі, який виготовляється литтям у разові піщані форми. Визначено вплив співвідношення розмірів надлишку та об'єм надлишку, а також способу їх встановлення в конструкції виливку, на глибину усадкової раковини. Запропоновано коефіцієнт приросту усадкової раковини. Визначено, що співвідношення розмірів надлишку не впливає на величину приросту, що не відповідає існуючим рекомендаціям щодо підбору співвідношень діаметра надлишку та його висоти для закритих надлишків. Однак об'єм надлишку впливає на цей коефіцієнт, причому ця залежність може бути описана логарифмічним рівнянням регресії.

6. На підставі результатів комп'ютерного моделювання формування усадкової раковини при використанні двох типів надлишків встановлено, що при деяких технологічних варіантах існує ризик проникнення усадкової раковини в тіло виливки. Використання циліндричного надлишку прямокутного перерізу з жолобниками забезпечує повне поглинання усадкової раковини в місці встановлення надлишку. Використання надлишку круглого перерізу в місці

установки не гарантує поглинання усадкової раковини. Визначальним чинником, що впливає коефіцієнт приросту глибини усадкової раковини, є величина об'єму надлишку. Цей вплив може бути описаний функціональною залежністю логарифмічного типу із досить високим коефіцієнтом детермінації $R^2=0.82$.

РОЗДІЛ 5 ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК В СХЕМІ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ВИЛИВКІВ НА ОСНОВІ ПРАКТИЧНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЄКТУВАННЯ

5.1 Діагностика температурного режиму плавки як фактору керування структурами і механічними властивостями сплаву для корпусного литва

Як було визначено в розділі 4, модифікування є фактором керування структурами сплаву. В свою чергу, мікроструктура впливає на механічні властивості та в разі забезпечення в структурі чавуну для корпусних виливків високого вмісту перліту без остаточного цементиту та графіту з мінімальними розмірами та рівномірним розподілом підвищуються механічні властивості. Це відкриває можливості для зменшення масо-габаритних характеристик виливків та забезпечення виконання відповідних вимог до корпусних виливків, визначених на рис. 2.2, 2.6, 2.7. Але технологія модифікування передбачають чітко визначений температурний режим, тобто температура сплаву перед модифікуванням має бути в заданих межах. Наприклад, при модифікуванні феросиліцієм ФС75 та феросілікобарієм ФС65Ба4 температура має знаходитись в діапазоні 1380–1420 °С. Це передбачає необхідність контролю температурного режиму плавки та визначення відповідності температури регламентованим значенням, встановленим для видачі розплаву з печі і подальшого модифікування.

Таким чином, правильний температурний режим плавки чавуну є одним з основних чинників отримання якісного сплаву. Саме температура є тим фактором, який впливає на фізико-хімічні процеси, що протікають у розплаві. Правильний вибір температурного режиму формує остаточний хімічний склад сплаву, який має відповідати вимогам стандартів чи технічних умов при виготовлені корпусного литва.

Задля забезпечення комплексу вимог до процесів плавки, зокрема технічних, економічних, екологічних, для виготовлення корпусного литва треба обирати плавку в індукційних печах. Для технології індукційної плавки важливо

враховувати, що вихідною характеристикою цього процесу є не тільки хімічний склад сплаву, що формується переважно температурою сплаву. Дуже важливо враховувати фізико-хімічні взаємодії у всій системі «розплав – футеровка – шлак». Якщо не зважати на ці взаємодії, то можуть виникнути ситуації зносу футеровки і прориву розплаву. Ризики виникнення подібних ситуацій безпосередньо пов'язані з правильним вибором та контролем температурного режиму. Так, при переході з низькотемпературного режиму $T=1200\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ на високотемпературний режим $T=1400\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ починає розвиватися реакція взаємодії кремнезему кислотої футеровки печі з розплавом:



де $[\text{C}]$, $[\text{Si}]$ – вміст вуглецю та кремнію в розплаві, %, (SiO_2) – вміст кремнезему у футеровці, $\{\text{CO}\}$ – вміст оксиду вуглецю в газовій фазі.

Розвиток реакції (5.1) призводить до хімічного зносу футеровки.

Однак не лише цей процес є небажаним. Оскільки особливістю ведення індукційного процесу є плавка із залишком рідкого металу, що може становити, з практичних рекомендацій, 25–50 %, у процесі плавки іноді відбувається зміна рівня розплаву за висотою печі. Якщо вміст оксидів заліза (FeO) у шлаку високий, то складні сполуки типу $\text{FeO} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot \text{MnO}$, що формуються, мають низьку температуру плавлення і проходячи весь час вгору по висоті футеровки розчиняють у собі кремнезем, що входить до складу футеровки. Результатом цього є знос футеровки.

З іншого боку, вимоги до хімічного складу сплаву та залежність індукційної плавки від якості шихти визначають необхідність ведення плавки на високотемпературному режимі. Тому дуже важливо так керувати процесом, щоб раціональним чином забезпечувати необхідний за даних умов температурний режим. Якщо ж відсутня можливість безперервного якісного контролю температури в процесі плавки, необхідно мати якісні діагностичні можливості, що дозволяють опосередковано оцінювати температуру процесу. Відсутність таких

можливостей створює проблему для ефективного керування індукційною плавкою за критерієм забезпечення якості сплаву та підвищення терміну служби футеровки.

Це обумовлює необхідність побудови діагностичного принципу оцінювання температурного режиму плавки чавуну в індукційній тигельній печі на основі аналізу шлаку, вибравши в якості діагностичних параметрів найбільш значущі компоненти шлаку.

В основу дослідження було покладено концепцію, запропоновану у роботі [107], у тому, що на основі визначення хімічного складу шлаку можна визначити відхилення температурних режимів плавки від нормальних. Для цього будувалося класифікуюче правило, що дозволяє визначити, чи проводилася плавка за низькотемпературним режимом або за високотемпературним режимом на підставі даних про вміст у шлаку визначальних компонентів. Такими компонентами були обрані SiO_2 (прийнято позначення x_1) та CaO (прийнято позначення x_2) як основні компоненти, що визначають кислотність шлаку.

Для побудови класифікуючого правила виконувалася така процедура:

1. Масштабування та нормалізація.
2. Розрахунок статистичних характеристик класів: клас 1 – низькотемпературний режим плавки, клас 2 – високотемпературний режим плавки.
3. Побудова дискримінантної функції.

Класифікуюче правило має загальний вигляд:

$$\begin{aligned} f \geq f_0 &\rightarrow x^{(j)} \in \text{class } 2, \\ f < f_0 &\rightarrow x^{(j)} \in \text{class } 1. \end{aligned} \quad (5.2)$$

де f – значення дискримінантної функції, що розраховується за формулою (5.3), f_0 – порогове значення, що розраховується за формулою (5.4), $x^{(j)}$ – матриця факторів

$$f(\mathbf{X}) = \mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2), \quad (5.3)$$

$$f_0 = 0,5(\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2)^T \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{X})(\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2) - \ln \frac{P(1)}{P(2)}. \quad (5.4)$$

В формулах (5.3), (5.4) прийняті наступні позначення:

$\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ – математичні очікування класів 1 и 2 відповідно, що розраховується за формулами по формулам (5.5), (5.6):

$$\mathbf{m}_1 = N_1^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{N_1} x_{1j} \\ \sum_{j=1}^{N_1} x_{2j} \end{pmatrix}, \quad (5.5)$$

$$\mathbf{m}_2 = N_2^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{N_2} x_{1j} \\ \sum_{j=1}^{N_2} x_{2j} \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

\mathbf{C} – дисперсійна матриця, що розраховується за формулою

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{X}_{ij} \mathbf{X}_{ij}^T - \mathbf{m}_i \mathbf{m}_i^T, i = \begin{cases} 1 & \text{for class 1} \\ 2 & \text{for class 2} \end{cases}, \quad (5.7)$$

де N_1, N_2 – число об'єктів в класах 1 и 2 відповідно,

$P(1), P(2)$ – ймовірність класів 1 и 2 відповідно, приймалася рівною.

Правило будувалося для нормованих значень факторів, нормування здійснювалося за такою формулою:

$$x_{kj}^{norm} = \frac{2x_{kj} - (x_{k \max} + x_{k \min})}{x_{k \max} - x_{k \min}},$$

$$k = 1, 2, j = 1, 2, \dots, N_i,$$

$$x_{k \max} = \max_j x_{kj}, \quad x_{k \min} = \min_j x_{kj}, \quad (5.8)$$

де x_{kmax} , x_{kmin} – максимальне та мінімальне значення факторів (вмісту SiO_2 та CaO у шлаку, %) відповідно за узагальненою вибіркою для низькотемпературного та високотемпературного режимів плавки.

У табл. 1 наведено вибірку даних, отриману з [107], для побудови класифікуючого правила.

Таблиця 5.1 - Вибірка даних для побудови класифікуючого правила

Номер зразка	Склад шлаку, %			
	Низькотемпературний режим плавки		Високотемпературний режим плавки	
	SiO_2	CaO	SiO_2	CaO
1	39,32	2,08	56,62	3,11
2	44,55	2,13	65,38	3,14
3	47,16	2,52	76,18	3,18
4	50,17	2,76	70,85	4,11
5	53,22	3,18	69,95	3,59

З табл. 5.1 видно, що $x_{1max}=76,18\%$, $x_{1min}=39,32\%$, $x_{2max}=4,11\%$, $x_{2min}=2,08\%$. Тому середні значення становлять $m(x_1)=57,75\%$, $m(x_2)=3,095\%$, а інтервали варіювання становлять $I_1=18,43\%$, $I_2=1,015\%$ відповідно.

У табл. 5.2 представлені результати нормування факторів, а табл. 5.3 результати розрахунку вибірових статистичних функцій – математичного очікування $M(X_i)$ та дисперсії $S^2(X_i)$ для нормованих значень факторів, де X_i – вміст компонента в шлаку, %.

Таблиця 5.2 - Вибірка даних для побудови класифікуючого правила

Номер зразка	Нормовані значення факторів			
	Низькотемпературний режим плавки		Високотемпературний режим плавки	
	SiO ₂	CaO	SiO ₂	CaO
1	-1	-1	-0,061313	0,014778
2	-0,716224	-0,950739	0,413999	0,044335
3	-0,574607	-0,566502	1	0,083744
4	-0,411286	-0,330049	0,710798	1
5	-0,245795	0,083744	0,661964	0,487685

Таблиця 5.3 - Результати розрахунку вибірових функцій

Низькотемпературний режим плавки				Високотемпературний режим плавки			
SiO ₂		CaO		SiO ₂		CaO	
M(X _i)	S ² (X _i)	M(X _i)	S ² (X _i)	M(X _i)	S ² (X _i)	M(X _i)	S ² (X _i)
-0,5896	0,08367	-0,5527	0,20333	0,5451	0,15824	0,3261	0,17882

Із загального виду рівняння (5.3) випливає, що ліва його частина являє собою лінійну функцію, а права – чисельне граничне значення дискримінантної функції, що розділяє два класи – низькотемпературний режим плавки та високотемпературний режим плавки. Тобто оцінка температурного режиму плавки виконується на основі умов:

$$\begin{aligned}
 a_1x_1 + a_2x_2 &\geq f_0 \rightarrow \text{Високотемпературний режим,} \\
 a_1x_1 + a_2x_2 &< f_0 \rightarrow \text{Низькотемпературний режим.}
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Розрахунком параметрів дискримінантної функції, коефіцієнтів a_1 , a_2 та f_0 по формулах (5.3)–(5.7) на основі даних табл. 5.2 отримане правило, що дозволяє

визначити, чи вівся процес плавки на низькотемпературному режимі, чи він вівся на високотемпературному режимі:

$$\begin{aligned} 10.279x_1 + 22.061x_2 &\geq 1.086 \rightarrow \text{High-режим високотемпературний}, \\ 10.279x_1 + 22.061x_2 &< 1.086 \rightarrow \text{Low-режим низькотемпературний}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

На рис. 1 представлені точки, що лежать на теоретичній кривій щільності розподілу значення дискримінантної функції (ліва частина правила (5.10)) для обох класів та граничне значення функції (права частина правила (5.10)).

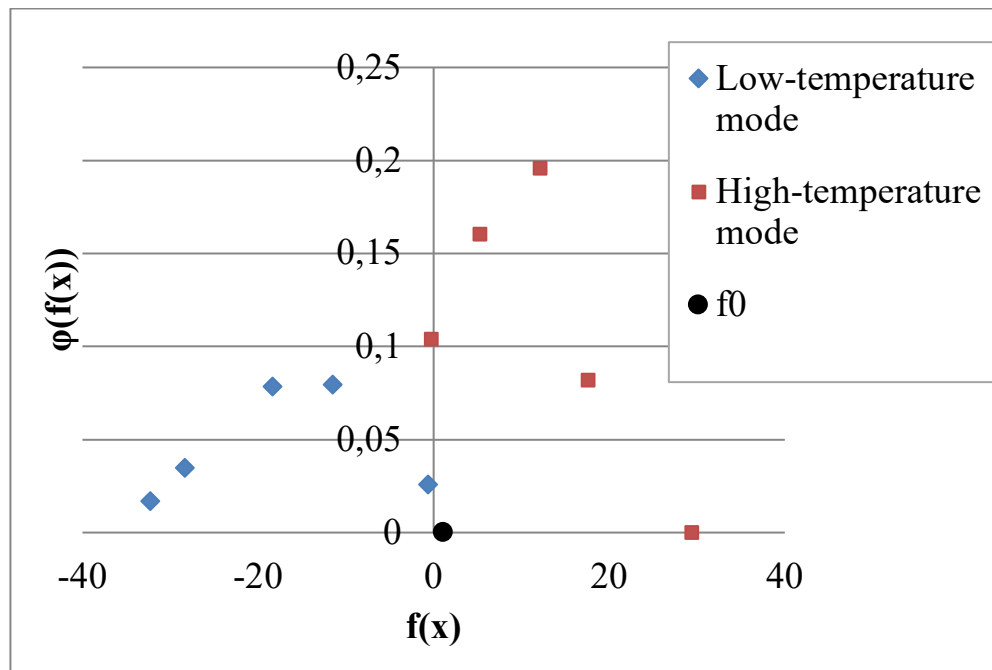


Рисунок 5.1 - Щільності ймовірності $p_1(f)$, $p_2(f)$ для низькотемпературного режиму та високотемпературного режиму плавки

Візуалізація поділу класів на основі одержаного правила (5.10) представлена на рис. 5.2.

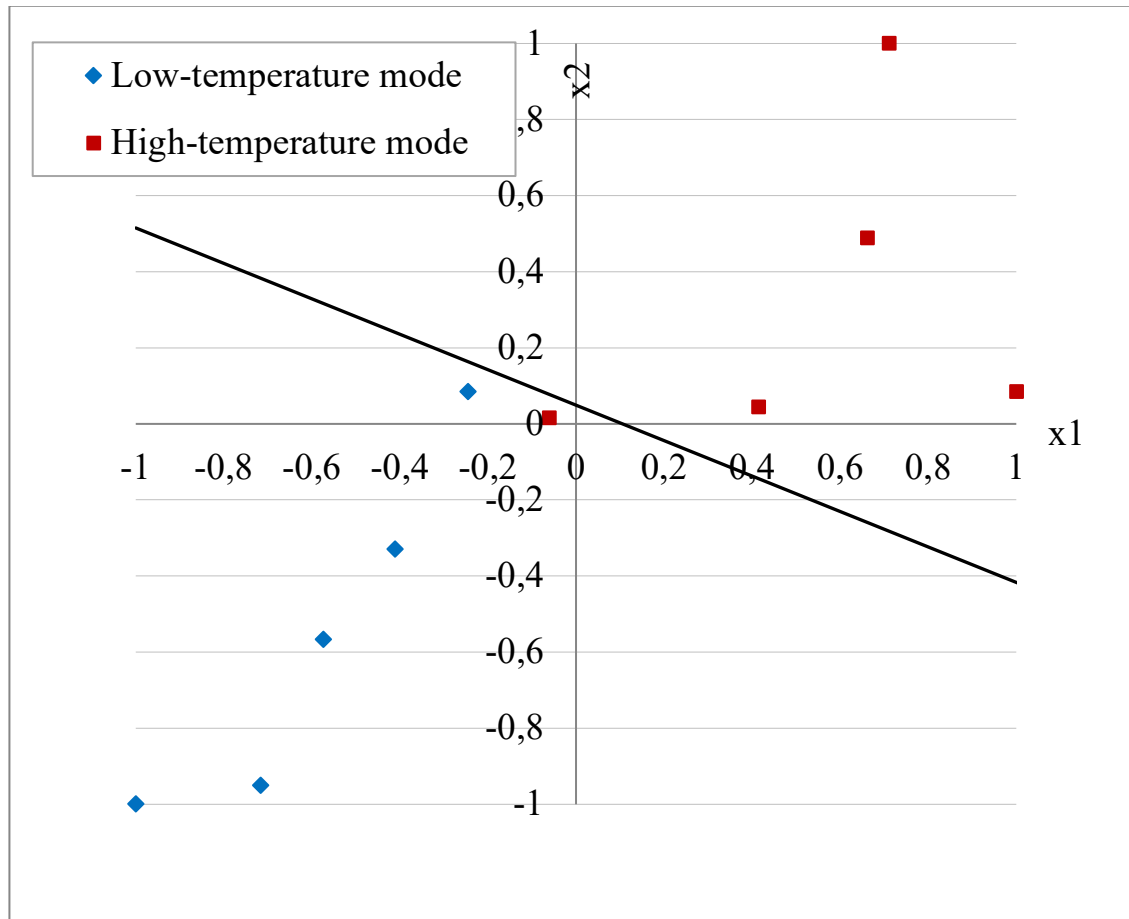


Рисунок 5.3 - Поділ класів на основі правила (5.10)

Правило (5.10) записано у нормованих значеннях. У натуральному вигляді воно представляється так:

$$10.279 \frac{(\text{SiO}_2) - 57.75}{18.43} + 22.061 \frac{(\text{CaO}) - 3.095}{1.015} \geq 1.086 \rightarrow \text{режим високотемпературний}, \quad (5.11)$$

$$10.279 \frac{(\text{SiO}_2) - 57.75}{18.43} + 22.061 \frac{(\text{CaO}) - 3.095}{1.015} < 1.086 \rightarrow \text{режим низькотемпературний}.$$

Правило у вигляді (5.11) дозволяє за даними аналізу шлаку на вміст у ньому SiO_2 та CaO визначити, чи вівся процес плавки на низькотемпературному режимі або на високотемпературному режимі. Для цього достатньо підставити в (5.11) фактичні значення вмісту SiO_2 и CaO .

Як видно з рис. 5.2, з десяти точок лише одна помилково віднесена до іншого класу – низькотемпературного режиму замість високотемпературного режиму. Це

дозволяє говорити про високу роздільну здатність отриманого правила – точність класифікації склала 90%. Тому правило (5.10) у нормованому вигляді або (5.11) у натуральному вигляді може бути ефективно використане для оцінки температурного режиму плавки, незважаючи на свою простоту. У практичному застосуванні це дозволяє оцінити, чи проходив процес плавки у температурному діапазоні $T=1200\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ или $T=1400\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім цього, можна говорити, що якщо плавка велася на низькотемпературному режимі, то довірчий інтервал вмісту компонентів шлаку SiO_2 и CaO , межі якого визначаються величиною $\pm \frac{ts}{\sqrt{N}}$, складає $46.88 \pm 6.62\%$ та $2.53 \pm 1.27\%$ відповідно. Якщо ж плавка велася на високотемпературному режимі, то довірчий інтервал становить $67.8 \pm 9.1\%$ для SiO_2 та $3.43 \pm 0.53\%$ для CaO відповідно. Тобто с ймовірністю $P=0.95$ при веденні плавки за температури $1200\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ вміст компонентів у шлаку становитиме $(\text{SiO}_2) = (40.26\text{--}53.5)\%$, $(\text{CaO}) = (1.26\text{--}3.8)\%$. При веденні плавки за температури $1400\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ вміст компонентів у шлаку становитиме $(\text{SiO}_2) = (58.7\text{--}76.9)\%$, $(\text{CaO}) = (2.9\text{--}3.96)\%$.

Застосування правила (5.11) дозволяє оцінити ризики хімічного зносу футеровки. Так, якщо виконується перша з умов (5.11), зростає ризик протікання реакції (5.1) і формування складних легкоплавких сполук, що включають окису заліза, кремнію і марганцю.

Отримані результати як діагностичного правила (5.11) обмежені діапазоном варіювання значень факторів. Тому при практичному застосуванні слід перевіряти, чи відповідає вміст шлаку за компонентами. SiO_2 та CaO у конкретній плавці цьому діапазону. Важливо також перевіряти відповідність закону розподілу вмісту шлаку за компонентами SiO_2 та CaO нормальному. Така умова може не завжди дотримуватися, тому може виникнути необхідність попереднього фільтрування даних, якщо вибірка даних велика. Звичайно, це є проблемою у реальних умовах виробництва. Важливо також вказати на недолік – правило побудоване за малою вибіркою даних, які були доступні. Це означає, що підвищення точності діагностичного правила може стати можливим шляхом розширення вибірки даних.

Таким чином, отримано діагностичне правило, що дозволяє оцінювати температурний режим індукційної плавки за доступними даними про вміст шлаку SiO_2 і CaO . Це правило має просту структуру і дозволяє отримувати досить точний прогноз – 90%. Встановлено, що при веденні плавки за температури 1200–1300 °C вміст компонентів у шлаку становитиме $(\text{SiO}_2) = (40.26\text{--}53.5) \%$, $(\text{CaO}) = (1.26\text{--}3.8) \%$. При веденні плавки за температури 1400–1500 °C вміст компонентів у шлаку становитиме $(\text{SiO}_2) = (58.7\text{--}76.9) \%$, $(\text{CaO}) = (2.9\text{--}3.96) \%$.

Отримане правило дозволяє також оцінити ризик хімічного зносу футеровки через розвиток реакції взаємодії вуглецю розплаву з кремнеземом футеровки (5.1) і формування легкоплавких сполук, що безперервно взаємодіють з футеровкою в процесі проходження фронту розплаву.

Визначення температурного режиму плавки за отриманим класифікуючим рівнянням у вигляді (5.11) дозволяє обрати рішення щодо можливості модифікування розплаву феросиліцієм ФС75 та феросілікобарієм ФС65Ба4 – в разі відповідності температурного режиму модифікування можливе, а в разі невідповідності потрібно регулювання температури перед операцією модифікування. Важливо враховувати, що не дотримання цієї вимоги може привести до невідповідності мікроструктури заданій, яка, як відзначалося вище, повинна мати максимум вмісту перліту в матриці без остаточного цементиту та рівномірно розподілений графіт мінімальних розмірів. Тобто в разі порушення температурного режиму модифікування не стане фактором керування структурами і механічними властивостями сплаву для корпусного литва. З точки зору практичного використання класифікуючого правила більш зручним є використання рівняння (5.10).

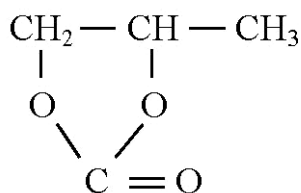
5.2 Вплив якості технологічних операцій при виготовленні стрижнів на геометричну точність центральних отворів в корпусних виливках

В разі виготовлення стрижнів за ХТС-технологіями ключову роль в формуванні якості стрижнів відіграє якість стрижнєвої суміші. Остання, своєю

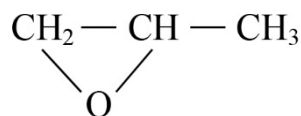
чергою, визначається як оптимальністю складу за комплексними критеріями якості, так і точністю виконання технологічної операції виготовлення суміші, зокрема дотримання точності дозування відповідно до оптимального складу суміші.

Будь-які відхилення можуть привести до геометричної неточності отворів у корпусних виливках, представники яких наведені на рис. 2.6, 2.7. Тому важливою задачею є оптимізація складу холоднотвердіючої стрижньової суміші (ХТС) та припустимих умов відхилень по вмісту компонентів за реалізацією функціональної схеми автоматизації дозування компонентів.

Для рішення цієї задачі за об'єкт дослідження було обрано моделі, що описують вплив рідкого скла та пропіленкарбонату, як затверджувача суміші, на її властивості, а саме: живучість, міцність на стиск через 24 години, обсипаність після 24 годин твердіння. Обґрунтованість вибору об'єкта пов'язана з тим, що досліджувані компоненти суміші знаходять велике практичне застосування в умовах, коли перехід на нові технологічні рішення є скрутним. Пропіленкарбонат являє собою складний, повний циклічний ефір пропіленгліколю та вугільної кислоти зі структурною формулою:

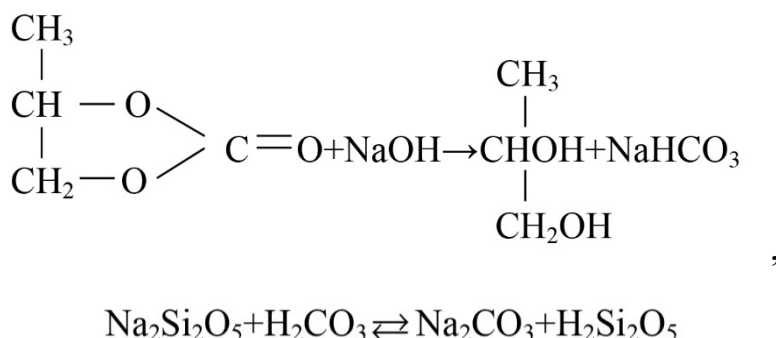


Синтезують пропіленкарбонат у присутності каталізатора з двоокису вуглецю та окису пропілену:

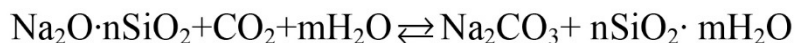


У хімічній промисловості пропіленкарбонат знаходить застосування для отримання побічних газоподібних продуктів, наприклад, H_2S при виготовленні

синтетичних волокон. застосування його у ливарному виробництві обумовлено тим, що при взаємодії його з рідким склом протікає гідроліз складного ефіру в лужному середовищі з утворенням пропіленгліколю та вугільної кислоти. остання, реагуючи з рідким склом, викликає утворення крем'яної кислоти та бікарбонату натрію. це відбувається на початковій стадії твердіння. бікарбонат натрію в процесі подальшого твердіння суміші реагує з лугом рідкого скла і перетворюється на одноводний карбонат натрію. описані реакції протікають за такою схемою:



або



На початковій стадії гелеоутворення, тобто в так званому індукційному періоді, рідинноскляні композиції з пропіленкарбонатом є слабоструктурованими рідинами з незначним градієнтом в'язкості. у міру перебігу реакцій після закінчення індукційного періоду в'язкість композицій різко зростає. це може бути пояснено поліконденсацією мономерів крем'яної кислоти, що утворилася в результаті взаємодії вугільної кислоти з рідким склом. таким чином, основним продуктом взаємодії рідкого скла з пропіленкарбонатом є кремнієва кислота $\text{Si}(\text{OH})_4$, що утворює кремнеполімер з високим ступенем поліконденсації, який є відповідальним за формування міцності формувальних та стрижньових сумішей.

Виявлення міцності суміші та інших її технологічних показників при використанні різних комбінацій у вмісті рідкого скла та пропіленкарбонату є головним завданням. отримані в процесі такого дослідження експериментальні дані можуть бути використані для побудови математичних моделей та знаходження оптимальних рішень щодо вибору складу формувальних сумішей, що задовольняє одному пріоритетному або кільком заданим властивостям. для цього потрібно на основі математичних моделей, що описують вплив вмісту компонентів суміші на її властивості, побудувати та провести аналіз поверхонь відгуків, зокрема стаціонарних областей на виявлення максимумів. для цього потрібно визначити характер стаціонарних областей залежно від властивостей сумішей з урахуванням канонічного перетворення поверхні відгуку кожного з досліджуваних властивостей, а також оцінити можливі зміни властивостей сумішей при відхиленнях у дозуванні рідкого скла та пропіленкарбонату.

Аналізувалися математичні моделі, отримані методом планування експерименту з урахуванням побудови центрального ортогонального композиційного плану повного факторного експерименту [96, 117]:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n, \quad (5.12)$$

$$a_i = c_2 [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, i = n+1, \dots, 2n, \quad (5.13)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_{\mu}^j x_{\lambda}^j y^j, i = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k, \quad (5.14)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{j=1}^N a_{n+i}. \quad (5.15)$$

В формулах (5.12)–(5.15) прийняті наступні позначення:

c_1, c_2, c_3 – коефіцієнти для лінійних, квадратичних та парних взаємозв'язків,

відповідно;

n – число лінійних членів рівняння;

N – число експериментів;

β – параметр, що розраховується залежно від кількості точок ядра композиційного плану 2^{n-p} , плеча «зіркових» точок α та числа точок плану за формулою:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N}. \quad (5.16)$$

Для аналізу стаціонарної області та опису поведінки вихідних змінних – властивостей ХТС з використанням як зв'язуючого рідкого скла, а як затверджувача пропіленкарбонату – виконувалося канонічне перетворення поверхні відгуку [40]. Перетворення здійснювалося за наведеною нижче процедурою.

1. Визначення координат стаціонарної точки x^* шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}. \quad (5.17)$$

2. Обчислення значення цільової функції у стаціонарній точці:

$$y^* = a_0 + 2a'x^* + x^{*'}Ax^*. \quad (5.18)$$

3. Визначення n власних значень $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = (-\lambda)^n + P_1 \lambda^{n-1} + \dots + P_n = 0. \quad (5.19)$$

4. Запис рівняння поверхні відгуку в канонічній формі:

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2. \quad (5.20)$$

Таким чином, в результаті перенесення та повороту осей та переходу від системи координат $(x_1; x_2)$ в систему координат $(\xi_1; \xi_2)$ забезпечується перетворення вихідного рівняння поверхні відгуку у вигляді (5.18) до канонічного вигляду

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2, \quad (5.21)$$

$$x = x^* + B\xi, \quad (5.22)$$

де B – матриця повороту; $B'B = I$, а різниця між значеннями вихідної змінної в довільній точці та стаціонарній точці, що описується рівнянням:

$$y(\xi) - y^* = \xi' L \xi. \quad (5.23)$$

Вихідними змінними властивостями суміші обрані:

- живучість суміші, хв – y_1 ;
- межа міцності на стиск, МПа (через 1 годину) – y_2 ;
- межа міцності на стиск, МПа (через 3 години) – y_3 ;
- межа міцності на стиск, МПа (через 24 години) – y_4 ;
- обсіпаність, % – y_5 .

Вхідними змінними є:

- x_1 – вміст рідкого скла, масова частина;
- x_2 – вміст пропіленкарбонату, масова частина.

Розрахунками отримано такі значення матриць коефіцієнтів у рівнянні (5.18) для обчислення значення цільової величини в стаціонарній точці:

- живучість суміші, хв:

$$a_0=14,623, \quad a=\begin{pmatrix} 0,208 \\ 0,083 \end{pmatrix}, \quad A=\begin{pmatrix} 0,0325 & 0 \\ 0 & -0,2175 \end{pmatrix};$$

- межа міцності на стиск, МПа (через 1 год):

$$a_0=1,166, \quad a=\begin{pmatrix} -0,094 \\ 0,151 \end{pmatrix}, \quad A=\begin{pmatrix} 0,068 & 0,0325 \\ 0,0325 & -0,112 \end{pmatrix};$$

- межа міцності на стиск, МПа (через 3 год):

$$a_0=2,388, \quad a=\begin{pmatrix} -0,083 \\ 0,213 \end{pmatrix}, \quad A=\begin{pmatrix} 0,1534 & 0,125 \\ 0,125 & -0,242 \end{pmatrix};$$

- межа міцності на стиск, МПа (через 24 год):

$$a_0=5,284, \quad a=\begin{pmatrix} 0,535 \\ -0,13 \end{pmatrix}, \quad A=\begin{pmatrix} -0,207 & 0,0275 \\ 0,0275 & -0,327 \end{pmatrix};$$

- обсипаність, %:

$$a_0=0,068, \quad a=\begin{pmatrix} -0,035 \\ 0,010 \end{pmatrix}, \quad A=\begin{pmatrix} 0,045 & -0,014 \\ -0,014 & 0,015 \end{pmatrix}.$$

Реалізацією процедури 1–4 отримані наступні результати у вигляді рівнянь, що описують поверхню відгуку у канонічній формі:

– для живучості суміші:

$$y - y^* = -0,2175\xi_1^2 + 0,0325\xi_2^2; \quad (5.24)$$

– для межі міцності на стиск, МПа (через 1 год):

$$y - y^* = -0,1178\xi_1^2 + 0,0736\xi_2^2; \quad (5.25)$$

– для межі міцності на стиск, МПа (через 3 год):

$$y - y^* = -0,2778\xi_1^2 + 0,1896\xi_2^2; \quad (5.26)$$

– для межі міцності на стиск, МПа (через 24 год):

$$y - y^* = -0,3333\xi_1^2 + 0,2013\xi_2^2; \quad (5.27)$$

– для обсіпаності, %:

$$y - y^* = 0,0097\xi_1^2 + 0,0504\xi_2^2. \quad (5.28)$$

Для визначення виду стаціонарної області можна здійснити аналіз співвідношень власних чисел. За величиною та знаком вони будуть визначати вид поверхні відгуку та вид відповідних двовимірних перерізів поверхні відгуку (нижче наводиться 4 варіанти двовимірних перерізів):– варіант 1 – гіперболи (стаціонарна точка – сідлова точка):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0;$$

– варіант 2 – гіперболи (стаціонарна точка – сідлова точка):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 > 0, \lambda_2 < 0;$$

– варіант 3 – еліпси (стаціонарна точка – максимум):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0;$$

– варіант 4 – еліпси (стаціонарна точка – мінімум):

$$|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0.$$

Аналіз рівняння, що описує стаціонарну область для живучості (5.24), дозволяє говорити про те, що в двовимірному перерізі є гіперболи. Таке відхилення не є критичним. Питання про величину відхилень значень живучості від локального максимуму в разі неточності дозування пропіленкарбонату щодо його локально оптимального значення може бути вирішено шляхом аналізу гребневих ліній [118].

Аналіз рівнянь (5.25)–(5.27), що описують стаціонарну область для межі міцності суміші, незалежно від часу контролю, дозволяє говорити про те, що всі висновки, зроблені щодо живучості, є обґрунтованими і щодо міцності суміші.

Інші висновки можуть бути зроблені щодо стаціонарної області, що описується рівнянням (5.28) для обсіпаності – відхилення у дозуванні у велику сторону і по пропіленкарбонату, і по рідкому склу, призводить до видалення значення обсіпаності від оптимального значення. Оскільки точка оптимуму є точкою мінімуму (варіант 4), цей варіант є неприйнятним. Відхилення у дозуванні пропіленкарбонату та рідкого скла в меншу сторону також викликає відхилення від оптимуму значення обсіпаності, проте в інший бік.

Отримані рішення можуть бути використані в автоматизованих системах приготування суміші для виготовлення стрижнів. Фрагмент такої загальної схеми лише на рівні умовного представлення контурів дозування компонентів може мати вигляд, показаний на рис. 5.3.

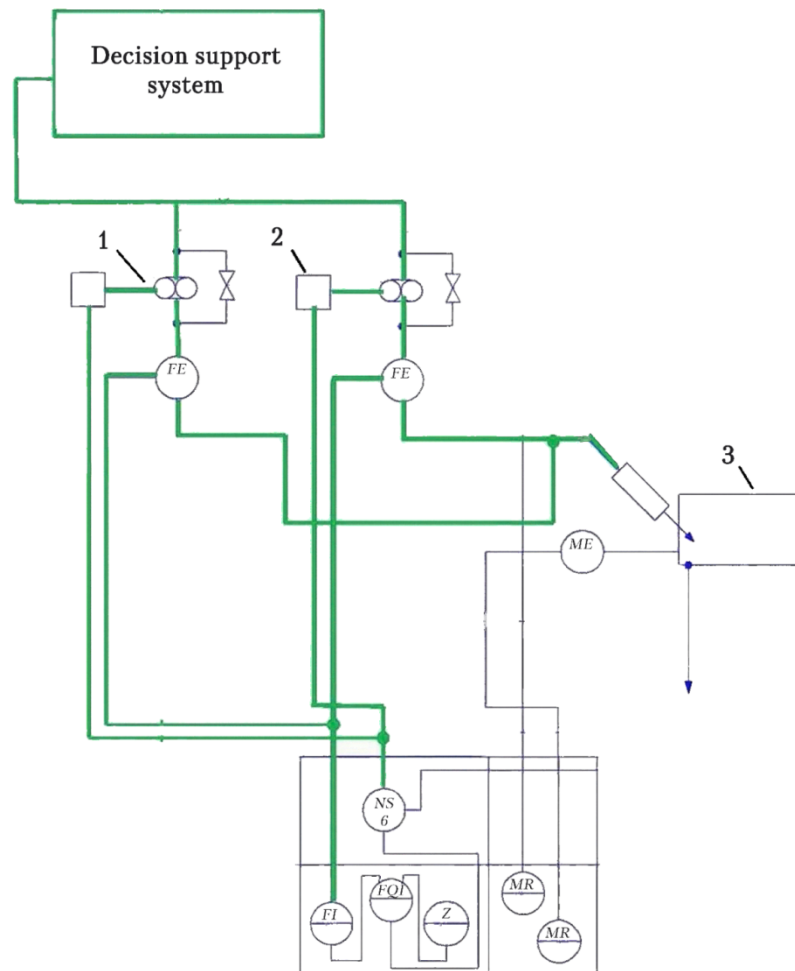


Рисунок 5.3 - Умовна функціональна схема дозування рідкого скла та пропіленкарбонату: 1 – контур дозування рідкого скла; 2 – контур дозування пропіленкарбонату; 3 – змішувач.

Забезпечення точності дозування знижує ризики погіршення якісних характеристик стрижнів, що, своєю чергою, знижує ризики розмірної та геометричної точності отворів в корпусних виливках.

5.3 Діагностика відповідності поршнів вимогам геометричної точності задля врахування на етапі зворотного зв'язку в схемі конструкторсько-технологічного проєктування

Відповідно до ключових вимог щодо виливків для шатунно-поршневої групи, які мають бути враховані в процесі проєктування (рис. 2.5), зворотний зв'язок в

схемі конструкторсько-технологічного проектування має бути спрямований на визначення можливостей забезпечення цих вимог конструкцією оснастки та технології виготовлення. Зокрема важливо проаналізувати виливок «поршень», що є представником корпусних виливків із складним внутрішнім отвором, від точності якого залежать експлуатаційні властивості (рис. 2.3). Геометрична точність отвору під шийку колінчастого валу та геометрична точність отвору під поршневий палець є також важливими з цієї точки зору. Тому метою відповідного дослідження було отримання класифікуючого правила, що дозволяє визначити, чи належить поршень до класу придатного, чи до класу браку за критерієм «зміщення осі отвору щодо осі поршня». Для досягнення цієї мети вирішувались такі задачі:

- визначити параметри простору ознак, що істотно впливають на класифікацію;
- обрати вид класифікуючого правила для системи підтримки прийняття рішень при виборі проектно-конструкторських рішень в рамках комп'ютерно-інтегрованої технології проектування литих поршнів.

Для дослідження застосовувалися параметричні методи класифікації, суть якої описана у роботах [119, 120], а досвід застосування виготовлення литих деталей, зокрема ДВЗ, – у роботах [99, 121]. Дані методи ґрунтуються на наступній процедурі.

Якщо m^A та m^B – математичні очікування вектора X для класов A і B , та коваріаційні матриці розподілу вектора X для класов A і B є рівними ($cov^A(X) = cov^B(X)$), щільність розподілу ймовірностей $p_A(X)$ і $p_B(X)$ можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} p_A(X) &= k e^{\left(-\frac{1}{2} (x - m^A)' cov^{-1}(x) (x - m^A) \right)} \\ p_B(X) &= k e^{\left(-\frac{1}{2} (x - m^B)' cov^{-1}(x) (x - m^B) \right)} \end{aligned} \quad (5.29)$$

де k – постійний множник.

Загальний вигляд класифікуючого правила:

$$\begin{aligned} x^j \in A \text{ если } F(A|x^j) &\geq y_0 \\ x^j \in B \text{ если } F(B|x^j) &< y_0. \end{aligned} \quad (5.30)$$

де $F(x^j)$ – дискримінантна функція, що визначається за рівнянням (5.31), а y_0 – порогове значення дискримінантної функції.

В такому випадку класифікуюче правило має загальний вигляд:

$$F(x) = x' \text{cov}^{-1}(x) (m^A - m^B) = \frac{1}{2} (m^A + m^B)' \text{cov}^{-1}(x) (m^A - m^B) - \ln \frac{P(A)}{P(B)}. \quad (5.31)$$

Показниками розмірної точності поршнів, що дозволяють віднести їх до придатного або з порушеннями геометричної точності, є діаметр базового пояска, биття діаметра базового пояска щодо осі головки поршня, висота торця базового пояска від торця головки, діаметр отвору під палець, конусоподібність і овальність отвору під палець, зміщення осі отвору. конструктивні характеристики. Деякі з них, за невідповідності заданим розмірам, можуть не тільки формувати порушення геометричної точності, а й викликати поломки різального інструменту, знижувати надійність металообробного обладнання. Для аналізу цих параметрів необхідно з урахуванням їх вимірів по партії готових деталей визначати статистичні характеристики – математичне очікування (M) та її середньоквадратичне відхилення (S). З отриманих результатів визначається фактична частка придатних виливків та виливків з порушеннями геометричної точності.

У таблиці 5.4 наведено деякі показники точності виготовлення поршнів на автоматичній лінії та фактична доля виливків з порушеннями геометричної точності.

Таблиця 5.4 - Деякі показники точності виготовлення поршнів на автоматичній лінії та фактична доля виливків з порушеннями геометричної точності

Конструктивний параметр	Поле допуска $\pm \delta$, мм	Розрахункові статистичні характеристики		Доля виливків з порушеннями геометричної точності, %
		М, мм	S, мм	
Діаметр базового пояска	$\pm 0,0095$	72,02	0,008	50
Биття діаметра базового пояска щодо осі головки поршня	$\pm 0,0215$	0,012	0,017	4
Висота торця базового пояска від торця головки	$\pm 0,05$	83,911	0,029	8,3
Діаметр отвору під палець	$\pm 0,005$	21,992	0,0014	0
Конусоподібність отвору під палець	$\pm 0,0025$	0,0001	0,0009	0
Овальність отвору під палець	$\pm 0,0025$	0,0013	0,0009	0
Зміщення осі отвору щодо осі поршня	$\pm 0,1$	1,452	0,061	18,9

Це завдання вирішувалось стосовно параметра якості «Зміщення осі отвору щодо осі поршня» («дезаксіал»). З таблиці 5.4 видно, що технологічний процес забезпечує величину порушення геометричної точності за заданим параметром 18,9%. Можна вважати, що збільшення цього показника неприпустимо. Якщо це відбувається, необхідно встановити, з яких причин воно сталося.

Проаналізувавши конструкцію поршня, можна дійти висновку, що основними факторами, що визначають взаємне розташування осей, є положення осі отвору під палець на виливку (тобто після її вилучення з кокіля) і готової деталі після механічної обробки. Положення осей отворів задається полем допуску відповідно

для виливки та готової деталі. Кінцеве положення осі отвору під палець у готовій деталі формується за рахунок відхилення осі отвору на виливку та в процесі механічної обробки. Фактичне положення осі отвору на виливку визначається ступенем зношування елементів оснастки, кокілю, випадковими похибками при складанні кокілю та установці стрижнів і т. п. Фактичне положення осі отвору на деталі визначається в основному похибкою налаштування верстата та зносом ріжучого інструменту.

Після побудови розмірного ланцюга неважко побачити, що найбільш суттєвими факторами, що дозволяють ідентифікувати причину порушення геометричної точності, є фактична величина дезаксіалу на готовій деталі та фактичний радіус отвору у виливку після вилучення з кокіля.

Для виявлення причин фактичних відхилень досліджуваного параметра від заданого значення необхідно провести обміри його фактичної величини на готових деталях «поршень» та відстані від осі поршня до крайньої точки отвору у виливку «поршень». З цих результатів розрахунком розмірних ланцюгів отримані фактичні відхилення осі отвори під палець у виливку від осі поршня і відхилення осі отвори в деталі «поршень» від осі поршня (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 - Фактичні положення осей отвору під палець у виливку та деталі «поршень» і величина порушення геометричної точності

Номер поршня	Відхилення осі отвору у виливку від осі поршня (X_1)	Відхилення осі отвору деталі від осі поршня (X_2)	Фактичний відсоток порушення геометричної точності
1	0,5	0,56	25,52
2	0,2	0,44	10,04
3	-0,1	0,13	31,08
4	-0,2	-0,22	11,45
5	0,4	0,58	11,45

6	0,6	0,72	13,6
7	0,1	0,045	20,95
8	0	0,03	13,6
9	0,3	0,21	43,33
10	0,7	0,7	50,04
11	-0,4	-0,24	43,33
12	-0,4	-0,595	90,82
13	0,5	0,35	50,04
14	-0,2	-0,28	13,6
15	0,2	0,27	13,6
16	0	0,24	16,86
17	0,1	0,28	31,08
18	0,4	0,325	20,95
19	0,7	0,48	87,9
20	-0,1	-0,1	16,85

З табл. 5.5 видно, що з деяких наборах значень X_1 і X_2 частка виливків з відхиленням осі отвору у виливку від осі поршня перевищує встановлену величину. Отже, необхідно збудувати межу, що відокремлює придатні поршні від тих, в яких має місце порушення геометричної точності.

Графік розподілу значення дискримінантної функції (5.31) наведено на рис. 5.4.

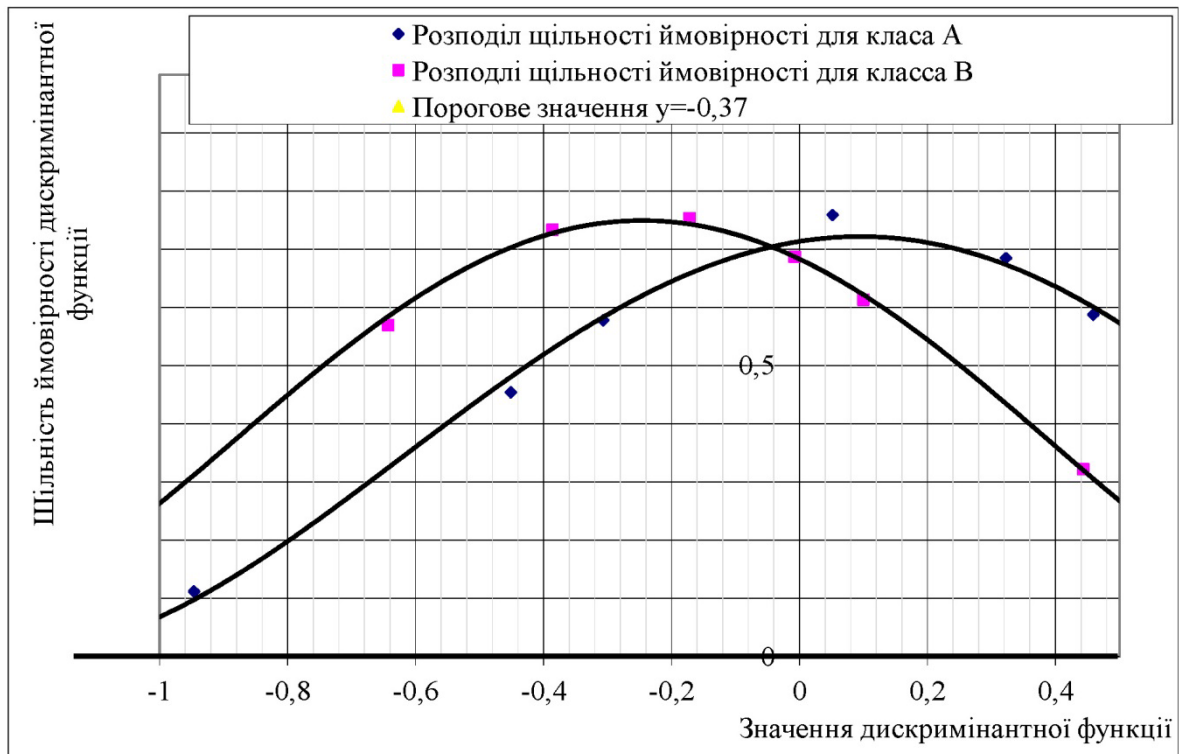


Рисунок 5.4 - Розподіл дискримінантної функції для класів А та В: клас А – поршні придатні, клас В – поршні з порушенням геометричної точності

Рівняння, що описує граничне значення, має вигляд

$$5,8024X_1 - 5,7286X_2 = -0,3708. \quad (5.32)$$

Графічно це рівняння описується прямою у координатах « $X_1 - X_2$ », що відокремлює набори значень параметрів простору ознак, що характеризують поршні як придатні, або з порушенням геометричної точності.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Визначено, що для забезпечення комплексу вимог до процесів плавки, зокрема технічних, економічних, екологічних, для виготовлення корпусного литва треба обирати плавку в індукційних печах, при цьому дуже важливо враховувати фізико-хімічні взаємодії у всій системі «розплав – футеровка – шлак». Якщо не зважати на ці взаємодії, то можуть виникнути ситуації зносу футеровки і прориву

розплаву. Ризики виникнення подібних ситуацій безпосередньо пов'язані з правильним вибором та контролем температурного режиму. Це обумовлює необхідність побудови діагностичного принципу оцінювання температурного режиму плавки чавуну в індукційній тигельній печі, для чого запропоновано в якості діагностичних параметрів обирати склад шлаку.

2. Отримане діагностичне правило, що дозволяє оцінювати температурний режим індукційної плавки за доступними даними про вміст шлаку SiO_2 і CaO . Це правило має просту структуру і дозволяє отримувати досить точний прогноз – 90%. Встановлено, що при веденні плавки за температури 1200–1300 °С вміст компонентів у шлаку становитиме $(\text{SiO}_2) = (40.26\text{--}53.5) \%$, $(\text{CaO}) = (1.26\text{--}3.8) \%$. При веденні плавки за температури 1400–1500 °С вміст компонентів у шлаку становитиме $(\text{SiO}_2) = (58.7\text{--}76.9) \%$, $(\text{CaO}) = (2.9\text{--}3.96) \%$. Отримане правило дозволяє також оцінити ризик хімічного зносу футеровки через розвиток реакції взаємодії вуглецю розплаву з кремнеземом футеровки і формування легкоплавких сполук, що безперервно взаємодіють з футеровкою в процесі проходження фронту розплаву. Визначення температурного режиму плавки за отриманим класифікуючим рівнянням дозволяє обрати рішення щодо можливості модифікування розплаву феросиліцієм ФС75 та феросілікобарієм ФС65Ба4 – в разі відповідності температурного режиму модифікування можливе, а в разі невідповідності потрібно регулювання температури перед операцією модифікування.

3. Визначено, що в разі виготовлення стрижнів за ХТС-технологіями ключову роль в формуванні якості стрижнів відіграє якість стрижньової суміші. Остання, своєю чергою, визначається як оптимальністю складу за комплексними критеріями якості, так і точністю виконання технологічної операції виготовлення суміші, зокрема дотримання точності дозування відповідно до оптимального складу суміші. Будь-які відхилення можуть привести до геометричної неточності отворів у корпусних виливках, що може призвести до формування браку корпусних виливків на технологічному етапі (зворотний зв'язок в схемі проєктування) та, як наслідок, до завищення витрат навіть при виборі оптимальної стратегії

проектування та технології виливку.

4. Вирішено задачу оптимізації складу ХТС по комплексу критеріїв: живучість суміші, міцність на стиск через 24 години, обсіпаність після 24 годин твердіння. Показано, що деякі з цих критеріїв є конфліктними, що унеможливорює одночасну максимізацію кожного з названих показників. Показано, як знайдені оптимальні рішення можуть бути використані в схемах автоматизації процесу приготування суміші з акцентом на те, що відхилення від оптимального дозування може призвести до втрати механічних властивостей стрижнів та, як наслідок, до формування браку з геометричної та розмірної точності.

5. Визначено, що для виливків для шатунно-поршневої групи зворотний зв'язок в схемі конструкторсько-технологічного проектування має бути спрямований на визначення можливостей забезпечення цих вимог конструкцією оснастки та технології виготовлення. Це можна зробити на основі аналізу виливку «поршень», що є представником корпусних виливків із складним внутрішнім отвором, від точності якого залежать експлуатаційні властивості. Відповідно, геометрична точність отвору під шийку колінчастого валу та геометрична точність отвору під поршневий палець є також важливими з цієї точки зору. На підставі цього формалізовано задачу класифікації: треба отримати класифікуюче правило, що дозволяє визначити, чи належить поршень до класу придатного, чи до класу браку за критерієм «зміщення осі отвору щодо осі поршня».

6. На основі формалізації задачі класифікації були запропоновані та визначені параметрів простору ознак, що істотно впливають на класифікацію, а також запропоновано та обґрунтовано вид класифікуючого правила для системи підтримки прийняття рішень при виборі проектно-конструкторських рішень в рамках комп'ютерно-інтегрованої технології проектування литих поршнів. Отримане класифікаційне правило представлено в лінійному вигляді та забезпечує можливість виокремлення наборів значень параметрів простору ознак, що характеризують поршні як придатні, або з порушенням геометричної точності. Це реалізує зворотний зв'язок в схемі конструкторсько-технологічного проектування для виливків шатунно-поршневої групи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача конструкторсько-технологічного проектування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву.

Отримані наступні основні результати:

1. Визначено науково-прикладні питання, які мають бути вирішені відносно до сучасних підходів до комп'ютерно-інтегрованого проектування конструкції виливків. Вони стосуються визначення можливостей кількісного оцінювання складності конструкції та технології виливків та врахування етапів відпрацювання обраних конструкторсько-технологічних рішень на етапі практичної реалізації з такими акцентами: визначення впливу конструкції виливку, обраного матеріалу, технології плавки та позапічної обробки, якості виготовлення суміші.

2. Визначено, що вибір варіанту проектування виливку має передбачати не лише наявність прямих зв'язків між окремими етапами проектування, але й зворотних зв'язків між ними. Запропонована схема конструкторсько-технологічного проектування виливків на основі зворотних зв'язків може бути взята за основу концепції раціонального конструкторсько-технологічного проектування виливків. Така схема включає в себе зворотній зв'язок по конструкторському етапу проектування та зворотній зв'язок по технологічному етапу проектування.

3. На основі запропонованої класифікації по представниках корпусних виливків та встановлених відповідно до них ключових показників, по яких має оцінюватись ефективність проектування, а також введення поняття технологічної гри, базуючись на теорії статистичних ігор, показано варіанти знаходження оптимальної стратегії проектування на основі формування таблиці S-гри, використовувати принцип мінімаксу та визначення усереднених витрат на реалізацію обраних проєктних рішень щодо конструкції виливку та технології їх виготовлення. Це дозволить обґрунтовано обирати стратегію конструкторсько-

технологічного проектування на основі мінімізації можливих витрат на реалізацію відповідних технологічних рішень

4. Запропонована процедура визначення програми випуску виливків на основі лінійно тренду планування дозволить визначати тип виробництва, як фактор, що впливає на вибір технології виливку. Продемонстрований принцип вибору на прикладі п'яти виливків різних масо-габаритних характеристик з різних сплавів дозволяє визначити загальну потребу у виливках на річну програму та, відповідно, тип виробництва по них, що базується на кількості необхідних виливків відповідної номенклатури, стабільності запитів на них та динаміці по запитах в умовах невизначеності стосовно плану виробництва, що формує запит на проектування технології виливків.

5. Запропонований принцип класифікації складових, що формують стратегію розробки технології виливку та проектування оснастки, базується на схемі з трьох складових: технології, матеріалів, конструкції. На прикладі корпусних виливків продемонстровано реалізацію цього принципу для визначення стратегії раціонального конструкторсько-технологічного проектування. На основі цього стає можливим вибір оптимальної стратегії проектування та відповідних конструкторсько-технологічних рішень щодо виливків.

6. В рамках реалізації зворотних зв'язків в схемі конструкторсько-технологічного проектування на основі комп'ютерного моделювання блок-картеру дизеля 4ДТНА1 з алюмінієвого сплаву встановлено, що при виборі схеми підводу ливникової системи знизу брак може становити 5–6 %. При виборі варіанту ярусної ливниково-живильної системи встановлено, що найбільш схильними до усадкових явищ є крайки порожнин циліндрів, верхня площина у передній частині блоку, у місцях кріплень під головку, масиви бобишок з боків блоку.

7. Встановлено, що використання модифікатора ФС65Ба4 разом із заходами конструкторського та технологічного характеру дасть змогу забезпечення прийнятної перлітної структури з відсутністю або мінімальним вмістом остаточного цементиту та розподілом графіту і його розмірів, що забезпечують необхідні механічні властивості. Такий підхід реалізує етапи «Розробка технології

виливку» та «Проектування оснастки» та «Виготовлення дослідної партії виливків» в схемі конструкторсько-технологічного проектування виливків на основі зворотних зв'язків.

8. Встановлено на основі комп'ютерного моделювання процесу твердіння виливку «Корпус» із середньовуглецевої сталі, який виготовляється литтям у разові піщані форми, що використання циліндричного надлишку прямокутного перерізу з жолобниками забезпечує повне поглинання усадкової раковини в місці встановлення надлишку. Використання надлишку круглого перерізу в місці установки не гарантує поглинання усадкової раковини. Визначальним чинником, що впливає на коефіцієнт приросту глибини усадкової раковини, є величина об'єму надлишку. Встановлено, що цей вплив може бути описаний залежністю логарифмічного типу із досить високим коефіцієнтом детермінації $R^2=0.82$.

9. Отримане діагностичне правило, що дозволяє оцінювати температурний режим індукційної плавки за доступними даними про вміст в шлаку SiO_2 і CaO . Це правило має просту структуру і дозволяє отримувати досить точний прогноз – 90%. Це дозволяє обрати рішення щодо можливості модифікування розплаву феросиліцієм ФС75 або феросілікобарієм ФС65Ба4 – в разі відповідності температурного режиму модифікування можливе, а в разі невідповідності потрібно регулювання температури перед операцією модифікування.

10. Вирішено задачу оптимізації складу ХТС по комплексу критеріїв: живучість суміші, міцність на стиск через 24 години, обсіпаність після 24 годин твердіння. Показано, що деякі з цих критеріїв є конфліктними, що унеможливорює одночасну максимізацію кожного з названих показників. Показано, як знайдені оптимальні рішення можуть бути використані в схемах автоматизації процесу приготування суміші з акцентом на те, що відхилення від оптимального дозування може призвести до втрати механічних властивостей стрижнів та, як наслідок, до формування браку з геометричної та розмірної точності.

11. Визначено, що для виливків для шатунно-поршневої групи зворотний зв'язок в схемі конструкторсько-технологічного проектування має бути спрямований на визначення можливостей забезпечення цих вимог конструкцією

оснастки та технології виготовлення. Це можна зробити на основі аналізу виливку «поршень», що є представником корпусних виливків із складним внутрішнім отвором, від точності якого залежать експлуатаційні властивості. Отримане класифікаційне правило, представлене в лінійному вигляді, забезпечує можливість виокремлення наборів значень параметрів простору ознак, що характеризують поршні як придатні, або з порушенням геометричної точності. Це реалізує зворотний зв'язок в схемі конструкторсько-технологічного проектування для виливків шатунно-поршневої групи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals*, 61 (2), 793–814. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>
2. ElMaraghy, W. H., Urbanic, R. J. (2003). Modelling of Manufacturing Systems Complexity. *CIRP Annals*, 52 (1), 363–366. doi: [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60602-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60602-7)
3. Joshi, D., Ravi, B. (2010). Quantifying the Shape Complexity of Cast Parts. *Computer-Aided Design and Applications*, 7 (5), 685–700. doi: <https://doi.org/10.3722/cadaps.2010.685-700>
4. Qamar, S. Z.; Arif, A. F. M.; Sheikh, A. K.: A new definition of shape complexity for metal extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156, 2004, 1734-1739.
5. Shehab, E. M.; Abdalla, H. S.: Manufacturing cost modelling for concurrent product development, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 17, 2001, 341-353.
6. Chougule R. G.; Ravi B.: Variant process planning of castings using AHP-based nearest neighbor algorithm for case retrieval, *International Journal of Production Research*, 43(6) 2005, 1255-1273.
7. Nagahanumaiah; Ravi B.; Mukherjee, N. P.: An integrated framework for die and mold cost estimation using design features and tooling parameters, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 2005, 1138-1149.
8. Trattner, A., Hvam, L., Forza, C., Herbert-Hansen, Z. N. L. (2019). Product complexity and operational performance: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 25, 69–83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.02.001>
9. Budiono, H. D. S., Kiswanto, G., Soemardi, T. P. (2014). Method and Model Development for Manufacturing Cost Estimation during the Early Design Phase Related

to the Complexity of the Machining Processes. *International Journal of Technology*, 5 (2), 183. doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v5i2.402>

10. Stavropoulos, P., Foteinopoulos, P., Papapacharalampopoulos, A. (2021). On the Impact of Additive Manufacturing Processes Complexity on Modelling. *Applied Sciences*, 11 (16), 7743. doi: <https://doi.org/10.3390/app11167743>

11. Samy, S. N., ElMaraghy, H. (2010). A model for measuring products assembly complexity. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23 (11), 1015–1027. doi: <https://doi.org/10.1080/0951192x.2010.511652>

12. Budiono, H. D. S., Hadiwardoyo, F. A. (2021). Development of product complexity index in 3D models using a hybrid feature recognition method with rule-based and graph-based methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (111)), 47–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227848>

13. Farineau, T., Rabenasolo, B., Castelain, J. M., Meyer, Y., Duverlie, P. (2001). Використання параметричних моделей на етапі економічної оцінки під час фази проектування. *Міжнародний журнал передових виробничих технологій*, 17 (2), 79–86. doi: <https://doi.org/10.1007/s001700170195>

14. Jones, T. J., Reidsema, C., Smith, A. (2006). Автоматизована система розпізнавання ознак для підтримки концептуального інженерного проектування. *Міжнародний журнал інтелектуальних інженерних систем, заснованих на знаннях*, 10 (6), 477–492. doi: <https://doi.org/10.3233/kes-2006-10606>

15. Zhang, X., Tong, S., Xu, L., Yan, S. (2007). Optimization of Low-Pressure Die Casting Process with Soft Computing. *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*. doi: <https://doi.org/10.1109/icma.2007.4303614>

16. Reilly, C., Duan, J., Yao, L., Maijer, D. M., Cockcroft, S. L. (2013). Process Modeling of Low-Pressure Die Casting of Aluminum Alloy Automotive Wheels. *JOM*, 65 (9), 1111–1121. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0677-1>

17. Zhang, C., Fu, Y., Wang, H., Hao, H. (2018). Multi-objective optimization of process parameters during low-pressure die casting of AZ91D magnesium alloy wheel castings. *China Foundry*, 15 (5), 327–332. doi: <https://doi.org/10.1007/s41230-018-8066-6>

18. Budiono, H. D. S., Nurdian, D., Indianto, M. A., Nugroho, H. S. (2022). Development of a process complexity index of low pressure die casting for early product design evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (120)), 101–108. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.264984>

19. Акімов О.В. Тенденції розвитку та застосування автоматизованих комп'ютерних систем для проектування та забезпечення якості ливарних виробів. // MicroCad-99, Збірник наукових праць межд. науково-технічної конференції. - Харків: Харк. держ. політехн. ун-т, 1999.

20. Акімов О.В., Гудзенко О.О. Застосування ЕОМ для розмірно-геометричного аналізу виливків // Праці міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", Харків, 1997, с.144-146

21. О.В.Акімов. Сучасний САПР у ливарному виробництві //Металообробка. Обладнання та інструмент для професіоналів № 1 (73), 2006, с. 32-35

22. О.В.Акімов. Сучасні системи автоматизованого проектування, інженерного аналізу та технологічної підготовки виробництва // Східноєвропейський журнал передових технологій. Вип. 6(12), 2004, с. 21-36.

23. В.І. Альохін, О.В. Акімов, А.П. Марченко Комп'ютерно-інтегроване моделювання ливарних процесів у блоці циліндрів Daewoo Sens. // Вісник НТУ «ХПІ» «Машинознавство та САПР», Вип.2, Харків, 2008р., с. 3-7.

24. Акімов О.В., Анацький Ю.П., Солошенко В.А. Аналіз власних коливань виливка блок-картера дизеля «СМД» // Вісник ХДПУ, Вип.66, Нові рішення у сучасних технологіях, Харків, 1999 р., 159с. - С.40-47.

25. О.В. Акімов Комп'ютерне моделювання фазового переходу та охолодження відливки блок-картера двигуна СМД. // Вип.75, Харків, 1999р., с.65-73

26. О.В. Акімов, В.А. Солошенко. Комп'ютерне моделювання залишкової напруги у виливку блок-картера дизеля «СМД» // "Вісник Харківського державного політехнічного університету", Вип. 117, Харків, 2000р., с. 34-36

27. Krasnokutskij, E. A. (2012). The simulation of crystallization in a metal mold cast parts. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (3)), 3–8. doi: 10.15587/2312-8372.2012.4867
28. Savchenko, Ju. Je. (2012). Use of computer-integrated systems and technology in the production of pistons. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (3)), 8–13. doi: 10.15587/2312-8372.2012.4868
29. Akimov, O. V., Koval', O. S., Puljaev, A. A., Dymko, E. P., Yehorenko, T. O., Vysockij, S. V. (2015). Quality improvement of cast parts of ice: accounting technological aspects of the automated foundry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (78)), 56–62. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56039
30. Yuliia Orendarchuk, Dmytro Marynenko, Serhii Borysenko, Irina Loek, Vladislav Anan'in (2017). Monitoring of castings quality for use in cad systems of foundry production technologies. *Scientific Journal «ScienceRise» №4(33)*, 48–52. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.99442>
31. Akimov, O. V. (2003). Analiz pogreshnostej formoobrazovanija otlivok koles turbin turbokompressorov dlja nadduva DVS na jetape izgotovlenija ih voskovyh modelej. *Vostochno-Evropejskij zhurnal передовyh tehnologij*, 3, 16–24. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2003_3_4
32. Носенко, Т. І. Адаптивне автоматизоване синхронізуюче проектування системи "виливок-піщана форма" НТІ [Текст] / Т. І. Носенко, Т. В. Лисенко, О. Л. Становський // Збірник наукових праць Одеської національної морської академії. – 2008. – № 13. – С. 82–88.
33. Кострова, Г. В. Методи самосинхронізації динамічних процесів САПР ливарного виробництва КГВ [Текст] / Г. В. Кострова, Т. В. Лисенко, А. А. Бондарь // Праці Одеського політехнічного університету. – 2009. – № 2 (32). – С. 7–10.
34. Aljohin, V. I., Belogub, A. V., Marchenko, A. P., Akimov, O. V. (2009). Komp'juterno-integrirovannoe modelirovanie litejnyh processov v avtomobil'nyh porshnjah na osnove konstruktorsko-tehnologicheskoy metodiki proektiro-vanija detalej DVS. *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. Kharkov: NTU «HPI», 2, 101–104.

35. Alyokhin V.I. Modelirovanie teplovogo i naprjazhenodeformirovannogo sostojanija porshnja s uchetom dislocirovannyh defektov usadochnogo haraktera / V.I. Alyokhin, O.V. Akimov, A.V. Belogub // Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnyh trudov. – 2010. – №19. – S. 12 – 18.

36. Alyokhin V.I. Metodologija rascheta detali porshnja na prochnost' v mestah dislokacii defektov usadochnogo haraktera / V.I. Alyokhin, A.V. Belogub, O.V. Akimov // Dvigateli vnutrennego sgoranija – 2010. – №2. – S. 62 – 65.

37. Alyokhin V. I. Raschet vlijanija dislocirovannyh litejnyh defektov usadochnogo haraktera na prochnost' litoj detali porshnja / V. I. Alyokhin, A. V. Belogub, O. V. Akimov // Litejvik Rossii. – 2011. – №4. – S. 16 – 19.

38. Alyokhin V.I. Issledovanie vlijanija razmerov litejnyh defektov na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja / V.I. Alyokhin, A.V. Belogub, O.V. Akimov // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2011. – №2. – S. 99 – 103.

39. Альохін В. І. Аналіз впливу технологічних дефектів на міцність литих поршнів ДВЗ / В. І. Альохін, О. В. Білогуб, О. В. Акімов // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2012. – № 1. – С. 96-98. Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64>

40. Demin, D. Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the «carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)» factor space in the range of $C=(3.425-3.563) \%$ and $Ceq=(4.214-4.372) \%$ // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 1, No. 1 (33). P. 24–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178>

41. Endo, M. Effects of small defects, matrix structures and loading conditions on the fatigue strength of ductile cast irons [Text] /M. Endo, K. Yanase // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2014. – Vol. 69. – P. 34–43. doi:10.1016/j.tafmec.2013.12.005

42. Cheng, Y. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete [Text] / Y. Cheng, F. Huang, W. Li, R. Liu, G. Li, J. Wei // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 118. – P. 164–170. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.020

43. Borsato, T. Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and

fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings [Text] / T. Borsato, F. Berto, P. Ferro, C. Carollo // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 2. – P. 3150–3157. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.393

44. Fourlakidis, V. A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron [Text] / V. Fourlakidis, A. Dioszegi // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 618. – P. 161–167. doi:10.1016/j.msea.2014.08.061

45. Bai, Y. Chemical Compositions, Microstructure and Mechanical Properties of Roll Core used Ductile Iron in Centrifugal Casting Composite Rolls [Text] / Y. Bai, Y. Luan, N. Song, X. Kang, D. Li, Y. Li // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2012. – Vol. 28, № 9. – P. 853–858. doi:10.1016/s1005-0302(12)60142-x

46. Demin, D. (2017). Synthesis of nomogram for the calculation of suboptimal chemical composition of the structural cast iron on the basis of the parametric description of the ultimate strength response surface. *ScienceRise*, 8, 36–45. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.109175>

47. Demin, D. (2018). Investigation of structural cast iron hardness for castings of automobile industry on the basis of construction and analysis of regression equation in the factor space "carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)". *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (41)), 29–36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.109097>

48. Thilak, G., Chandramohan, P., Saravanan, V. S. (2023). Influence of alloying elements and its effect on austempering of compacted graphite iron – A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.119>

49. Demin, D., Frolova, L. (2024). Construction of a logical-probabilistic model of casting quality formation for managing technological operations in foundry production. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 104–118. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003518>

50. Aubakirov, D. R., Issagulov, A. Z., Akberdin, A. A., Kvon, Sv. S., Kulikov, V. Yu., Arinova, S. K. et al. (2022). Influence of boron- and barium-containing modifiers on the structure of low-chromium cast iron. *Heliyon*, 8 (11), e11496. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11496>

51. Aguado, E., Ferrer, M., Larrañaga, P., Stefanescu, D. M., Suárez, R. (2019). The Effect of the Substitution of Silicon by Aluminum on the Properties of Lamellar Graphite Iron. *International Journal of Metalcasting*, 13 (3), 536–545. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-00303-y>

52. Frolova, L., Shevchenko, R., Shpyh, A., Khoroshailo, V., Antonenko, Y. (2021). Selection of optimal Al–Si combinations in cast iron for castings for engineering purposes. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 99–107. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001694>

53. Popov, S., Frolova, L., Rebrov, O., Naumenko, Y., Postupna, O., Zubko, V., Shvets, P. (2022). Increasing the mechanical properties of structural cast iron for machine-building parts by combined Mn – Al alloying. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 118–130. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002243>

54. Lysenkov, V., Demin, D. (2022). Reserves of resource saving in the manufacture of brake drums of cargo vehicles. *ScienceRise*, 3, 14–23. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002551>

55. Nikolaiev, D. (2022). Procedure for selecting a rational technological mode for the processing of cast iron melt on the basis of graphanalytical processing of the data of serial smeltings. *ScienceRise*, 5, 3–13. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002774>

56. Frolova, L., Barsuk, A., Nikolaiev, D. (2022). Revealing the significance of the influence of vanadium on the mechanical properties of cast iron for castings for machine-building purpose. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (1 (66)), 6–10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.263428>

57. Nikolaev, D. (2024). The choice of rational adjustment of the chemical composition of iron melted in an electric arc furnace on the basis of technological audit of serial films. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (76)), 22–26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.301259>

58. Коваль О. С. Технологічний аудит процесу модифікування чавуну для виливків автомобільної та дорожньої техніки / О. С. Коваль, Д. А. Дёмин, В. О. Костик // Технологический аудит и резервы производства — № 5/1(13), 2013. — с. 58–63.

59. Дослідження процесів формування металевого зв'язку в біметалічних виливках системи чавун – титановий сплав [Електронний ресурс] / А. А. Ригальов, П. С. Пензєв, В. С. Кузьмін [та ін.] // Литво. Металургія. 2025 = Foundry. Metallurgy. 2025 : матеріали 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 травня 2025 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.] ; заг. ред. О. І. Пономаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків ; Київ, 2025. – С. 238-239. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90585>

60. Селівьорстов В. Ю., Доценко Ю. В., Доценко Н. В. Дослідження впливу низькочастотної вібрації та модифікування на макроструктуру виливків зі сплаву АК7, що твердіють в кокілі. перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві. Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції 25–28 вересня 2017 року, с. 109–110.

61. Доценко Ю.В. Вплив комплексної технології на властивості виливків із сплаву АК7ч із підвищеним вмістом заліза / Ю.В. Доценко, В.Ю. Селівєрстів. Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2011. - № 6/5 (54). - С. 45 - 48.

62. Доценко Ю.В. Особливості затвердіння виливків з алюмінієвих сплавів при наростаючому тиску та модифікації / Ю.В. Доценко, В.Ю. Селівєрстів. Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2012. - № 1/5 (55). - С. 18 - 22.

63. Доценко Ю.В. Використання комбінованого на розплав системи Al-Si при затвердінні / Ю.В. Доценко, В.Ю. Селівєрстов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: «Нові рішення у сучасних технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 33 – С. 7 – 16.

64. Доценко Ю.В. Аналіз впливу газодинамічного тиску і модифікування на властивості виливків із ливарного сплаву А356/ Ю.В. Доценко, В.Ю. Селівьорстов, Н.В. Доценко, О.І. Дмитренко, А.І. Тоцька // Науковий журнал «Молодий вчений». - Херсон, 2015. - №1 (16). Частина I. - С. 10 – 12.

65. Selivyorstov V. The use of gas-dynamic pressure to improve the mechanical properties of aluminum casting alloys with high iron content / V. Selivyorstov, Y. Dotsenko, T. Selivyorstova, N. Dotsenko // Системні технології. Регіональний

міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (97). – Дніпропетровськ, 2015. – С. 68 – 74.

66. Dotsenko Yu. Influence of heterogtneous crystallization conditions of aluminum alloy on its plastic properties / Yu. Dotsenko, V. Selivorstov, T. Selivorstova, N. Dotsenko // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2015. - № 3 (147). – С. 46 – 50.

67. Effect of Additions of Ceramic Nanoparticles and Gas-Dynamic Treatment on Al Casting Alloys / K. Borodianskiy, V. Selivorstov, Y. Dotsenko, M. Zinigrad // Metals. - Basel, Switzerland, 2015. - [Volume 5](#), Issue 4 (December 2015). – P. 2277-2288.

68. Selivorstov V. Using gas-dynamic influence and modification to improve operational properties of the alloy SC51A / Selivorstov V., Dotsenko Y., Dotsenko N., Selivorstova T. // XVII International scientific conference. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. A collective monograph edited by Jarosław Boryca, Rafał Wyczółkowski. Series: Monographs No 56. Czestochova 2016. P.174-178.

69. Доценко Ю.В. Аналіз впливу обробки розплаву алюмінієвого ливарного сплаву А356 тиском і модифікуванням на властивості виливків / Ю.В. Доценко, В.Ю. Селівьорстов, Н.В. Доценко. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс]; матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 19 квітня 2016 р. / [редкол.: В.С. Богушевський (відпов. ред.) та ін.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – С.373-379.

70. Engelke, W. D. How to Integrate CAD/CAM Systems: Management and Technology (Mechanical Engineering) [Text] /W. D. Engelke. – CRC Press, 1987. – 400 p.

71. Zotov, A. A. Sovershenstvovanie tehnologii proektirovaniia tonkostennyh porshnei DVS s prinuditel'nym zazhiganiem [Text]: PhD thesis: 05.05.03 / A. A. Zotov. – Kharkov, 2010. – 150 p.

72. Lu, Y. Analysis of thermal temperature fields and thermal stress under steady temperature field of diesel engine piston [Text] / Y. Lu, X. Zhang, P. Xiang, D. Dong // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 113. – P. 796–812.

doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.11.070

73. Liu, X. F. Finite element analysis of thermo-mechanical conditions inside the piston of a diesel engine [Text] / X. F. Liu, Y. Wang, W. H. Liu // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 119. – P. 312–318.

doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.063

74. Ong, J. H. Steady state thermal analysis of a diesel engine piston [Text] / J. H. Ong // *Computers in Industry*. – 1990. – Vol. 15, № 3. – P. 255–258. doi:10.1016/0166-3615(90)90024-j

75. Zhang, H. Temperature field analysis to gasoline engine piston and structure optimization [Text] / H. Zhang, Z. Lin, J. Xing // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2013. – Vol. 48, № 2. – P. 904–909.

76. Spaniel, M. Diesel engine head steady state analysis [Text] / M. Spaniel, J. Macek, M. Divis, R. Tichanek // *International Journal of Middle European Construction and Design of Cars*. – 2003. – Vol. 2, № 3. – P. 34–41.

77. Tichanek, R. Steady state heat analysis of engine head [Text] / R. Tichanek, M. Spaniel, M. Divis // *International Journal of Széchenyi István University of Applied Sciences*. – 2003. – Vol. 20, № 3. – P. 74–75.

78. Akimov O.V. Nauchnyie osnovyi i metodyi kompyuterno-integrirovannogo resursnogo proektirovaniya lityih blok-karterov DVS / O.V. Akimov // *Nauchno tehnichestkiy zhurnal «Dvigateli vnutrennego sgoraniya»*. Harkov: NTU «HPI» – 2008. – №1. – S. 120 – 124.

79. Tehniko-ekonomichne obgruntuvannya neobhIdnostI derzhavnoYi pIdtrimki u vikonanni Innovatsiyno-Investitsiynogo proektu «Rozroblennya ta vprovadzhennya u virobnitstvo malolItrazhnogo avtomobilnogo dizelya potuzhnIsty 100 – 175 k.s. podvIynogo pryznachennya (Slobozhanskiy dizel)» [Tekst] : monografiya / za red. F. I. Abramchuka, O. V. Gritsyuka, I. A. Dmitrieva. – Harkiv : HNADU, 2012. – 164 s.

80. Alyokhin V. I. Raschet vlijanija dislocirovannyh litejnyh defektov usadochnogo haraktera na prochnost' litoj detali porshnja / V. I. Alyokhin, A. V. Belogub, O. V. Akimov // *Litejvik Rossii*. – Moskva. – 2011. – №4. – S. 16 – 19.

81. Alyokhin V.I. Issledovanie vlijanija razmerov litejnyh defektov na

naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja / V.I. Alyokhin, A.V. Belogub, O.V. Akimov // Nauchno tehniceskij zhurnal «Dvigateli vnutrennego sgoranija». Har'kov: NTU «HPI» – 2011. – №2. – S. 99 – 103.

82. E. Sapegina. Use of computer-integrated technologies of designing in foundry. Technology audit and production reserves – № 5/2(7), 2012, p. 61–62. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4850/4501>

83. Jiang, H., Zhang, X., Tao, C., Ai, S., Wang, Y., He, J., Yang, H., Yang, D. (2024). Casting defect region segmentation method based on dual-channel encoding-fusion decoding network. Expert Systems with Applications, 247, 123254. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123254>

84. Yousef, N., Parmar, C., Sata, A. (2022). Intelligent inspection of surface defects in metal castings using machine learning. Materials Today: Proceedings, 67, 517–522. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.474>

85. Li, N., Wu, Q., Jiang, A., Zong, N., Wu, X., Kang, J., Jing, T. (2023). Numerical research of gas-related defects for gray cast iron during sand casting. Materials Letters, 340, 134177. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134177>

86. Ponomarenko, O. I., Trenev, N. S. (2013). Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ICE. Technology Audit and Production Reserves, 6 (2 (14)), 36–40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19529>

87. Patil, M. A., Patil, S. D., Yadav, P. H., Desai, A. A. (2023). Methoding and Defect Minimization of Center Plate Casting by Auto-CASTX1 Software. Materials Today: Proceedings, 77, 662–672. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.286>

88. Li, Y., Liu, J., Zhang, Q., Huang, W. (2021). Casting defects and microstructure distribution characteristics of aluminum alloy cylinder head with complex structure. Materials Today Communications, 27, 102416. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102416>

89. Li, Y., Liu, J., Zhong, G., Huang, W., Zou, R. (2021). Analysis of a diesel engine cylinder head failure caused by casting porosity defects. Engineering Failure Analysis, 127, 105498. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105498>

90. Hodbe, G. A., Shinde, B. R. (2018). Design And Simulation Of LM 25 Sand

Casting For Defect Minimization. *Materials Today: Proceedings*, 5 (2), 4489–4497.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.018>

91. Frolova, L. (2023). Search procedure for optimal design and technological solutions to ensure dimensional and geometric accuracy of castings. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (69)), 18–25. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.271860>.

92. Application of liquid glass mixtures with reduced content of liquid glass as a factor in improving the quality of machine-building castings / Zinchenko P. S., Aksenenko M. P., Iovbak A. V., Orendarchuk Iu. V. // *ScienceRise*. 2016. Vol. 5, Issue 2 (22). P. 6–9. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69836>

93. Optimizaciia skladu formuvalnikh sumishei dlia avtomatizovanogo virobniictva litikh detalei dviguniv vnutrishnogo zgoriannia /Orendarchuk Iu. V., Krasnoukhova A. A., Achkasov I. O., Barsuk A. S., Golovko V. I. // *Visnik NTU «KHPI»*. 2016. Issue 50 (1222). P. 117–121.

94. Optimization of thermal drying of liquid glass mixture according to tensile strength criterion / Zinchenko P. S., Golinkov V. V., Starykh S. A., Stupar M. A. // *ScienceRise*. 2016. Vol. 6, Issue 2 (23). P. 9–13. doi: <http://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.69970>

95. Obtaining of locally optimal solutions by combining properties of mixtures for foundry manufacture / Dotsenko V., Boichuk V., Fedorenko V., Tsybul'skyi Y. // *EUREKA: Physics and Engineering*. 2018. Vol. 6. P. 48–53. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00795>

96. Kovalenko B. P., Demin D. A., Bozhko A. B. Optimizaciia sostava kholodnotverdeiushchikh smesei (KHTS) s propilenkarbonatom // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2006. Issue 6. P. 59–61.

97. Фразе-Фразенко, О. Алгоритм навчання нейронної мережі при розпізнаванні зображень [Текст] / О. Фразе-Фразенко // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2012. – Т. 4, № 1 (6). – С. 33–34. – Режим доступу: <http://dspace.oneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/259>

98. Unglert, K. Principal component analysis vs. self-organizing maps combined

with hierarchical clustering for pattern recognition in volcano seismic spectra [Text] / K. Unglert, V. Radic, A. M. Jellinek // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2016. – Vol. 320. – P. 58–74. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.014

99. Васенко, Ю. А. Вдосконалення технології отримання зносостійкого чавуну [Текст] / Ю. А. Васенко // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2012. – № 1 (3). – С. 17–21. – Режим доступе: <http://journals.uran.ua/tarp/article/viewFile/4870/4521>

100. Roberts, D. G., Hodge, E. M., Harris, D. J., Stubington, J. F. (2010). Kinetics of Char Gasification with CO₂ under Regime II Conditions: Effects of Temperature, Reactant, and Total Pressure. *Energy & Fuels*, 24 (10), 5300–5308. <https://doi.org/10.1021/ef100980h>

101. Kim, S. K., Park, C. Y., Park, J. Y., Lee, S., Rhu, J. H., Han, M. H. et al. (2014). The kinetic study of catalytic low-rank coal gasification under CO₂ atmosphere using MVRM. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (1), 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.03.027>

102. Demin, D., Domin, O. (2021). Adaptive technology for constructing the kinetic equations of reduction reactions under conditions of a priori uncertainty. *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 14–29. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001959>

103. EGES. Available at: <http://www.eges.com.tr/>

104. ABP Induction. Available at: <https://abpinduction.com/>

105. FOMET. Available at: <https://www.fomet.com>

106. Dymko, I., Muradian, A., Leheza, Y., Manzhula, A., Rudkovskyi, O. (2017). Integrated approach to the development of the effectiveness function of quality control of metal products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (90)), 26–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119500>

107. Demin, D. (2020). Constructing the parametric failure function of the temperature control system of induction crucible furnaces. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 19–32. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001489>

108. Stanovska, I., Duhanets, V., Prokopovych, L., Yakhin, S. (2021). Classification rule for determining the temperature regime of induction gray cast iron. *EUREKA:*

Physics and Engineering, 1, 60–66. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001604>

109. Mourad, A. (2016). Localization of vectors–patterns in the problems of parametric classification with the purpose of increasing its accuracy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (4 (82)), 10–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76171>

110. Aouati, M. (2017). Improvement of accuracy of parametric classification in the space of $n \times 2$ factors-attributes on the basis of preliminary obtained linear discriminant function. EUREKA: Physics and Engineering, 3, 55–68. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2017.00362>

111. Mourad, A. (2017). Parametric identification in the problem of determining the quality of desulfurization and dephosphorization processes of Fe-C alloy. Technology Audit and Production Reserves, 2 (1 (34)), 9–15. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.99130>

112. Mourad, A. (2017). Selection of state variables and algorithms of parametric identification of the object by its kinematic characteristics. ScienceRise, 4 (2), 37–41. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.99049>

113. Puliaiev A., Orendarchuk J., Akimov O., Penziev P., Marynenko D., Marchenko A. Development of a system for organizing a modular design and technological preparation for the production of cast iron pistons for internal combustion engines. Technology audit and production reserves – № 3/1(35), 2017, p. 23–27.

114. Насирова, В. А. Виявлення резервів підвищення якості корпусних виливків на основі комп'ютерно-інтегрованого проектування оснастки [Текст] / В. А. Насирова // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2013. – Т. 6, № 2 (14). – С. 41–43. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19531/17207>

115. Акімов О. В. Наукові основи конструкторсько-технологічного проектування литих деталей ДВЗ : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків, 2008

116. О. Б. Дьоміна. Використання методів операційного менеджменту в ливарному виробництві / Технологічний аудит та резерви виробництва – № 2(4), 2012, с. 35–44.

117. Demin D. Synthesis of optimal control of technological processes based on a multialternative parametric description of the final state // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, No. 4 (87). P. 51–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.105294>

118. Ю. В. Орендарчук, А. А. Красноухова, І. О. Ачкасов, А. С. Барсук, В. І. Головка. Оптимізація складу формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей двигунів внутрішнього згоряння // Вісник НТУ «ХП». 2016. №50(1222). – с. 117–121

119. Дьомін Д. О. Прийняття рішень у процесі керування електроплавкою з урахуванням факторів нестабільності технологічного процесу. Вісник національного технічного університету «ХП». – Харків : НТУ «ХП». – 2010. – № 17. – С. 67—72.

120. Дьомін Д. О. Ідентифікація чавуну для визначення раціональних режимів легування [Текст] / Д. О. Дьомін, А. Б. Божко, А. В. Зрайченко, А. Г. Некрасов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – №4/1(22). – С. 29-32.

121. Пономаренко О. І. Комп'ютерне моделювання процесів кристалізації як резерв підвищення якості поршнів ДВЗ [Текст] / О. І. Пономаренко, Н. С. Треньов // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2013. – № 6/2(14). – С. 36-40.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано наукові результати:

1. П. С. Пензєв. Визначення раціонального завантаження ливарного устаткування. *Technology audit and production reserves*. Харків: Технологічний центр, № 4/2(6), 2012. р. 29–30.
2. Puliaiev A., Orendarchuk J., Akimov O., Penziev P., Marynenko D., Marchenko A. Development of a system for organizing a modular design and technological preparation for the production of cast iron pistons for internal combustion engines. *Technology audit and production reserves*. Харків: Технологічний центр, № 3/1(35), 2017. р. 23–27.
3. П.С. Пензєв, В.І. Альохін, О.В. Акімов, О.В. Грицюк. Аналіз якості литого блок-картера автомобільного дизеля 4ДТНА1 з використанням інженерного моделювання. *Двигуни внутрішнього згоряння*. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. – № 2.
4. О. В. Акімов, П. С. Пензєв, Л. О. Салтиков, О.М. Горощенко. Проектування прогнозуємих структур перерізів виливка блок-картера циліндрів. *Вісник НТУ "ХПІ"*. Харків: НТУ «ХПІ», № 16 (1292), с. 3–8.
5. О. С. Коваль, П. С. Пензєв, Є. П. Димко, А. А. Пуляев. Управління якістю конструкційного чавуну для фасонних виливків на основі моделювання ефективності його модифікування. *Вісник НТУ "ХПІ"*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. №40 (1083). с. 138–145.
6. Penziev, P., Lavryk, Ye. (2024). Diagnostics of the temperature condition of cast iron melting in induction furnaces by the content of SiO₂ and CaO in slag. *ScienceRise*, 1, 14–20. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003558>.
7. Penzev, P., Frolova, L., Lysenkov, V., Lavryk, Y. (2024). Determination of the influence of the surplus construction on the parameters of the shrinkage shells in the «Body»-type steel castings when casting in single sand molds. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (1 (78)), 00–00. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310424> (Scopus).

8. Akimov, O., Alekhin, V., Penzev, P., Dyachenko, A., Ovcharenko, A. Analysis of technological factors that significantly affect the formation of stresses in the cast machine parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(78), 43–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56199> (Scopus).

9. Klymenko, S., Verkhovliuk, A., Sevoian, A., Akimov, O., Ponomarenko, O., Penziev, P. (2024). Determining rational complex modifying and alloying additives to improve the mechanical characteristics of gray cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(12 (132), 15–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318552> (Scopus).

Опубліковані праці апробаційного характеру

10. А. О. Потапов, А. А. Севоян, С. Д. Євтушенко, П. С. Пензєв, О. В. Акімов. «Вибір сплаву та обґрунтування технології виконання литих поршнів» Міжнародна науково-практична конференція «Литво-2025», 27-29 травня 2025 р., Харків- Київ – с.227. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90583>

11. А.А. Ригальов, П. С. Пензєв, В. С. Кузьмін, В. В. Радченко, О. В. Акімов. «Дослідження процесів формування металевого зв'язку в біметалічних виливках системи чавун – титановий сплав» Міжнародна науково-практична конференція «Литво-2025», 27-29 травня 2025 р., Харків- Київ – с.238. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90585>

12. І. О. Шевченко, С. Д. Євтушенко, П. С. Пензєв, О. В. Масалітіна, О. В. Акімов. «Вибір відновника оксиду титану для підвищення міцності зв'язку в біметалічній композиції чавун – титановий сплав» Міжнародна науково-практична конференція «Литво-2025», 27-29 травня 2025 р., Харків- Київ – с.303. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90591>

13. П.С. Пензєв. «Інженерне моделювання технологічних процесів лиття складних корпусних виливків на прикладі деталі-представника двигуну типу 4ДТНА1». Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія 2023» (10-12 жовтня 2023 р., м. Харків-м. Київ с. 172. <https://doi.org/10.15407/foundry-metallurgy-2023>

14. Пензєв П. С., Лаврик Є.Є., Лисенков В. Ю. «Вплив конструкції надлишків на формування усадкових раковин у сталевих виливках типу «Корпус». Неметалеві вкраплення і газу у ливарних сплавах. XVII Міжнародна науково-технічна конференція, Запоріжжя, 26-27 листопада 2024р. с. 42.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86203>
15. Євтушенко С.Д., Севоян А.А., Пензєв П.С., Акімов О.В «Теплоізоляція литих поршнів ДВЗ». Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. с. 382. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/9043>
16. Євтушенко, С. Д., Севоян, А. А., Пензєв, П. С., Масалітіна, О. В., Акімов, О. В., & Ян, В. «Ступінь змочування металів». Міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. с.383.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90434>
17. Масалітіна О. В., Пензєв П. С., Севоян А. А., Акімов О. В. «Дослідження утворення проміжного покриття титанової вставки». Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 вересня 2025 р. ; заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ : НТУУ "КПІ", 2025. – С. 377-378.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94664>
18. Пензєв П. С., Севоян А. А., Масалітіна О. В., Акімов О. В. «Обґрунтування матеріалу та конструктивних параметрів біметалічного поршня». Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 вересня 2025 р. ; заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ : НТУУ "КПІ", 2025. – С. 398-399. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94665>
19. Севоян А. А., Масалітіна О. В., Пензєв П. С., Акімов О. В. «Одержання біметалічної композиції чавун – титановий сплав». Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2025 : матеріали 17-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 вересня 2025 р. ; заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ : НТУУ "КПІ", 2025. – С. 427-429.
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94675>

ДОДАТОК Б

Акт впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Андрій МАРЧЕНКО



26 03 2026р.

АКТ

Впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи «Конструкторсько-технологічне проектування складних корпусних виливків з можливістю керування структурами і механічними властивостями сплаву» здобувача наукового ступеня доктора філософії аспіранта кафедри ливарне виробництво НТУ «ХПІ» Пензева Павла Сергійовича.

У період з 1 грудня по 15 грудня 2025 року комісія у складі голови завідувача кафедри ливарне виробництво професора Пономаренко О. І., доц. Берлізевої Т. В. та ст. викл. Петрової Ю. В. провела роботу по визначенню результатів використання науково-методичних положень дисертаційного дослідження Пензева П.С. в навчальному процесі при підготовці фахівців НТУ «ХПІ».

Результати дисертаційної роботи Пензева П.С. впроваджені в навчальний процес НТУ «ХПІ» та успішно використовувалися при викладанні курсів «Конструювання литих виробів та оснащення», «Системи та засоби автоматизованого проектування в ливарному виробництві» для студентів.

Голова комісії:

Члени комісії:

Ольга ПОНОМАРЕНКО

Тетяна БЕРЛІЗЄВА

Юлія ПЕТРОВА