

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Пристинський Сергій Володимирович

УДК 658.567-036.7:678.027.7(043)

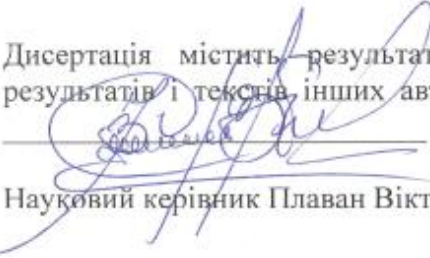
ДИСЕРТАЦІЯ

**«Технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних
композитів методом лиття під тиском»**

Спеціальність 161 – Хімічні технології та інженерія

Галузь знань 16 Хімічна інженерія та біоінженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник Плаван Вікторія Петрівна, доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Пристинський С.В. «Технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2024.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми в галузі виробництва виробів з пластмас, пов'язаної з необхідністю переробки багатокомпонентних сумішей відходів полімерних композиційних матеріалів за відсутності науково-обґрунтованої валідованої технології.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю поліпшення експлуатаційних властивостей пластикових деталей автомобілів та необхідністю зменшення обсягу відходів багатокомпонентних полімерних композиційних матеріалів шляхом розробки науково-обґрунтованої валідованої технології їх переробки методом лиття під тиском із збереженням основних властивостей виробів, показників ефективності виробництва. Це відкриває нові можливості для розробки та вдосконалення технологій переробки полімерів із покращеними показниками продуктивності, якості та фінансової ефективності, що сприяє позитивному впливу на екологічні аспекти.

Метою роботи є розробка технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском без їх попереднього розділення та розробка технології переробки полімерів для превентивного зменшення їх відходів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання: теоретичні дослідження фізико-хімічних особливостей процесу лиття пластмас під тиском та переробки утворених багатокомпонентних полімерних відходів; визначення впливу вмісту відходів PA6GF30/PC (Durethan BKV 30 H 3.0 – поліамід 6, Makrolon 2405 white – полікарбонат) у складі суміші на реологічні властивості шляхом проведення вимірів показника текучості розплаву (MVR) відповідно до

ISO 1133, фізико-механічні властивості шляхом визначення експериментальної густини та міцності при стисненні полімерних композиційних матеріалів за ISO 604 та морфологію багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів PA6GF30/PC методом оптичної поляризованої мікроскопії; визначення впливу складу суміші відходів полімерних композиційних матеріалів PA6GF30 та PC у співвідношенні 90/10% мас. на основні технологічні параметри процесу лиття пластмас під тиском та на його стабільність; вдосконалення технології отримання сировини з суміші відходів полімерних композиційних матеріалів співполімер акрилонітрил-бутадієн-стирол і полікарбонат (ABS/PC - «Bayblend T65XF») та PA6GF30/PC для подальшої переробки методом лиття під тиском шляхом розроблення концепції додаткового мобільного пристосування до литтєвої машини; розробка технології повторної переробки ABS/PC на основі дослідження механічних властивостей шляхом виміру сили зламу деталей отриманих методом лиття під тиском; превентивне зменшення відходів шляхом поліпшення технології переробки поліаміду 12 (PA12 - «RTP-299EX146375S-806906TRANSBLACK») методом лиття під тиском через регулювання експлуатаційних характеристик; розробка системного підходу до валідації та управління процесом переробки сумішей вторинних полімерних мультикомпонентних композиційних матеріалів методом лиття пластмас під тиском на основі міжнародних стандартів ISO9001, IATF16949, VDA6.3 за допомогою імплементації аспектів ощадливого виробництва; обґрунтування економічної доцільності впровадження технологій повторної переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів литтям під тиском шляхом оцінки фінансової ефективності.

Об'єкт дослідження: процес лиття сумішей полімерів з додаванням багатокомпонентних відходів.

Предмет дослідження: технології переробки багатокомпонентних відходів методом лиття пластмас під тиском.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні на основі системних досліджень закономірностей фізико-хімічних перетворень в процесі переробки багатокомпонентних відходів PA6GF30/PC залежно від складу суміші. Розроблено

системний науково-обґрунтований підхід до регулювання експлуатаційних характеристик полімерних матеріалів шляхом розробки технології їх переробки та до валідації процесу переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів.

При цьому вперше показано, що за переважаючого вмісту склонаповненого поліаміду (РА) в суміші РА6GF30/РС ймовірно відбувається часткова кополімеризація в результаті хімічної взаємодії з полікарбонатом (РС). Вірогідно, у випадку застосування склонаповненого РА в суміші з РС саме частки склонаповнювача виконують функцію своєрідного компатибілізатора. Вище значення показника текучості розплаву (MVR) і менша густина утвореного продукту може свідчити про нижчий ступінь кристалічності. Це дозволяє переробляти суміш не підвищуючи температуру без погіршення механічних властивостей.

Визначено, що за переважаючого вмісту полікарбонату в полімерній композиції вплив поліаміду нівелюється завдяки явищу інкапсуляції поліаміду в структурі полікарбонату, що чітко видно під час дослідження морфології сумішей. Суміш набуває характеристик полікарбонату, що супроводжуються поступовим підвищенням межі міцності при стисненні. З огляду на результати досліджень, можна рекомендувати до переробки литтям під тиском вторинну суміш РА6GF30/РС за складом 90/10, 80/20, 70/30% мас. За вказаних співвідношень компонентів зберігаються передбачувані фізико-механічні властивості готової продукції у поєднанні із оптимальними режимами переробки лиття під тиском.

Під час переробки литтям під тиском багатокомпонентних відходів полімерних композитів РА6GF30/РС за складом 90/10% мас., було встановлено збільшення значення тиску впорскування на 11% та подушки розплаву на 22% для суміші РА6GF30/РС в порівнянні з первинним РА6GF30. При цьому стабільність процесу склала 2,01 та зазнала не значущих змін в сторону зменшення в середньому на 1,63% і знаходиться в допустимих межах для автомобілебудівної промисловості ($C_{pk} \geq 2,0$). Показано збільшення часу сушки на 12,5% та температури сушки на 37,5% для підготовки вторинної суміші РА6GF30/РС до переробки литтям під

тиском. Для нівелювання цих втрат рекомендується додавати вторинну суміш PA6GF30/PC до 20% мас. до оригінальної полімерної композиції PA6GF30.

Створено концепцію додаткового пристосування до литтєвої машини для отримання гранул із багатокомпонентних сумішей полімерних композитів. Концепт продемонстрував придатність до використання, невеликі габаритні розміри та простоту конструкції, яка здатна до модернізації.

Доведено, що сила зламу полімерних деталей з ABS/PC під час переробки литтям під тиском не зазнала значного зменшення при повторному використанні подрібненої сировини, без суттєвих змін параметрів технологічного процесу. Регранульована вторинна полімерна суміш ABS/PC демонструє не значне збільшення сили зламу на $\approx 0,58\%$. Це в свою чергу доводить можливість отримати ресурсозберігаючу технологію та позитивно вплинути на екологічні аспекти. Рекомендується додавання подрібненої композиції ABS/PC до оригінального полімерного матеріалу до 50% мас., або регранульованої – до 80% мас.

Підтверджено, що основними факторами впливу при термообробці полімерів є температура і час перебування полімерної композиції в литтєвій формі. Експериментально доведено покращення експлуатаційних властивостей PA12, а саме стійкості до C_2H_5OH шляхом збільшення тиску впорскування на 31,4% та температури контурів системи охолодження литтєвої прес-форми на 10,6%, що забезпечило суттєве зростання (на 207,8%) стабільності процесу. Покращення якості деталей за сталих витрат у структурі собівартості виготовлення позитивно впливає на фінансову ефективність, а отже може забезпечити уникнення утворення відходів в процесі експлуатації виробів. Рекомендується проводити валідацію технологічного процесу отримання деталей з PA12 з оцінкою результатів визначення експлуатаційних та хімічних властивостей.

Встановлено, що використання системного підходу для менеджменту до вирішення проблем технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів має позитивний вплив на ключові показники технологічного процесу. Доведено, що використання основних принципів ощадливого менеджменту (Lean Management) забезпечило покращення показника всезагальної ефективності

менеджменту (OME) в середньому на 64%, що підтверджується зростанням комплексного ключового показника технологічного процесу лиття під тиском всезагальної ефективності обладнання (OEE) на 2,5% із коефіцієнтом кореляції 0,77. Це сприяє забезпеченню якості, зменшенню браку і частки утворення відходів полімерних матеріалів.

Доведена економічна доцільність впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів литтям під тиском шляхом оцінки фінансової ефективності. Встановлено, що додавання вторинної суміші 20% мас. PA6GF30/PC зі складом компонентів 90/10% мас. до оригінального полімерного матеріалу PA6GF30 забезпечує позитивні показники фінансової ефективності, що відповідають встановленим критеріям прийняття рішень. Показано високий рівень чистої поточної вартості NPV на рівні 1413 тис грн, що відповідає межі $NPV > 0$. При цьому період повернення інвестицій (PP) становив 2 місяці, що є меншим за умови $PP < 18$ місяців та прибуток на інвестиції ROI складає 2765,9% при визначеній межі доцільності $ROI > 230\%$.

Ключові слова: полімери, полімерні композити, полімерні деталі, обробка деталей, технологічні параметри, поліамід, полікарбонат, лиття під тиском, змішування, полімерні відходи, вторинна переробка, властивості матеріалів, змішування.

Список публікацій здобувача

1. Prystynskiy S. Adjusting the Performance Properties of Products Obtained by Injection Molding from Polyamide. *Chemistry & Chemical Technology*. 2023. № 17 (4). P. 836–845. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht17.04.836>. Scopus

2. Пристинський, С.; Будащ, Ю.; Плаван, В.; Шуляк, В. Вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском мультикомпонентних відходів полімерних композицій. *Технічні науки та технології*. 2022, № 4(30), 148-157, DOI : [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-148-157](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-148-157) **фахове видання**

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, збір та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, формування статті та підготовка її до друку.

3. Резанова, Н.М.; Будащ, Ю.О.; Плаван, В.П.; Коршун, А.В.; Пристинський, С.В. Регулювання стійкості рідких мікроструменів поліпропілену в матриці співполіаміду за рахунок нанодобавок. *Технології та інжиніринг*. 2021, № 2, 60-69, DOI : <https://dx.doi.org/10.30857/2786-5371.2021.2.6> **фахове видання**

Особистий внесок здобувача: аналіз джерел науково-технічної літератури, обговорення результатів експерименту, підготовка статті до друку.

4. Пристинський, С.В.; Будащ, Ю.О.; Ступа, В.І.; Пустовойт, І.О. Особливості переробки наповнених поліамідних композицій методом лиття під тиском. *Вісник КНУТД*. 2019, № 6(140), 71-80, DOI : <https://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.7> **фахове видання**

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, проведення експерименту, одержання та аналіз експериментальних даних, обговорення результатів, підготовка статті до друку.

5. Пристинський, С.В.; Будащ, Ю.О.; Резанова, Н.М. Оптимізація процесу лиття під тиском склонаповнених полімерних композицій на основі поліаміду. *Сучасний рух науки : тези доп. XII Міжн. науково-практ. інтернет-конф. (Дніпро, 1-2 квітня 2021 р.)*. 2021, Т. 2, 281-282.

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, проведення експерименту, збір даних та проведення аналізу, обговорення результатів, підготовка тез доповіді до друку.

6. Пристинський, С.В.; Будащ, Ю.О.; Плаван, В.П. Перспективи вторинної переробки багатокомпонентних відходів полімерів методом лиття під тиском *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали тез доп. XI Міжн. науково-практ. конф. (Чернігів, 26-27 травня 2021 р.)*: у 2 т. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка». 2021, Т. 1, 207-208

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, проведення експерименту, аналіз одержаних результатів, підготовка тез доповіді до друку.

7. Prystynskyi, S.; Budash, Yu. Validation of the injection molding process for the recycling of multicomponent waste polymers. *Science and innovation of modern world*. Processing of the 4th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2022, 173-176, URL : <https://sci-conf.com.ua/iv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-innovation-of-modern-world-21-23-12-2022-london-velikobritaniya-archiv/>

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, проведення експерименту, аналіз одержаних результатів, підготовка тез доповіді до друку.

8. Пристинський, С.В.; Плаван, В.П.; Шуляк, Р.О. Дослідження реологічних властивостей та морфології сумішей мультикомпонентних полімерних відходів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023)* : тези доп. XIII Міжн. науково-практ. конф. (Чернігів, 25-26 травня 2023 р.): у 2 т. Т. 1. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка». 2023, 345-347, URL : <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28076>

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, проведення експерименту, аналіз одержаних результатів, підготовка тез доповіді до друку.

9. Пристинський, С.В. Сучасні тенденції філософії бережливого виробництва (Lean) в світі та в Україні. *Дослідження проблем гуманітарних наук*. Київ : Київський нац. університет технологій та дизайну. 2020, 95-99.

10. Prystynskyi, S.V.; Plavan, V.P. Features of the processing the polymer mixture waste based on glass-filled polyamide. *Book of Abstract 21th Baltic Polymer Symposium (BPS 2023)*, Jelgava, Latvia, September 20-22, 2023, 73.

Особистий внесок здобувача: проведення експерименту, аналіз одержаних результатів, підготовка тез доповіді до друку.

11. Спосіб одержання термопластичної композиції для формування ультратонких синтетичних волокон : патент на корисну модель № 148645 Україна : D01F8/00. № u202101076 ; заявл. 03.03.2021 ; опубл. 01.09.2021, Бюл.

№ 35/2021. Резанова Н. М., Будащ Ю. В., Плаван В. П., Іщенко О. В., Пристинський С. В.

Особистий внесок здобувача: обробка отриманих експериментальних даних, огляд патентів, участь в оформленні заявки.

12. Prystynskyi, S.; Plavan, V.; Hrytsenko, A. Total Productive Maintenance as an approach to enhance technological processes and systems. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024): матеріали тез доп. XIV Міжн. науково-практ. конф. (Чернігів, 23-24 травня 2024 р.)* : у 2 т. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024, Т. 2, 335-337

Особистий внесок здобувача: постановка задачі дослідження, проведення експерименту та аналіз одержаних результатів, підготовка статті до друку.

ABSTRACT

Serhii Prystynskiy. «Technologies for the processing of multi-component waste of polymer composites by the injection molding». – Qualifying scientific work as a manuscript.

Doctor of Philosophy dissertation (specialty 161 - Chemical technologies and engineering). Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2024.

The dissertation is dedicated to the solution of an important scientific and applied problem in the field of production of plastic products, related to the need to process multicomponent mixtures of waste polymer composite materials in the absence of scientifically based and validated technology.

The urgency of the work is due to the need to improve the operational properties of plastic parts of autos and the need to reduce the amount of waste of multi-component polymer composite materials by developing a scientifically based and validated technology for their processing by the injection molding while preserving the main properties of the products, indicators of production efficiency. This opens up new opportunities for the development and improvement of polymer processing technologies with improved productivity, quality and financial efficiency, resulting in a positive impact on environmental aspects.

The purpose of the work is to develop a technology for processing multi-component waste polymer composites by injection molding without their prior separation and to develop a technology for processing polymers for preventive reduction of their waste.

To achieve the goal, the following tasks were solved: theoretical studies of the physico-chemical features of the plastic injection molding process and the processing of the multicomponent polymer waste produced; determination of the influence of the content of PA6GF30/PC waste (Durethan BKV 30 H 3.0 – polyamide 6, Makrolon 2405 white – polycarbonate) in the composition of the mixture on rheological properties by measuring the melt flow rate (MVR) in accordance with ISO 1133, physical and mechanical properties by determining the experimental density and compressive strength of polymer composite materials according to ISO 604 and

morphology of multicomponent waste of polymer composite materials PA6GF30/PC by optical polarized microscopy; determination of the influence of the composition of the mixture of waste polymer composite materials PA6GF30 and PC in the ratio of 90/10% wt. on the main technological parameters of the injection molding process and its capability; improvement of the technology of obtaining raw materials from a mixture of waste polymer composite materials copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene and polycarbonate (ABS/PC - "Bayblend T65XF") and PA6GF30/PC for further processing by injection molding by developing the concept of additional mobile adaptation to the injection molding machine; development of ABS/PC recycling technology based on the study of mechanical properties by measuring the fracture strength of parts obtained by the injection molding method; preventive reduction of waste by improving the processing technology of polyamide 12 (PA12 - "RTP-299EX146375S-806906TRANSBLACK") by the injection molding method through the regulation of performance characteristics; development of a systematic approach to the validation and management of the process of processing mixtures of secondary polymer multicomponent composite materials by the injection molding based on international standards ISO9001, IATF16949, VDA6.3 with the help of implementation of Lean production aspects; substantiating the economic feasibility of implementing technologies for the recycling of multi-component waste polymer composites by injection molding by evaluating financial efficiency.

The object of research: the injection molding of polymer mixtures with the addition of multicomponent waste.

The subject of the study: technologies for processing multicomponent waste by the method of injection molding.

The scientific novelty of the work consists in establishing, on the basis of systematic studies, the regularities of physico-chemical transformations in the process of processing multi-component waste PA6GF30/PC depending on the composition of the mixture. A systematic science-based approach to regulating the performance characteristics of polymer materials by developing a technology for their processing

and to validating the process of processing multi-component waste polymer composite materials has been developed.

At the same time, it was shown for the first time that partial copolymerization probably occurs as a result of chemical interaction with polycarbonate (PC) with a predominant content of inclined polyamide (PA) in the PA6GF30/PC mixture. Probably, in the case of the use of inclined PA in a mixture with PC, it is the particles of the glass filler that perform the function of a kind of compatibilizer. A higher melt flow rate (MVR) value and a lower density of the product formed may indicate a lower degree of crystallinity. This allows processing the mixture without increasing the temperature without deterioration of mechanical properties.

It was determined that with a predominant content of polycarbonate in the polymer composition, the influence of polyamide is leveled due to the phenomenon of polyamide encapsulation in the structure of polycarbonate, which is clearly visible during the study of the morphology of the mixtures. The mixture acquires the characteristics of polycarbonate, accompanied by a gradual increase in compressive strength. Based on the results of the research, it is possible to recommend the secondary mixture PA6GF30/PC with a composition of 90/10, 80/20, 70/30% wt. for processing by injection molding. Given the specified ratio of components, the expected physical and mechanical properties of the finished products are preserved in combination with the optimal processing modes of injection molding.

During the injection molding processing of multi-component waste polymer composites PA6GF30/PC with a composition of 90/10% wt., an increase in the value of injection pressure by 11% and melt cushion by 22% was established for the PA6GF30/PC mixture in comparison with the original PA6GF30. At the same time, the capability of the process was 2.01 and underwent insignificant changes in the downward direction by an average of 1.63% and is within the acceptable limits for the automotive industry ($Cpk \geq 2.0$). An increase in drying time by 12.5% and drying temperature by 37.5% was shown for the preparation of secondary mixture PA6GF30/PC for injection molding. To level these losses, it is recommended to add a

secondary mixture of PA6GF30/PC up to 20% wt. to the original PA6GF30 polymer composition.

The concept of additional adjustment to the injection molding machine for obtaining granules from multicomponent mixtures of polymer composites was created. The concept demonstrated usability, small overall dimensions and simplicity of design, which is capable of modernization.

It has been proven that the fracture strength of polymer parts from ABS/PC during injection molding processing did not undergo a significant decrease when the crushed raw materials were reused, without significant changes in the parameters of the technological process. The regranulated secondary ABS/PC polymer blend shows a slight increase in fracture strength by $\approx 0.58\%$. This, in turn, proves the possibility of obtaining resource-saving technology and positively influencing environmental aspects. It is recommended to add crushed ABS/PC composition to the original polymer material up to 50% wt., or regranulated - up to 80% wt.

It has been confirmed that the main influencing factors during the heat treatment of polymers are the temperature and the time the polymer composition remains in the injection molding tool. It was experimentally proven that the performance properties of PA12, namely resistance to C_2H_5OH , were improved by increasing the injection pressure by 31.4% and the temperature of the cooling system of the injection molding tool by 10.6%, which ensured a significant increase (by 207.8%) in the capability of the process. Improving the quality of parts at fixed costs in the structure of the cost of production has a positive effect on financial efficiency, and therefore can ensure the avoidance of waste generation during the operation of products. It is recommended to carry out validation of the technological process of obtaining parts from PA12 with an evaluation of the results of determining the operational and chemical properties.

It was established that the use of a system approach for management to solve the problems of the processing technology of multi-component waste polymer composites has a positive effect on the key indicators of the technological process. It is proven that the use of the main principles of Lean Management provided an improvement in the indicator of overall management efficiency (OME) by an average of 64%, which is

confirmed by the growth of the complex key indicator of the technological process of injection molding of overall equipment efficiency (OEE) by 2.5% from with a correlation coefficient of 0.77. This contributes to ensuring quality, reducing defects and the share of polymer waste generation.

The economic feasibility of implementing the technology of processing multicomponent waste polymer composites by injection molding has been proven by evaluating the financial efficiency. It was established that the addition of a secondary mixture of 20% wt. PA6GF30/PC with a composition of components 90/10% wt. to the original polymer material PA6GF30 provides positive indicators of financial efficiency that meet the established decision-making criteria. The high level of net present value of NPV is shown at the level of UAH 1,413,000, which corresponds to the limit of $NPV > 0$. At the same time, the return period of investment (PP) was 2 months, which is less than the PP condition of < 18 months, and the return on investment ROI is 2765.9% at the defined feasibility limit of $ROI > 230\%$.

Key words: polymers, polymer composites, polymer parts, processing of parts, technological parameters, polyamide, polycarbonate, injection molding, mixing, polymer waste, recycling, material properties, mixture.

ЗМІСТ

	АНОТАЦІЯ	2
	ABSTRACT	10
	ЗМІСТ	15
	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	18
	ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1	СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ЛИТТЯ	27
1.1	Регулювання властивостей полімерів, їх вплив на параметри технологічних процесів переробки пластмас методом лиття під тиском	27
1.2	Особливості регулювання експлуатаційних характеристик пластикових виробів отриманих методом лиття під тиском	30
1.3	Екологічні аспекти переробки відходів мультикомпонентних полімерних композиційних матеріалів методом лиття під тиском	33
1.4	Філософія LEAN Management та ощадливе виробництво	37
РОЗДІЛ 2.	МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	43
2.1	Методи дослідження стабільності процесу лиття пластмас під тиском	43
2.2	Методи дослідження фізико-механічних властивостей виробів отриманих методом лиття пластмас під тиском	46
2.2.1	Методи визначення сили зламу	46
2.2.2	Метод визначення міцності при стисненні полімерних композицій	50
2.2.3	Метод визначення експериментальної густини	53
2.3	Методи дослідження реологічних властивостей та морфології суміші полімерних композиційних матеріалів	54
2.4	Методи дослідження експлуатаційних характеристик виробів з полімерних композиційних матеріалів	57
2.5	Методи статистичної обробки даних	60
РОЗДІЛ 3	РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ МЕТОДОМ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ	62
3.1.1	Дослідження реологічних властивостей полімерних композицій із сумішей відходів полімерних композиційних матеріалів	62
3.1.2	Дослідження морфології полімерних композицій із сумішей відходів полімерних матеріалів	66

3.1.3	Дослідження впливу складу сумішей відходів полімерних матеріалів на фізико-механічні властивості отриманих полімерних композицій	69
3.2	Дослідження механічних властивостей деталей отриманих з оригінальних полімерних композиційних матеріалів та мультикомпонентних відходів полімерів методом лиття під тиском	71
3.3	Регулювання експлуатаційних характеристик полімерних виробів отриманих методом лиття пластмас під тиском	74
3.4	Обладнання та метод отримання гранул із подрібнених багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів	84
РОЗДІЛ 4.	ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ВАЛІДАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ МЕТОДОМ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ	89
4.1	Основні положення валідації процесу лиття пластмас під тиском	89
4.2	Теоретичні обґрунтування методу оцінки стабільності процесу та основного обладнання лиття пластмас під тиском	95
4.3	Особливості оцінки якості виробів з вторинних сумішей полімерних композиційних матеріалів в автомобілебудуванні	98
4.4	Вплив використання багатокомпонентних полімерних відходів на основні технологічні параметри та на стабільність процесу лиття пластмас під тиском	101
РОЗДІЛ 5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ	109
5.1	Теоретичне обґрунтування основних ключових показників лиття пластмас під тиском	109
5.2	Основні аспекти філософії бережливого виробництва (Lean) та Lean Management у підтримці технології переробки сумішей відходів полімерних композиційних матеріалів	112
5.3	Розробка системного підходу для менеджменту до вирішення проблем технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів	120

5.4	Фінансова доцільність впровадження технології переробки багатокomпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів	128
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	135
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	138
	ДОДАТОК А. Акт впровадження у виробничий процес результатів дисертаційної роботи	157
	ДОДАТОК Б. Список наукових праць за темою дисертації	159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РА – поліамід

РС – полікарбонат

ABS – співполімер акрилонітрил-бутадієн-стирол

GF – наповнені склом

MVR (ПТР) – показник текучості розплаву

OEE – всезагальна ефективність обладнання

ПФ – прес форма

p – довірчий інтервал

TRM – всезагальне обслуговування виробничого обладнання

STQ – критерії якості

C_{pk} – стабільність процесу

C_{mk} – стабільність машини

ppm – деталей на один мільйон

ПКМ – полімерні композиційні матеріали

РК – полікетон

ВСТУП

Одним з актуальних завдань в сучасній галузі автомобілебудування, де здійснюється виготовлення деталей автомобілей з полімерних композиційних матеріалів, є переробка утворених в процесі виробництва відходів. Це обумовлено встановленням певних обмежень і вимог задля збереження екосистем як в Європейському Союзі (ЄС) [1], так і в Україні. По мірі збільшення популярності пластмасових виробів, зростає і доля відходів, які повторно не переробляються.

Основною технологією отримання пластикових виробів в автомобілебудуванні є лиття пластмас під тиском. Останнім часом все більше застосовується багатокомпонентне лиття, яке поєднує декілька полімерних композицій в одному виробі. Це необхідно для досягнення певного набору функціональних характеристик вже в готовій продукції. Серед популярних полімерних композиційних матеріалів, які використовуються зокрема в перемикачах сучасних автомобілей можна виділити поліаміди (РА), полікарбонати (РС) та співполімер акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS). Вироби з РА, особливо склонаповненого (РА6GF30), поєднують з РС, що забезпечує відмінні фізико-механічні властивості і придатність виробу до тривалого використання. ABS використовують з РС, як один матеріал, що забезпечує дотримання вимог якості до поверхні виробу наряду із збереженими механічними властивостями. Також варто відмітити і потребу регулювання експлуатаційних властивостей виробів з РА12, як превентивний захід, направлений на уникнення утворення відходів.

В результаті переробки пластмас методом лиття під тиском, утворюються багатокомпонентні відходи полімерних композиційних матеріалів, які зазвичай не в повному обсязі переробляються через не достатньо вивчені та ресурсозатратні технологічні можливості. Необхідно зауважити, що відходи також утворюються і в процесі передчасного погіршення експлуатаційних характеристик полімерних виробів через не досконалу технологію їх отримання.

Саме тому **актуальність роботи** обумовлена необхідністю поліпшення експлуатаційних властивостей пластикових деталей автомобілів та необхідністю зменшення обсягу відходів багатокomпонентних полімерних композиційних матеріалів шляхом розробки технології їх переробки методом лиття під тиском із збереженням основних властивостей виробів та показників ефективності виробництва.

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

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну у рамках ініціативної теми «Розроблення методології валідації процесу лиття під тиском при переробці мультикомпонентних полімерних відходів». Державний реєстраційний номер: 0123U101270 (03.2023-12.2024).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка технології переробки багатокomпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском без їх попереднього розділення та розробка технології переробки полімерів для превентивного зменшення їх відходів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання:

- теоретичні дослідження фізико-хімічних особливостей процесу лиття пластмас під тиском та переробки утворених багатокomпонентних полімерних відходів;

- визначення впливу вмісту відходів PA/PC у складі суміші на реологічні, фізико-механічні властивості та морфологію багатокomпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів PA6/PC;

- визначення впливу складу суміші відходів полімерних композиційних матеріалів PA6 та PC на основні технологічні параметри процесу лиття під тиском та на його стабільність;

- вдосконалення технології отримання сировини з суміші відходів полімерних композиційних матеріалів для подальшої переробки методом лиття під тиском;

- розробка технології повторної переробки ABS/PC на основі дослідження механічних властивостей шляхом виміру сили зламу;
- превентивне зменшення відходів шляхом поліпшення технології переробки PA12 методом лиття під тиском;
- розробка системного підходу до валідації та управління процесом переробки сумішей вторинних полімерних мультикомпонентних композиційних матеріалів методом лиття пластмас під тиском.

Об'єкт дослідження: процес лиття під тиском сумішей полімерів з додаванням багатокомпонентних відходів.

Предмет дослідження: технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском.

Методологія дослідження. Для досліджень були використані технологічні відходи у вигляді ливників та бракованої продукції, які утворюються в процесі лиття пластмас під тиском з полімерних композиційних матеріалів в комбінації співполімер акрилонітрил-бутадієн-стирол і полікарбонат (ABS/PC) «Bayblend T65XF» (Covestro AG, Німеччина) та склонаповнений поліамід і полікарбонат (PA6GF30/PC) – Durethan BKV 30 H 3.0 black для поліаміду і Makrolon 2405 white для PC відповідно. Для оцінки експлуатаційних характеристик (хімічної резистентності) було використано поліамід 12 (PA12) від виробника «RTP Company» марки «RTP-299EX146375S-806906TRANSBLACK» (Німеччина). Подрібнення відходів з ABS/PC та PA6GF30/PC здійснювали на дробарці Rapid 200-48 (Швеція).

Механічні властивості отриманих виробів з багатокомпонентних відходів ABS/PC визначалися за силою зламу, яка вимірювалася на універсальній машині для випробування матеріалів ZWIK Roell VTI-FR2.5TH.140 (Німеччина). Модуль повздовжньої пружності визначали за допомогою машини для стиску типу ВПІ (Україна).

Морфологію екструдатів з вторинної суміші PA6GF30/PC визначали методом оптичної поляризованої мікроскопії на електронному мікроскопі Mitutoyo QS250Z (Японія). Реологічні властивості досліджувалися відповідно до

ISO1133 на обладнанні для вимірювання показників текучості розплаву MFI-1322 виробництва AMSE (Італія). Експериментальну густину визначали за допомогою аналітичних терезів ВЛР-200 (Україна).

Стабільність процесу переробки багатокомпонентних відходів полімерних композицій PA6GF30/PC (90/10% мас.) методом лиття пластмас під тиском та литтєвої машини досліджувалася за методикою *6SIGMA* відповідно до вимог міжнародного стандарту в галузі автомобілебудування IATF16949. Статистичні процесні дані отримувалися з програмного забезпечення литтєвої машини «Engel e-mac 310/180» «CC300» (Австрія) з програмного модулю «Q Table».

Габаритні розміри деталей для оцінки експлуатаційних характеристик вимірювали за допомогою цифрового мікрометра Mitutoyo 293-821 (Японія) із подальшою обробкою отриманих результатів та оцінкою стабільності технологічного процесу (C_{pk}) та стабільності литтєвої машини (C_{mk}) і відхилень від номінального значення. Зразки отримували на литтєвій машині ARBURG Allrounder 270S-350-60 (Німеччина). Побудову діаграм нормального розподілу та розрахунки, аналіз статистичних даних здійснювали за допомогою програми MS Excel.

Фінансове обґрунтування впровадження технології визначалося за оцінкою фінансової ефективності. Прийнятний для компанії термін повернення інвестицій – до 18 місяців. Аспекти Lean менеджменту досліджувалися шляхом збору даних з електронних протоколів MS Excel та порталу JIRA з оцінкою ефективності управління основними виробничими процесами з метою запобігання виникненню браку і як наслідок непередбачуваного збільшення частки відходів полімерних композиційних матеріалів.

Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей фізико-хімічних перетворень в процесі переробки багатокомпонентних відходів PA6GF30/PC залежно від складу суміші. При цьому вперше:

- показано, що за переважаючого вмісту PA в суміші PA6GF30/PC ймовірно відбувається часткова кополімеризація в результаті хімічної взаємодії з PC. Вірогідно у випадку застосування склонаповненого поліаміду в суміші з

полікарбонатом саме частки скло-наповнювача виконують функцію своєрідного компатибілізатора. Вище значення MVR і менша густина утвореного продукту може свідчити про нижчий ступінь кристалічності. Це дозволяє переробляти суміш не підвищуючи температуру без погіршення механічних властивостей;

- визначено, що за переважаючого вмісту полікарбонату в полімерній композиції вплив поліаміду нівелюється завдяки явищу інкапсуляції поліаміду в структурі полікарбонату, що чітко видно під час дослідження морфології сумішей. Суміш набуває характеристик полікарбонату, що супроводжуються поступовим підвищенням межі міцності при стисненні. З огляду на результати досліджень, можна рекомендувати до переробки литтям під тиском вторинну суміш PA6GF30/PC за складом 90/10, 80/20, 70/30% мас. За вказаних співвідношень компонентів зберігаються передбачувані фізико-механічні властивості готової продукції у поєднанні із оптимальними режимами переробки лиття під тиском.

Вперше розроблено системний науково-обґрунтований підхід до регулювання експлуатаційних характеристик полімерних матеріалів шляхом розробки технології їх переробки та до валідації процесу переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів.

Визначено ефект впливу використання оригінального, вторинного подрібненого та вторинного регранульованого полімерного матеріалу ABS/PC на механічні властивості деталей отриманих методом лиття пластмас під тиском. При цьому експериментально підтверджено, що сила зламу не зазнала значущих змін при використанні вторинного подрібненого ABS/PC у порівнянні із оригінальним матеріалом.

Зазнали подальшого розвитку:

- методологія оцінки придатності технології лиття пластмас під тиском шляхом використання методу *бСІГМА* для повторної переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів;

- метод регулювання експлуатаційних характеристик PA12 через зміну параметрів охолодження ПФ та швидкості впорскування під час лиття під тиском;

- метод визначення механічних властивостей вторинного полімерного композиційного матеріалу ABS/PC шляхом виміру сили зламу;

- методи оцінки процесу переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів литтям пластмас під тиском через визначення ключових та процесних показників.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском без попереднього їх розділення для отримання деталей для різноманітних промислових та побутових галузей, широке впровадження якої сприятиме зменшенню частки неперероблених відходів сумішей полімерних композиційних матеріалів, що матиме позитивний вплив на довкілля; а також зменшенню витрат на використання оригінальної сировини від 20 до 80% без втрат часу циклу. Використання системного підходу до валідації процесу лиття пластмас під тиском забезпечило зменшення рівня браку та втрат продуктивності. Це позитивно вплинуло на фінансові результати виробничої компанії Костал-Україна (Акт впровадження технології додається).

Розроблені методи оцінки процесу переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів литтям пластмас під тиском: ключові та процесні показники.

Впровадження Lean філософії в діяльність компанії Костал забезпечило зростання ефективності управління основними технологічними процесами. Реалізація технологічних процесів, направлених на превентивне зменшення частки неперероблених полімерних відходів із поліпшенням якості, як самих процесів, так і виробів, сприяє сталому розвитку компанії завдяки мінімізації основних типів втрат.

Розроблені практичні рекомендації для підприємства з іноземними інвестиціями ТОВ «Костал Україна» щодо процесу валідації серійного процесу

при запровадженні повторного використання багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів PA6/PC та ABS/PC, збільшивши використання вторинної сировини на 50%.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі сучасних наукових джерел, нормативно-технічної документації в напрямку досліджень; організації та участі у проведенні практичних експериментів, валідації, збору та обробці результатів з подальшим аналізом отриманих даних. Участь в отриманні зразків та матеріалів для виконання досліджень та поставлених задач для досягнення мети. Надання рекомендацій стосовно модернізації пристрою для отримання гранул з подрібненої вторинної сировини для литтєвої машини. Проведення випробувань з метою визначення експлуатаційних властивостей виробів. В практичних експериментах та дослідженнях, а також у проведенні мікроскопії, у визначенні морфології та реологічних властивостей із застосуванням відповідного обладнання брали участь працівники ТОВ «Костал Україна»: інженер-технолог Шуляк Роман Олександрович та Сарін Дмитро Олександрович. Визначення фізико-механічних властивостей суміші відходів PA/PC виконувалося на кафедрі фізики конденсованого стану Дніпровського державного технічного університету за участі к.т.н., доц. Анни-Марії Вадимівни Томіної. Постановка завдань та обговорення отриманих результатів проводилася разом із науковим керівником. Внесок здобувача в проведення досліджень і аналіз отриманих результатів був вирішальним.

Апробація матеріалів дисертації.

Результати досліджень дисертації демонструвалися та обговорювалися на 7 українських та міжнародних конференціях: «Сучасний рух науки»: XII міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 1-2 квітня 2021 р. Дніпро, Україна; «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021): XI Міжнародна науково-практична конференція (м. Чернігів, 26–27 травня 2021 р.); Всеукраїнська конференція «Дослідження проблем гуманітарних наук» КНУТД, Київ 2020; «Science and innovation of modern world». London, United Kingdom, 2022; «Комплексне забезпечення якості технологічних

процесів та систем (КЗЯТПС – 2023)»: XIII Міжнародна науково-практична конференція (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.); 21th Baltic Polymer Symposium (BPS 2023), Jelgava, Latvia, September 20-22, 2023; «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024)»: XIV Міжнародна науково-практична конференція (м. Чернігів, 23–25 травня 2024 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 наукових робіт, зокрема 3 статті у фахових виданнях, 1 стаття у зарубіжному виданні з науково-метричної бази Scopus, 1 патент на корисну модель, 7 тез доповідей на Всеукраїнських та Міжнародних конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Матеріали дисертації викладені на 160 сторінках і містять 49 рисунків, 27 таблиць, 2 додатки, 169 посилань на роботи вітчизняних і зарубіжних авторів на 20 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ЛИТТЯ

1.1. Регулювання властивостей полімерів, їх вплив на параметри технологічних процесів переробки пластмас методом лиття під тиском

Широке застосування полімерів пояснюється такими їх перевагами, як відносно низька вартість, низька щільність, висока стійкість до більшості хімічних речовин і простіші технологічні схеми виробництва. Їхні легкі та гнучкі конструкції мають вирішальне значення для застосування полімерів у більшості промислових і технологічних застосувань, таких як авіабудування, космічні дослідження, пакування та розумні біоматеріали. Властивості полімерів значною мірою залежать від типу мономерів та способу їх з'єднання, їхньої конформації та хімічних і фізичних властивостей. Хоча полімери охоплюють велику галузь, починаючи від еластомерів і закінчуючи реактопластами, їх еластичність, міцність, пластичність, ізоляційні властивості, оптичні та провідні властивості іноді потребують додаткового зміцнення. Полімери можна перетворити на різні типи композитів і знайти додаткове застосування в екологічних технологіях, виробництві енергії чи в біомедичній інженерії [2].

Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) набуває дедалі більшої популярності в різноманітних галузях виробництва від простих побутових речей до деталей аерокосмічної техніки завдяки унікальним властивостям [3], різноманітним можливостям переробки в тому числі і адитивним методом [4], який набуває популярності зараз. Тісний взаємозв'язок між структурою та властивостями різноманітних компонентів і умовами використання ПКМ [5] надає унікальності отриманим з них виробам. Останнім часом вироби з металів все частіше замінюються на вироби з полімерних композиційних матеріалів, зокрема в сучасних автомобілях «Tesla»[6], «Mercedes-Benz», «BMW» та ін.

Пластикові вироби, отримані із полімерних матеріалів методами лиття під тиском, екструзії чи 3D друку мають широкий комплекс властивостей, які

забезпечують ефективні експлуатаційні характеристики і рентабельність їх виробництва. Здатність полімерних матеріалів до модифікації дає змогу отримати продукти меншої маси із властивостями металів водночас простішими та ефективнішими методами переробки. Це сприяє зростанню тенденції використання ПКМ шляхом отримання композиційних матеріалів, які задовольняють високим вимогам безпеки експлуатації [7]. Крім того, ПКМ мають низку переваг над металевими композиціями, зокрема в теплопровідності [8]. Такий ефект досягається завдяки модифікації шляхом додавання компатибілізаторів та інших добавок в полімерну матрицю.

Особливо популярним стає використання полімерних матеріалів, наповнених різними природними та синтетичними наповнювачами. Такі композиції дають змогу отримати вироби із необхідними характеристиками та властивостями, знизити їх собівартість, підвищити ефективність виробничих процесів. Наприклад, вплив різних наповнювачів на можливості адаптації матеріалу до відбивання чи поглинання сонячного світла при створенні «розумних вікон» визначили Нye-NaKim та ShuYang [9].

Зокрема досліджені можливості використання таких наповнювачів, як кальцит, перліт, охра, скло та інших, а також визначений їх вплив на параметри технологічних процесів [10, 11, 12]. Визначений вплив армуючих волокон, як наповнювачів, на модуль Юнга та міцність на розрив наповнених полімерних композицій на основі поліаміду [13].

Пластики складають майже половину сучасного літака «Boeing 787 Dreamliner» [14], що свідчить про неперевершені їх можливості задовольняти найсуворіші вимоги до продукту наряду із високим рівнем фінансової ефективності. Це досягається завдяки можливостям і здатності технологічних процесів адаптуватися до сучасних умов, потреб й коливання світового ринку шляхом мінімізації всіх втрат і підвищенню продуктивності, придатності технологічних процесів та їх показників (PPI (ProcessPerformanceIndicators – Процесні Показники Продуктивності)).

Не менш важливим є і те, що полімери здатні цілком вирішувати складні сучасні задачі завдяки можливості комбінації матеріалів різних хімічних груп в одному виробі [15, 16]. Такі можливості сприяють покращенню експлуатаційних характеристик готового продукту для споживача, спрощують процес виготовлення, підвищують функціональність мехатронних систем.

У сучасному автомобілебудуванні все більш актуальним стає використання полімерних наповнених композицій, що зумовлено висуванням нових критеріїв якості продукту відповідно до IATF 16949:2016 [17], світових законодавчих актів, стандартів стосовно безпеки людини та навколишнього середовища DINENISO 14001:2015 [18]. З таких ПКМ виготовляються багато функціональних деталей для автомобілів: перемикачі різних призначень та бортові комп'ютери, деталі облицювання кузова автомобіля, панелі водія, дверні карти, деталі двигуна, деталі підвіски, декоративні накладки, оздоблення інтер'єру салону та багато інших виробів.

Отже, ПКМ широко використовуються в автомобілебудівній галузі як складові деталі майже всіх вузлів і механізмів, витісняючи відносно важкі металеві деталі. Розширення застосування пластмас в конструкції автомобіля виправдане тим, що в результаті знижується власна маса автомобіля, скорочуються витрати палива і знос деталей, і відповідно збільшується корисне навантаження. Зниження маси транспортного засобу забезпечує зменшення витрати пального. Це своєю чергою обумовлює до потенційне зменшення викидів відпрацьованих газів в атмосферу, що особливо актуально сьогодні.

В значній мірі вирішується проблема підвищення довговічності деталей і вузлів за рахунок корозійної стійкості пластмас, досягається зниження рівня робочих шумів та інші [19]. Все це відіграє ключову роль у виборі матеріалу, як зокрема для деталей кузова, які підлягають впливу зовнішніх істотних кліматичних та штучних чинників, так і деталей інтер'єру, які забезпечують комфорт для споживачів, що є також актуальним.

Використання термопластавтоматів дозволяє максимально автоматизувати процес виробництва та отримувати високоякісні полімерні вироби при низькому рівні собівартості [20].

Для зменшення часу циклу активно вивчаються та впроваджуються ефективні методи системи охолодження розплаву [21]. Це має позитивний вплив не лише на ефективність технологічного обладнання, а й на енергоресурси [22].

Особливу увагу приділяють вивченню реологічної поведінки розплавів наповнених полімерів з різним вмістом наповнювачів [23, 24]. Серед найуживаніших наповнювачів, які входять до складу полімерних композицій є скло. Додавання скла сприяє зміні реологічних властивостей та має вплив не лише на фізико-механічні характеристики, а й на параметри технологічного процесу лиття пластмас під тиском [25]. Використання скла у вигляді кульок дає змогу зменшити температуру переробки шляхом збільшення сили тертя у вузлах впорскування, що призводить до нагріву. Саме тому вимірювання текучості розплаву полімерних композицій знаходить широке використання, що сприяє оптимізації технологічних процесів переробки пластмас [26].

1.2. Особливості регулювання експлуатаційних характеристик пластикових виробів отриманих методом лиття під тиском

В залежності від сфери застосування, до продуктів, отриманих методом лиття пластмас під тиском, висувають низку різноманітних вимог, в тому числі і до експлуатаційних характеристик. Варто зазначити, що до виробів, які використовують у автомобільній промисловості висувають достатньо суворі вимоги, і вже готова продукція під час серійного виробничого процесу вибірково підлягає тестуванню на витривалість і надійність в процесі експлуатації. Однією з таких вимог є стійкість продукту до агресивного навколишнього середовища, зокрема до миючих засобів, кремів, розчинників та інших речовин. Це пов'язано з тим, що вироби піддаються впливу як природнього навколишнього середовища (клімат), так і штучного (миючі засоби, креми, консерванти та ін.). Саме тому регулювання таких спеціальних властивостей та характеристик виробів під час їх

отримання методом лиття пластмас під тиском дуже важливо. З огляду на те, що чимало продукції з пластмас вибраковуюються вже під час експлуатації, що потенційно впливає на рівень полімерних відходів, які важко піддаються повторній переробці, можливість управління властивостями готових виробів дуже важлива для навколишнього середовища.

Враховуючи цей фактор, достатньо уваги приділяється й якості отриманих деталей в тому числі і через порівняння якісних характеристик, зокрема таких як надійність, безпека [27], та експлуатаційних властивостей.

Експлуатаційні характеристики отриманих деталей та можливості їх регулювання за допомогою параметрів процесу лиття пластмас під тиском чи модифікації матеріалів активно вивчаються [28]. Також досліджується застосування двоступеневої системи оптимізації для досягнення ідеальних налаштувань технологічного процесу [29]. Зокрема експлуатаційні властивості регулюються параметрами системи охолодження прес форми, що позитивно впливає на якість продукту, зменшуючи тим самим деформацію конструктивних елементів [30]. Останнім часом висувують вимоги стосовно біорозпаду готового продукту після завершення терміну експлуатації, низьку міцність таких виробів можна покращити за допомогою різного роду модифікаторів [31]. Основна увага зосереджується на досягненні достатньо ідеального продукту зі збереженими чи покращеними властивостями за прийнятних виробничих параметрів процесів без втрат на час виготовлення.

Серед основних зовнішніх факторів, що впливають на виріб є дія різних полярних розчинників, які можуть змінювати структуру полімеру шляхом міжмолекулярної взаємодії [32]. Науковці пояснюють ефект розчинення, як взаємодію енергій між розчинником і полімером [33], як результат переходу із полімеру в мономер. Під час дії полярного розчинника, зокрема на поліаміди, можна спостерігати набухання та деформацію поверхні. Це, вірогідно пояснюється зміною співвідношення між кристалічної і аморфною областями в результаті перебудови водневих ланцюгів [34], а також високим рівнем гігроскопічності поліамідів та полярних розчинників, що також може мати вплив на водневі зв'язки.

Останні дослідження демонструють можливості зменшення енергетичних витрат шляхом уникнення перевантаження приводу механізмів впорскування за допомогою оптимізації режимів технологічного процесу [35-37].

Проводять дослідження і в галузі автомобілебудування із вивченням впливу певних параметрів процесу на експлуатаційні характеристики готового виробу [38]. Необхідно відзначити і те, що параметри процесу лиття пластмас під тиском впливають на резистентність отриманого виробу до дії хімічних речовин. Зокрема в наукових працях [39, 40] показано, що такі технологічні параметри як швидкість впорскування та температура ПФ впливають на морфологію, механічні властивості, й особливо мають вплив на хімічну стійкість, хоча цьому явищу не приділено достатньо уваги.

Армовані волокнами пластики широко використовуються в автомобільній промисловості завдяки їх легкій конструкції. Зокрема, високою популярністю користуються компоненти, виготовлені за допомогою лиття під тиском. На жаль, цей виробничий процес призводить до деяких недоліків у зв'язку із ускладненням адгезивного з'єднання. Ці недоліки можна усунути за допомогою правильного процесу попередньої обробки поверхні [41]. Авторами [42] визначений позитивний вплив обробки поверхні прес-форми лазером на якість впорскування при виготовленні деталей з поліаміду. Авторами [43] встановлено, що добавка нуклеатора, модифікованого полівінілпіролідом, сприяє підвищенню ступеня кристалічності поліаміду б та зменшенню розміру кристалітів. Такі зміни структури матеріалу зумовлюють підвищення його міцності на розрив. Це також може мати вплив на параметри технологічних процесів переробки та на властивості вже готового продукту.

Незважаючи на чисельні дослідження процесу лиття пластмас під тиском, не достатнім є вивчення впливу основних його параметрів на хімічні властивості та на стійкість до полярних розчинників виробів, отриманих з композицій на основі РА. Дослідження стійкості поліаміду до розчинників показано в науковій праці [44], де встановлено зменшення міцності на розрив та вигину при збільшенні часу

витримки поліаміду в органічних розчинниках, але перевага надавалася фізико-механічним характеристикам.

Вивчення експлуатаційних властивостей є важливим та необхідним кроком для покращення якості готового продукту не лише для максимального задоволення попиту споживача, а й для зменшення утворення відходів як в процесі виготовлення, так і під час використання.

Тим не менше, втручаючись у валідовані серійні параметри процесу, необхідно оцінювати стабільність (C_{mk}) як литтєвої машини, так і самого процесу (C_{pk}) лиття пластмас під тиском. Прийнятний рівень C_{mk} в галузі автомобілебудування має перевищувати 1,67 ($C_{mk} \geq 1,67$). Для C_{pk} приймається рівень більше 2,0 ($C_{pk} > 2,0$) [45].

1.3. Екологічні аспекти переробки відходів мультикомпонентних полімерних композиційних матеріалів методом лиття під тиском

За останні три десятиліття збільшення використання пластику швидко стає глобальною екологічною проблемою, що призводить до зростання звалищ і забруднення повітря та води. За даними деяких авторів [46] в США успішно переробляється лише 9% пластикових відходів. Автомобільна промисловість, як основний споживач пластикових матеріалів, починає брати на себе відповідальність, обіцяючи заходи щодо сталого розвитку [47]. При цьому економічні, організаційні, інфраструктурні, дизайнерські та технічні рішення можуть бути впроваджені.

Глобальні впливи не тільки призводять до посилення конкуренції; низка секторів, які значною мірою залежать від промисловості пластмас, також зазнають радикальних перетворень. В автомобільній промисловості відбувається радикальний процес трансформації та змін, оскільки розробляються нові, більш екологічні системи приводу, зокрема, перехід до електромобілів [48].

На даний час активно вивчаються можливості переробки сумішей полімерів методом лиття пластмас під тиском [49,50]. Окрім цього досліджується й вплив вторинної сировини на основні параметри процесу лиття під тиском. Зокрема

оцінюється вплив на стабільність та якість процесу і можливості вибору оптимальних параметрів [51], вплив на екологічні та фінансові аспекти з використанням каскадного підходу [52]. Приділяють увагу й механічним методам переробки відходів, які утворилися під час основних процесів виготовлення деталей з ПКМ [53], а також його оптимізація [54].

В автомобілебудуванні популярними є багатокомпонентні пластикові вироби. Завдяки таким продуктам вдається досягнути максимального рівня функціоналу готових виробів шляхом поєднання експлуатаційних властивостей в одній частині мехатронної складової. Можна виділити наявність таких компонентів в одній деталі, як PA6GF, який має також характерний вплив на параметри технологічного процесу [12] та PC, ABS та PC.

Подрібнюючи відходи чи некондиційну продукцію, зазвичай отримують суміш з цих ПКМ, яка не використовується повторно через складні і вартісні процеси сепарування та відсутність практичного досвіду.

Сьогодні кожна компанія, яка виготовляє деталі та готові вироби з ПКМ зіштовхується з проблематикою утилізації чи повторного використання відходів, особливо багатокомпонентних. Це пов'язано з тим, що сепарація є дороговартісним процесом і в більшості випадків є недоцільною до впровадження з точки зору фінансової ефективності. Масштаб проблеми спостерігається на прикладі компанії «CocaCola». За даними агенції BBC [55] «CocaCola» регламентує переробку лише 59% власних пластикових відходів, але залишається ще близько 40 мільярдів пляшок, які утворюються щороку, і які не використовуються повторно, що негативно впливає на стан екосистем.

Все це призводить до збільшення забруднення навколишнього середовища. Зважаючи на те, що директива Європейського Союзу (ЄС) вже з 2015 року вимагає від виробників автомобілів переробляти 95% відходів, компанії автомобільної індустрії отримують нові виклики, пов'язані з можливістю повторного використання полімерів без втрат основних властивостей після переробки пластмас методом лиття під тиском [56].

Важливим фактором для переробки багатокомпонентних відходів ПКМ є розуміння поведінки матеріалу під час його переробки, адже недостатньо вивчені властивості вторинної сировини ускладнюють хід процесу, що призводить до частих короткотривалих зупинок, які впливають на всезагальну ефективність обладнання (OEE – Overall Effectivity of Equipment) сучасного серійного виробництва.

Для прогнозування властивостей повторно отриманих сумішей застосовуються адитивні методи [57], а оцінка ступеню деградації чи термодеструкції полімерів дозволяє визначити можливість отримання готових виробів належної якості [58].

Потенційним рішенням проблеми вторинної переробки може бути розділення мультикомпонентних полімерних відходів з подальшою їх повторної переробкою. Основними технологічними методами розділення є наступні: флотаційний, хімічний, фізико-механічний, оптичний.

Розділення матеріалів у *флотаційному* методі [59] здійснюється шляхом спінування рідини з додаванням фосфатних реагентів – поверхнево-активних речовин (ПАР), які створюють піну, де відбувається розділення суміші полімерів з подальшою адсорбцією реагентів і вилученням окремих матеріалів. Незважаючи на ефективність, цей метод є технологічно складним і фінансово затратним.

Хімічний метод передбачає деполімеризацію полімерів – перетворення полімеру в мономери з подальшим їх використанням для переробки як первинного матеріалу [60]. У деяких випадках використовують розчинення одного з компонентів полімерної суміші шляхом використання селективних розчинників з подальшим розділенням і відновленням ПКМ з розчинника.

У *фізико-механічному* методі використовують сепарацію подрібнених відходів шляхом гравітації з подальшим розділенням різних компонентів полімерної композиції, які відрізняються за геометричною формою та розмірами. Цей метод демонструє достатньо високий рівень ефективності [61].

Оптичний метод широко застосовується для розділення відмінних за кольором ПКМ. Тут використовуються сучасні автоматизовані оптичні

інструменти перевірки (AOI – Automatically Optic Inspection), які на програмному рівні досить швидко визначають приналежність компонента, який проходить повз пристрій, до того чи іншого типу пластмаси.

Незважаючи на те, що зазначені методи сепарації ПКМ активно вивчаються і вдосконалюються, вони є малодоступними і не завжди практичними з міркувань високої вартості технологічного обладнання та обмежень, пов'язаних з різною природою полімерів.

Варто зазначити, що попри наявність сучасних технологій переробки, мультикомпонентні ПКМ все ще не в достатній мірі використовуються як вторинна сировина через наявність обмежених даних про можливості їх переробки. Поведінка суміші багатоконпонентних матеріалів вивчена не достатньо, що визначає необхідність проведення комплексу досліджень морфології та реологічних властивостей.

Вирішення проблеми накопичення відходів полімерних композицій, які утворюються в технологічному процесі, при проведенні обслуговування обладнання із плановою заміною деталей чи самого обладнання за рахунок повторного використання ПКМ [62-64] позитивно впливатиме на зменшення неперероблених відходів.

Відсутність розуміння впливу вторинних полімерних сумішей на стабільність процесу переробки, який має відповідати висунутим критеріям якості (CTQ – criteria to quality) [65], недостатній практичний досвід переробки сумішей різних полімерів, призводить до того, що частина відходів полімерних матеріалів не переробляються і не використовуються повторно. Ефективне вирішення проблеми з відходами полімерних композитів може бути досягнуто двома основними шляхами: через зменшення вже утворених відходів шляхом їх повторної переробки та заходами превентивного уникнення їх утворення.

Зменшення частки відходів можливе через оптимізацію менеджменту та зміни мислення [66], шляхом побудови ефективних стратегій управління відходами [67]. Важливу роль також відіграють соціо-культурні аспекти. Деякі автори [68] вважають, що поведінка суспільства стосовно поводження з пластиковими

відходами залишається мало вивченою та важко підлягає коригуванню через певні укорінені звички, які сформувалися в далекому минулому. Серед технологічних перспектив зменшення відходів пластику можна виділити фотокаталітичний процес, механізм якого передбачає селективне перетворення зв'язків С-С та С-Н [69]. Не менш популярними є методи повторного використання полімерів як будівельної сировини [70]. Зменшити відходи також можна за рахунок покращення рівня якості виробів шляхом оптимізації параметрів лиття пластмас під тиском [71].

Для запобігання зростанню частки неперероблених відходів полімерних композитів необхідно запроваджувати такі стратегії управління технологічними процесами, які б забезпечували необхідну якість виробничих систем, превентивно зменшували обсяг відходів. За даними останніх досліджень, до 2030 року прогнозується зростання рівня забруднення екологічних систем пластиком до 53 мільйонів тон на рік. В якості рішення пропонують розглянути проблему з точки зору глобальної трансформації економіки пластику [72]. Лише у Європейському Союзі прогнозують обсяг утворення відходів 17 мільйонів тон на рік, що спонукає вже зараз розробляти заходи щодо мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище [73]. Одним із важливих аспектів уникнення відходів ПКМ є поліпшення якості як технологічних процесів, так і експлуатаційних характеристик виробів шляхом розробки ефективних технологій переробки відходів.

В Україні наряду із розвитком та розширенням виробництва деталей з ПКМ, також існує проблема переробки відходів [74, 75], зокрема за рахунок сталого розвитку бізнесу в контексті концепції «ZeroWaste» [76]. Проте вторинне використання полімерів залишається актуальним та потребує подальшого дослідження.

1.4. Філософія LEAN Management та ошадливе виробництво

Методи та філософія ошадливого виробництва (Lean) відіграє ключову роль у побудові, впровадженні та підтримки технологічних процесів, в тому числі і лиття пластмас під тиском. Аспекти Lean вперше широко почали застосовуватися в Японії на автомобілебудівних заводах, зокрема марки Toyota, яка тільки починала

конкурувати із виробниками зі Сполучених Штатів Америки (США). В той час в США панувала методика масового виробництва за директивами Генрі Форда та Ф. Тейлора. Ефективним вважалося отримувати від процесу та людського ресурсу максимум продуктивності. Це призводило до певних втрат у стабільності та придатності технологій. Натомість японські виробники приділяли більше уваги зменшенню втрат. Так впродовж 1954-1958 рр. з'явилася перша в світі виробнича система «ToyotaProductionSystem», основи якої лише на початку 1990-х років починали закладати в свої виробничі системи й провідні європейські високотехнологічні компанії. В світі лиття пластмас під тиском створення та впровадження процесів будування литтєвих машин чи отримання ПКМ також застосовуються основні принципи Lean. Серед відомих виробників обладнання для лиття пластмас під тиском можна виділити наступні: «ENGEL», «Arburg», «Demag» та інші. Серед виробників полімерних матеріалів – «BASF», «BAYER» та інші.

Останнє десятиліття в Україні також набирає популярності впровадження Lean філософії у виробничі процеси. Це пов'язано із бажанням України вступити до ЄС, де ринок є насиченим, має суворі критерії якості та постійну конкуренцію.

Дослідженням процесів впровадження Lean, а також проблем, які виникають при впровадженні цієї концепції, займалися українські науковці [77, 78, 79], але в основному розглядалися питання проблем менеджменту. Проте, більш широко дослідження Lean провадяться закордонними вченими [80, 81]. Серед видатних науковців в цій галузі можна виділити Джефрі К. Лайкер, Таїті Оно, Фредерік Тейлор.

Одна з проблем успішності застосування Lean полягає в тому, що цю філософію розглядають, як набір інструментів менеджменту, а не спосіб мислення, хоча творці даної філософії брали за мету зміну культури та цінностей, світогляду та менталітету, а фінансові досягнення є результатом цих змін та трансформацій в суспільстві. В наукових працях [82, 83, 84] також розглядають бережливе виробництво, як філософію.

Безумовно, в більшості випадків, основною метою провадження технологій переробки полімерів є підвищення рівня фінансового забезпечення, що в свою

чергу впливає на відповідний рівень якості життя. Саме тому, Lean об'єднує в собі фінансові та філософські складові, і має розглядатися як одне ціле в комплексі [85], що особливо актуально в наші часи.

Доводиться констатувати факт, що на пострадянському просторі, де досі переважає планова економіка та філософія комунізму і принципи масового виробництва, протилежні філософії Lean, особливо складно змінити підхід та мислення [86].

Про ці проблеми продовжують наголошувати сучасні філософи України. Зокрема, вивчається вплив комуністичної ідеології на менталітет [87, 88]. Можна припустити, що подібні впливи, які мають місце і сьогодні, перешкоджають змінам ментальності, світогляду та перешкоджають готовності до змін, відповідальності, що в свою чергу передбачає філософія ощадливого виробництва.

Індустріальна культура потребує змін в нашому суспільстві, і Lean філософія сприятиме безперервному покращенню, як наслідок, якості життя замість підмін цілей засобами, як зазначають науковці сучасності [89].

Також звертається увага на проблеми культури мислення та діяльності, яка зазнає якісної трансформації [90, 91]. Отже філософія бережливого виробництва просуває процес безперервного покращення будь-яких сфер діяльності та має важливий вплив на формування менталітету й світогляду.

Саме тому невідпинний розвиток технологій отримання виробів з ПКМ, примушує міжнародні та українські компанії й організації постійно змінювати та покращувати системи менеджменту будь-яких процесів: від освітніх до виробничих чи сервісних. Важливу роль відіграє лідерство, розуміння ролей лідерів та поведінки. Однак стилям керування, методам прийняття рішень та поведінці приділяється недостатньо уваги, навіть незважаючи на те, що існує багато апробованих концептуальних та загально відомих інструментів аналізу та мислення, таких як: 6SIGMA, PDCA (Plan Do Check Act) та багато інших. Останнім часом все більше постає питання визначення різниці між керівником і лідером та чіткого розуміння ролей. Досягнення успіху в більшості випадків залежить від роботи всієї команди в цілому, де лідерство має проявлятися у задаванні напрямку

через візії та місії. Результат може цілком відображати рівень і об'єкти орієнтованості менеджера та його поведінки.

Діяльність організацій чи компаній, незалежно від галузі супроводжується виникненням перешкод, обумовлених наявністю різноманітних проблем, які мають прямий вплив як на фінансові, так і на завершальні процесні результати. Тому, саме вміння визначити та подавати проблему, вибрати інструменти аналізу, кращі заходи на ліквідацію проблем, методи верифікації успішності та розповсюдження найкращих практик – є викликом не лише для менеджера сьогодення, а й для *інженерії*, що потребує уточнень і покращень управлінських процесів та поведінки, таких як: вибір інструменту для аналізу проблем, порядок денний зустрічей та їх ефективності, стратегічний та операційний фокус, культурні та етичні аспекти, гумор, ескалації та методів моніторингу успішності.

Необхідно зазначити, що попри доступність інформації та навчальних матеріалів, далеко не всі менеджери та сучасні інженери можуть прийняти нову стратегію на заміну вже устаткованим неефективним звичкам таким як надання переваги короткостроковим успіхам перед довгостроковими сталими результатами, ситуативному менеджменту перед структурованими підходами, авторитарному стилю керування перед наставницьким стилем та вихованням лідерів в середині організації. Все це не сприяє розширенню повноважень команд, і як наслідок призводить до втрат потенціалу та неефективного використання персоналу.

Відзначимо, що діяльність лідерів щодо вирішення проблем зазвичай носять реактивний характер попри їх намагання системно вплинути на остаточну ліквідацію наявних проблем. Саме несистемний характер частіше переймається командами, що в свою чергу зменшує рівень зрілості компанії та її позицію в конкурентному середовищі.

Висновки до розділу 1. Показано, що полімерні композиційні матеріали мають широке застосування в автомобільній промисловості, що призводить до утворення значних обсягів відходів. В автомобілебудуванні популярними є багатокомпонентні пластикові вироби. Завдяки таким продуктам вдається

досягнути максимального рівня функціоналу готових виробів шляхом поєднання експлуатаційних властивостей в одній частині мехатронної складової. Переробляючи суміші відходів ПКМ важливо розуміти їх поведінку та фізико-хімічні перетворення. Це забезпечує можливість прогнозування змін як параметрів процесу так і властивостей вторинної сировини.

Регулювання експлуатаційних характеристик пластикових виробів, які отримуються методом лиття під тиском сприяє превентивному зменшенню обсягів відходів. Також це відіграє важливу роль в забезпеченні якості отриманих виробів. Дослідження показують, що значна частка відходів ПКМ, особливо багатокomпонентних, не переробляється. Це пов'язано із недостатньо вивченими методами переробки та високою вартістю технологій розділення багатокomпонентних полімерних відходів. Хоча переробка сумішей відходів пластмас методом лиття під тиском демонструє високу ефективність.

Встановлено, що зменшення частки відходів ПКМ потребує комплексного підходу як інжинірингу, так і менеджменту. Впровадження філософії Lean, сприяє сталому розвитку суспільства, побудові та підтримки наближеного до ідеалу процесу шляхом зменшення втрат та підвищення ефективності розв'язання проблем.

З огляду на тенденції та актуальні проблеми, встановлюється необхідність в розробці технології переробки багатокomпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском без їх попереднього розділення та в розробці технології переробки полімерів для превентивного зменшення їх відходів. Для цього здійснено огляд сучасної наукової літератури щодо лиття пластмас під тиском та переробки утворених багатокomпонентних полімерних відходів. Також для досягнення мети, необхідно:

- вдосконалити технологію отримання сировини з суміші відходів полімерних композиційних матеріалів для подальшої переробки методом лиття під тиском;

- провести дослідження впливу використання суміші відходів полімерних композиційних матеріалів на основні технологічні параметри процесу лиття під тиском та на його стабільність;
- вивчити реологічні властивості та морфологію багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів PA6/PC;
- розробити технологію повторної переробки ABS/PC на основі дослідження механічних властивостей;
- розробити технологію переробки PA12 методом лиття під тиском для превентивного зменшення відходів;
- розробити системний підхід до валідації процесу переробки сумішей вторинних полімерних мультикомпонентних композиційних матеріалів методом лиття пластмас під тиском.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – процес лиття під тиском сумішей полімерів з додаванням багатокомпонентних відходів.

Предмет дослідження – технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском.

2.1. Методи дослідження стабільності процесу лиття пластмас під тиском

Вивчення стабільності є важливою складовою під час розробки технологічного процесу переробки полімерів. Подібні дослідження обумовлюються потребою постійного вдосконалення та підвищення рівня якості продукції шляхом впровадження SPC (Statistical Process Control) [92]. Особливо важливим є розуміння поведінки та придатності технології під час повторної переробки відходів ПКМ в якості основної сировини [93].

Для дослідження впливу використання багатокомпонентних полімерних відходів на основні технологічні параметри та на стабільність процесу лиття пластмас під тиском як вихідний матеріал були використані некондиційні мультикомпонентні деталі автомобілів (рис. 1), отримані на гібридній литтєвій машині «ENGEL e-victory 200H/80V/120» (Австрія).



Рисунок. 1. Загальний вигляд полімерного мультикомпонентного виробу, отриманого методом литтям пластмас під тиском

На рисунку 1 чорний елемент деталі відливається зі PA6GF30 марки «Durethan BG30X» (Німеччина), білий елемент з полікарбонату (PC) марки «Makrolon 2407» (Німеччина). Деталь являє собою рокер, який призначений для

активування електричної функції в перемикачі склопідйомників автомобілів, а також виконує функцію проведення світла для підсвічування відповідного символу.

Подрібнення деталей здійснювали механічним методом на подрібнювачі «Rapid 200» (Швеція). Порівняльна характеристика матеріалів наведена в таблиці 1. Виходячи зі співвідношення компонентів в початковому зразку (90/10 мас.%), після механічної переробки отримували суміш частинок з нерозділених компонентів PA6GF30/PC (рис. 2). Зовнішній вигляд подрібнених відходів наведений на рисунку 2.



Рисунок 2. Загальний вигляд подрібнених відходів з PA6GF30 та PC

Отриманий вторинний ПКМ висушували на сушарці «Farragtech SCARD 35» (Німеччина) при температурі 110°C впродовж 4,5 год. Далі матеріал використовували для лиття чорного компоненту деталі без додавання оригінальної полімерної композиції PA6GF30 на тій же литтєвій машині «ENGEL e-victory 200H/80V/120». Статистичні дані для визначення стабільності процесу та литтєвої машини отримували з програмного модулю «Q Table», який входить в програмне забезпечення системи керування «Engel CC300». Дані досліджень були оброблені методом *6SIGMA* з отриманням відповідних результатів стабільності процесу за допомогою програми MSeXcel.

Порівнюючи основні властивості окремих компонентів суміші матеріалів (табл. 1), можна бачити, що вихідні полімерні компоненти (PA6GF30 та PC) мають суттєві відмінності таких фізико-механічних властивостей як модуль пружності та ударна в'язкість. Здебільшого, таку відмінність можна пояснити наявністю в поліаміді 30% мас. скловолонистого наповнювача. Водночас, PA6GF30 має

діапазон температур переробки 270-290°C, граничні відмінності верхньої межі яких на 10°C менші за PC. Це дає можливість безпечно провести експеримент без потенційних втрат якості продукту.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика використаних матеріалів

Матеріал	PA6GF30	PC
Властивості		
Торгова марка	DurethanBKV 30 H 3.0 black	Makrolon 2405 white
Хімічна група	поліамід 6	полікарбонат
Країна походження	Німеччина	Німеччина
Виробник	Lanxess AG	Covestro AG
Температура переробки (рекомендована виробником)	270-290°C	280°C
Модуль пружності, МПа	8600	2350
Модуль міцності, МПа	9800	2400
Ударна в'язкість, кДж/м ²	75	97
Щільність, кг/м ³	1360	1200
Показник текучості розплаву MVR, см ³ /10 хв	57,68	60,87

Відливання деталей з отриманої суміші багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів здійснювали за стандартних серійних параметрів технологічного процесу лиття під тиском з подальшою оцінкою та їх частковим коригуванням для досягнення оптимальної стабільності процесу та рівня якості.

2.2. Методи дослідження фізико-механічних властивостей виробів отриманих методом лиття пластмас під тиском

Дослідження механічних властивостей є важливим аспектом, який обумовлюється, як достатньо високим рівнем терміну експлуатації, так і безпекою експлуатації пластикових виробів. Саме тому механічні властивості ПКМ активно вивчаються й сьогодні [94, 95, 96, 97]. В даному випадку дослідження сили зламу показує рівень придатності суміші вторинної сировини ПКМ до її використання як в якості добавки до основного матеріалу до 50% мас, так і в якості оригінального матеріалу (до 100% мас.).

Вважається, що повторна переробка термопластів може призвести до змін властивостей матеріалів, в тому числі і змін механічних властивостей. Саме тому важливо знати рівень цих змін і їх вплив на вимоги критеріїв якості. Прийнятний рівень змін повинен не перевищувати 15% [98]. Таким чином приймається виважене рішення стосовно повторної переробки багатокomпонентних відходів ПКМ з огляду на якість отриманої продукції шляхом порівняння отриманих результатів.

2.2.1. Методи визначення сили зламу

Для отримання зразків для подальшого визначення сили зламу, браковані полімерні деталі та технологічні відходи у вигляді ливників (Рис. 3) з ABS/PC «BayblendT65XF» від оригінально виробника «CovestroAG» були подрібнені на дробарці «Rapid 200» (Швеція). На рисунку 3 показано ливники, які утворюються, як побічний продукт лиття пластмас під тиском.

На рисунку 4 можна бачити подрібнений матеріал з ABS/PC, який є придатним для використання у подальших процесах дослідження. Регранульований матеріал (рис. 5) для вторинного використання отримували із подрібненого матеріалу (рис. 4) після сушіння в сушарці «FARRATECHCard 20S» (Німеччина).



Рисунок 3. Технологічні відходи ABS/PC (ливники)



Рисунок 4. Подрібнений брак та технологічні відходи ABS/PC

В таблиці 2 подано основні характеристики полімерної композиції ABS/PC, які зазначає оригінальний виробник в паспорті матеріалу.

Таблиця 2. Основні властивості полімерного композиційного матеріалу ABS/PC

Властивість	Значення
Торгова марка	BayblendT65XF
Хімічна група	Акрилонітрил бутадієн стирол співполімери
Країна походження	Німеччина
Виробник	CovestroAG
Температура переробки (рекомендована виробником)	260°C
Модуль пружності, МПа	2350
Модуль міцності, МПа	2350
Ударна в'язкість, кДж/м ²	48
Щільність, кг/м ³	1130
Показник текучості розплаву MVR, см ³ /10 min	18

Отримування регрануляту (рис. 5) відбувалося шляхом екструзії подрібненого матеріалу (рис. 4) з вузла впорскування литтєвої машини ARBURGAllrounder 270S-350-60 (Німеччина) з подальшим подрібненням екструдату на спеціально виготовленому автоматизованому пристрої, який пройшов досерійне випробування та валідацію в умовах ТОВ «Костал Україна».

Метод отримання вторинної гранульованої сировини з ABS/PC описаний в розділі 3.4.



Рисунок 5. Регранульований подрібнений матеріал ABS/PC

Деталі автомобілів (рис.6) для проведення експерименту отримували в серійних умовах з оригінальної, подрібненої (рис.4) та регранульованої сировини (рис.5) на литтєвій машині ENGELVictory 200/60 POWER (Австрія) із застосуванням стандартних серійних параметрів технологічного процесу, які подані в таблиці 3.

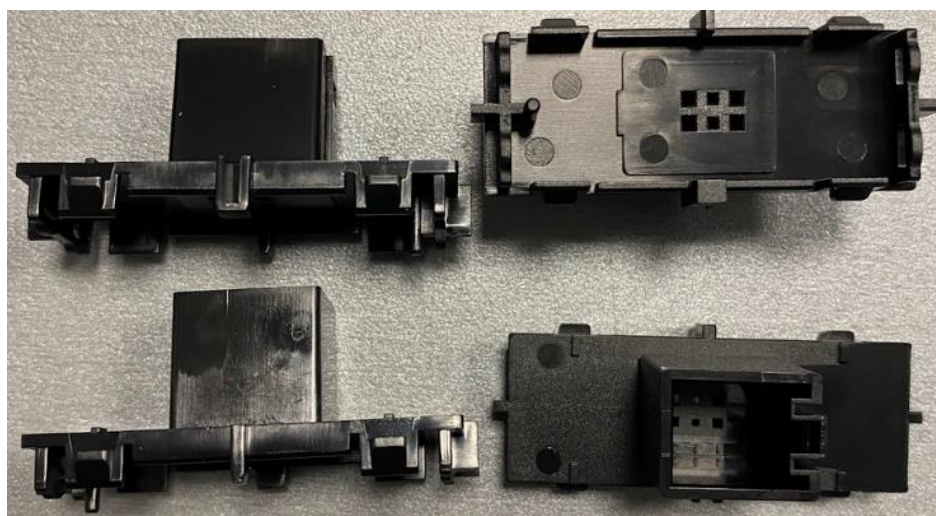


Рисунок 6. Деталь, отримана методом лиття під тиском з ABS/PC

На рисунку 6 показано пластикову деталь («цоколь») з полімерної композиції ABS/PC, яка є одним з компонентів мультифункціонального перемикача центральної консолі в автомобілі. На цоколь в подальшому процесі монтується друкована плата з електричними контактами (пінами), мембрана, корпус,

рефлектори та функційні кнопки. Все це складає повноцінний виріб, який в свою чергу монтується в панель керування різноманітними функціями в автомобілі.

Механічні властивості отриманих виробів із оригінального, вторинного подрібненого та вторинного регранульованого матеріалу ABS/PC, а саме сили зламу (Н), визначали за допомогою універсальної машини для випробування матеріалів ZWIK Roell ВТІ-FR2.5ТН.140 (Німеччина).

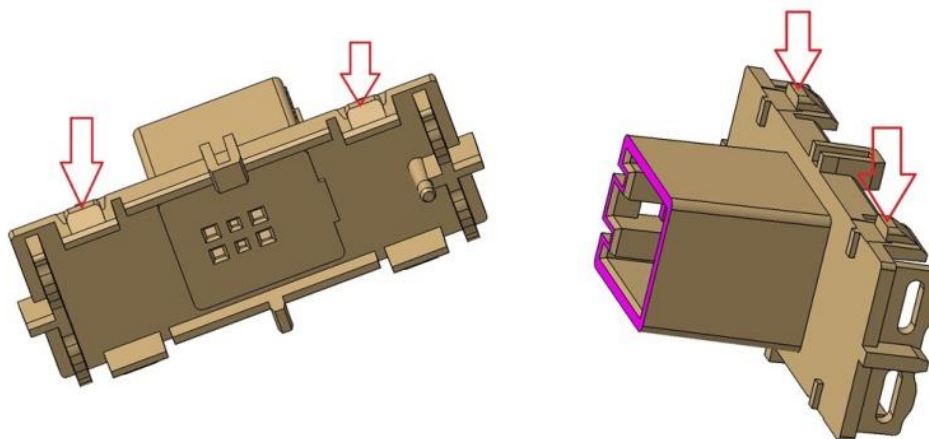


Рисунок 7. 3D модель полімерної деталі та зони зламу

На рисунку 7 показано обрані місця зламу – кліпси, які утримують корпус та інші несучі елементи готового виробу. Вибір обумовлений визначенням специфічних вимог замовника, як потенційно ризикована зона ймовірного пошкодження під час експлуатації автомобіля. Також зазначена зона несе як статичні навантаження – утримування інших комплектуючих, так і динамічне, яке утворюється під час складання виробу.

Зазначені в таблиці 3 основні параметри лиття пластмас під тиску були використані для отримання експериментальних деталей з оригінального, подрібненого та регранульованого ABS/PC.

Таблиця 3. Основні параметри технологічного процесу лиття пластмас під тиском отримання деталей з ABS/PC для проведення експерименту

Параметри процесу	Одиниця виміру	Значення
Мінімальний час сушки	год	3,5
Температура сушки	°C	110,0
I зона нагріву циліндру	°C	260,0
II зона нагріву циліндру	°C	260,0
III зона нагріву циліндру	°C	255,0
IV зона нагріву циліндру	°C	255,0
Мінімальне зусилля змикання ПФ	кН	500,0
Час дозування, с	с	4,20
Час дії тиску підживлення, с	с	3,50
Час охолодження, с	с	10,0
Час циклу, с	с	17,9
Максимальний тиск впорскування	бар	1200,0
Протитиск, бар	бар	65,0
Швидкість впорскування, мм/с	мм/с	33,0
Швидкість підживлення, мм/с	мм/с	15,0
Хід дозування, мм	мм	26,20
Подушка, мм	мм	4,0
Швидкість декомпресії, мм/с	мм/с	15,0

Також був розрахований довірчий інтервал (ДІ), за формулою, яка буде подана в розділі 2.5.

2.2.2. Метод визначення межі міцності при стисненні полімерних композицій

Дослідження механічних властивостей суміші полімерів PA6GF30/PC виконували шляхом виміру межі міцності при стисненні за ISO 604 [99]. Механічні випробування на стиснення дають змогу визначити здатність матеріалу переносити зовнішню дію та витримувати тривалі статичні навантаження без незворотних змін в структурі. Під час випробування, зразок розташовують між двома гладкими жорсткими паралельними площинами (рис. 8), і поступово стискають його до заданих умов.



Рисунок 8. Розташування зразка для випробування на стиснення

Після проведення випробування, оцінюють не лише чисельні параметри, а й якісні. Отже, проводячи візуальний огляд, звертають увагу на наявність тріщини та (або) надломів. Позитивним результатом вважається відсутність зазначених пошкоджень.

Кількісні показники оцінюють за межею міцності при стисненні $\sigma_{ст}$ (МПа) та розраховують за формулою (1):

$$\sigma_{ст} = \frac{F_H}{A_K} \quad (1),$$

де F_H – сила навантаження, яка відповідає межі міцності при стисненні.

Також визначають кінцевий діаметр зразка d_K в двох взаємоперпендикулярних напрямках і кінцеву висоту h_K після проведеного розвантаження. Отримані результати усереднюють. Кінцеву площу поперекового перерізу зразку A_K округлюють до значення 0,1.

В даній роботі експеримент проводили з використанням випробувальної машини EDZ-40 (Німеччина) (рис.9). Шкала зусиль 40 кН. 1мм ординати (зусилля) – 16 кгс. 1 мм абсциси: М 2:1. Основні дані та позначення, які отримуються:

H – початкова висота, мм;

d_0 – початковий діаметр;

F_0 – площа зразка на момент початку випробування;

d_K – кінцевий діаметр;

F_K – площа зразка на момент закінчення випробування;

$R_{0,2}$ – навантаження (Н), при стисненні зразка на 50%;

$\sigma_{0,2}$ – межа (Н), при стисненні зразка на 50%;

P_{max} – максимальне навантаження (Н) на зразок;

$\sigma_{ист}$ – істинна межа міцності (Н).



Рисунок 9. Машина для стиску типу ВП-1 для вимірювання модуля пружності

Статичний модуль пружності визначають при постійній швидкості деформації (подовження) або напруження (навантаження).

Статичний модуль поздовжньої пружності визначають за ISO604, що поширюється на пластичні маси з модулем пружності не нижче 300 МПа за формулою:

$$E = \Delta F \cdot l / \Delta l_{сер} \cdot A_0, (2)$$

де $\Delta l_{сер}$ - усереднене подовження, що відповідає постійному прирощенню навантаження ΔF ; A_0 - площа перерізу зразка до випробувань; l - розрахункова довжина (база тензометра).

Деформації за тензометром відраховують не менше, ніж при двох навантаженнях: початковому F_0 , що дорівнює приблизно 2% від руйнуючого F_p і F_{max} , що складає 8-10% F_p . При цьому швидкість навантаження повинна становити 0,25-0,33 МПа/с для матеріалів, міцність яких на розтяг більше ніж 100 МПа.

Кожний зразок завантажують – розвантажують шість разів, заміряючи подовження Δl при $\Delta F = F_{max} - F_0$.

Після вимірювання перерізу зразка, його закріплюють в зачіпах машини так, щоб вісь подовження співпадала з лінією дії навантаження і виключалось просковзання. На робочу частину зразка ставлять тензометр так, щоб його база була розташована вертикально посередині ширини зразка. Після кожного завантаження – розвантаження перевіряють розташування тензометра, щоб його відлік був нульовим. Обчислюють модуль пружності за трьома останніми вимірами. Результати випробувань заносять в журнал спостережень.

2.2.3. Метод визначення експериментальної густини

Експериментальну густину (ρ , г/см³) суміші вторинної полімерної композиції РА6GF30/РС розраховували за відношенням маси зразка на повітрі (m_1) до різниці маси зразка в ізопропіловому спирті (m_2):

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_c, \quad (3)$$

де m_1 – маса (г) зразка на повітрі; m_2 – маса (г) зразка у ізопропіловому спирті; ρ_c – густина ізопропілового спирту (0,786 г/см³).

Масу зразків була виміряна за допомогою аналітичних терезів ВЛР-200. Дослідний зразок за допомогою нитки чи проволочки був підвішений до їх коромисла, і потім, був послідовно зважений в двох середовищах: повітрі (1) та ізопропіловому спирті (2). Температура середовища становила 293 К. Точність виміру маси складала не нижче 0,0001 г.

Середнє арифметичне значення густини, отримане в результаті не менше, як трьох вимірів, що відрізняються не більше, ніж на 1 %, приймали за остаточний результат, який заносили в таблицю 4.

Таблиця 4. Результати вимірювання густини

Склад суміші РА6GF30/РС, % мас.	Номер	Вага на повітрі, г	Вага у спирті, г	Вага проволоки, г	Густина, г/см ³
90/10	I	2,8432	1,1516	0,11225	1,245186
	II	2,93095	1,1913	0,11225	1,250311
80/20	I	2,92885	1,1472	0,11225	1,221707
	II	2,82455	1,04135	0,11225	1,177237
70/30	I	2,385	0,8232	0,11225	1,125504
	II	2,5182	0,86935	0,11225	1,129622
60/40	I	2,53555	0,76545	0,11225	1,06414
	II	2,35595	0,7592	0,11225	1,089058
50/50	I	2,83545	1,0881	0,11225	1,204563
	II	2,49665	0,864	0,11225	1,130353
40/60	I	2,5318	0,76615	0,11225	1,065084
	II	2,46195	0,6733	0,11225	1,023168
30/70	I	2,3574	0,483	0,11225	0,93743
	II	2,3181	0,6281	0,11225	1,016118
20/80	I	2,5182	0,75185	0,11225	1,058968
	II	2,6584	0,86905	0,11225	1,104405
10/90	I	2,332	0,6279	0,11225	1,014276
	II	2,5589	0,9072	0,11225	1,146025

2.3. Методи дослідження реологічних властивостей та морфології суміші полімерних композиційних матеріалів

Змішування полімерів є одним з найбільш економічно доцільних і привабливих методів отримання нових матеріалів з відмінними властивостями. Проте, більшість пластиків не змішуються, а їх суміші часто мають морфологію з розділенням фаз, яка може бути дискретною фазовою структурою (краплі в матриці) або співперервною фазовою структурою залежно від складу та умов обробки [100]. Останні наукові публікації свідчать про важливість проведення

досліджень як реології, так і морфології для розуміння властивостей отриманих сумішей [101]. Це необхідно для подальшої оцінки їх впливу на фізико-механічні характеристики матеріалів [102] і якість готової продукції загалом. Зокрема Younggon Son та Shichoon Lee досліджували сумісність полімерних сумішей полікетон/поліамід 6 (ПК/РА6) з метою розширення сфери їх використання [103], адже саме сумісність може відігравати ключову роль при переробці отриманих сумішей. Морфологія продемонструвала хорошу міжфазну адгезію, що сприяє покращенню ударної міцності суміші ПК/РА6 і розширює можливості практичного застосування.

На стадії переробки сумішей пластмас під дією температури і тиску формується надмолекулярна структура ПКМ залежно від природи вихідних компонентів композиту та параметрів їх змішування, міжфазних взаємодій на межі наповнювач-полімерна матриця. Досліджуючи особливості морфології полімерних матеріалів можна оцінити фазовий розподіл компонентів в суміші, встановити чинники, які впливатимуть на технологічну сумісність компонентів у полімерних композитах, та спрогнозувати їхні експлуатаційні характеристики [104].

Варто зауважити, що суміші відходів ПКМ можуть відрізнитись за хімічною групою. Саме тому важливим фактором в процесі їх переробки методом лиття під тиском є розуміння реологічних властивостей, які мають суттєвий вплив на стабільність самого технологічного процесу і як наслідок на продукт.

Таким чином для дослідження реологічних властивостей був обраний метод визначення показника текучості розплаву (ПТР), в результаті аналізу якого можна зробити висновки про поведінку матеріалу в розплаві ще на ініціальній стадії впровадження технології повторної переробки багатокомпонентних відходів ПКМ литтям під тиском.

Для отримання дослідних матеріалів дефектні деталі (рис. 1) та технологічні відходи РА6GF30 і РС від автомобільних деталей подрібнювали на дробарці Rapid 200 (Rapid Granulator AG, Швеція). Отриману суміш (рис. 2) з РА6GF30 (90% мас.) та РС (10% мас.) розділяли на компоненти шляхом ручного сортування за

кольоровими ознаками. Основні властивості матеріалів наведено в розділі 2.1, таблиця 1.

Для вивчення реологічних властивостей отриманих матеріалів з багатокомпонентних відходів ПКМ визначали показник текучості розплаву (об'ємна швидкість течії розплаву (MVR), $\text{см}^3/10 \text{ хв}$). MVR вимірювали за допомогою обладнання Melt Flow Indexer MFI-1322 (AMSE S.r.l., Італія) з обробкою даних згідно з ISO 1133 [105].

Температуру розплаву (Табл.5) обирали, виходячи з рекомендацій виробника матеріалів та таким чином, щоб отримати прийнятний допуск ($\pm 5\%$) для обох полімерних композицій в сумішах. Різниця температур переробки PA6GF30 та PC складає 2% або 5°C , що дало змогу підібрати оптимальну температуру розплаву для отриманих сумішей. Зміни титру складових суміші виконували з кроком 10% мас. Параметри для виміру MVR встановлювали відповідно до таблиці 5.

Таблиця 5. Основні параметри визначення показника текучості розплаву

Параметр	Одиниця виміру	Значення
$T_{\text{розплаву}}$	$^\circ\text{C}$	300,0
Навантаження	кг	5,0
Число зрізів	од.	10
Інтервал зрізу	с	1,5
Висота дюзи	мм	8,0
Маса завантаження	г	4,0
D капіляру	мм	2,095

Обчислення MVR відбувалося вбудованим програмним забезпеченням пристрою визначення показника текучості розплаву MFI-1322 за наступним рівнянням для кожної частини екструдату:

$$MVR(\theta, m_{nom}) = \frac{t_{ref} * m}{2t} * \rho \quad (4),$$

де θ – температура тесту, $^\circ\text{C}$;

m_{nom} – номінальне навантаження, кг;

m – середнє значення маси зрізу, г;

t_{ref} – коефіцієнт конвертації грам/секунду на грам/10 хвилин (600 с);

t – інтервал зрізу, с;

ρ – щільність, г/см³.

Морфологію екструдатів з вторинної суміші PA6GF30/PC досліджували методом оптичної поляризованої мікроскопії на електронному мікроскопі Mitutoyo QS250Z (Японія).

2.4. Методи дослідження експлуатаційних характеристик виробів з полімерних композиційних матеріалів

Вироби з полімерних композиційних матеріалів, які використовуються в авто піддаються впливу різних миючих та дезінфікуючих речовин, які містять в складі різні агресивні хімічні компоненти, зокрема етиловий спирт (C₂H₅OH), застосування якого широко розповсюдилося під час пандемії COVID-19. В результаті взаємодії поліамідів з етиловим спиртом відбувається повільна реакція. Наслідком такої взаємодії є незворотна деформація виробів, отриманих з PA методом лиття під тиском, що призводить до необхідності замінювати вироби на нові. Непридатні деталі доводиться утилізувати, чи повторно переробляти. Таким чином дослідження експлуатаційних характеристик, а саме резистентності полімерів до агресивних речовин сприяє створенню технології їх переробки, яка превентивно обумовлює уникнення утворення відходів.

Деталі для експерименту отримували на литтєвій машині ARBURG Allrounder 270S-350-60 (Німеччина) із застосуванням стандартних серійних та коригованих параметрів процесу з матеріалу PA12 від виробника «RTP Company» марки «RTP-299EX146375S-806906TRANSBLACK». Основні характеристики використаної полімерної композиції наведено в таблиці 6 відповідно до специфікації, яку надає виробник.

Відлита пластикова деталь використовується в перемикачі (рис.10), який виконує функцію збереження та відтворення пам'яті налаштування сидінь водія і пасажирів в сучасному автомобілі.

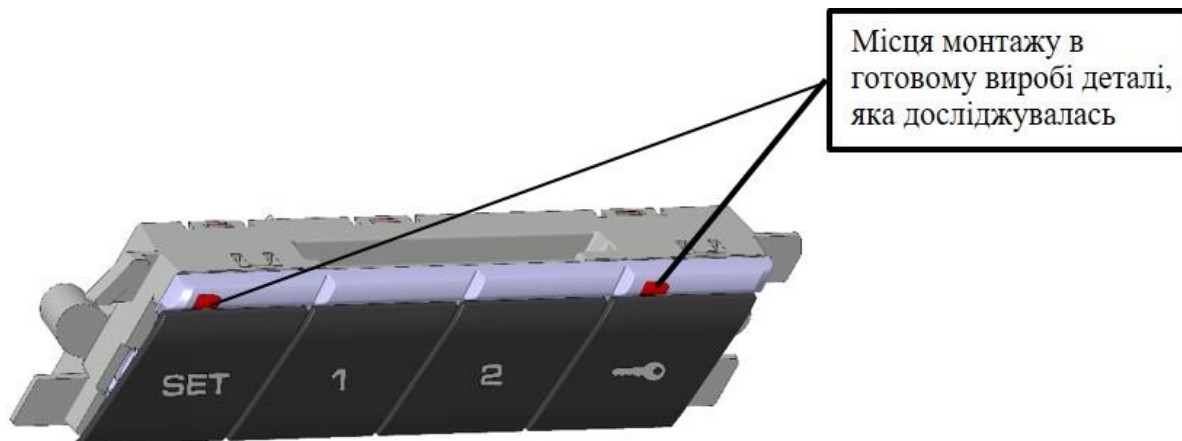


Рисунок 10. Модель готового виробу, де використовується дослідна
пластиковіа деталь з PA12

Досліджувана деталь виконує функцію перепускання підсвічування функціональних кнопок, а також як частина декоративного елемента. На моделі готового виробу (рис. 10) досліджувана полімерна деталь частково накривається хромованим елементом.

Таблиця 6. Основні властивості PA12

Характеристика	Одиниця виміру	Значення
Щільність	г/см ³	1,00
Ударна в'язкість за Ізодом	кДж/м ²	10
Міцність на розрив	МПа	50
Модуль пружності	МПа	1650
Тиск впорскування	МПа	70-105
Температура переробки	°С	270-300
Температура прес-форми	°С	65-100
Час сушіння	год	4
Температура сушіння	°С	80

Отримані вироби з PA12 методом лиття пластмас під тиском (рис. 11) з різними параметрами процесу піддавали впливу дії полярного розчинника етилового спирту C₂H₅OH (96,6 % об). Візуально оцінювали короблення та інші геометричні зміни деталей після витримки ($t_{\text{вирп}} = 10$ хв) в розчиннику за температури навколишнього середовища 25°С. Час витримки обґрунтований

візуальним спостереженням за ходом реакції, яка спостерігалася в середньому 7-9 хвилин.



Рисунок 11. Загальний вигляд отриманих деталей з PA12

Габаритні розміри деталі (рис. 12) вимірювали за допомогою цифрового мікрометра Mitutoyo 293-821 (Японія) із подальшою обробкою отриманих результатів та оцінкою стабільності технологічного процесу (C_{pk}) та стабільності литтєвої машини (C_{mk}) і відхилень від номінального значення. Побудову діаграм нормального розподілу та розрахунки, аналіз статистичних даних здійснювали за допомогою програми MSEXcel. Оцінку даних також здійснювали за методикою 6SIGMA. Граничні допуски відхилення по габаритному розміру було прийнято $\pm 0,1$ мм, що відповідає специфічним вимогам замовника.

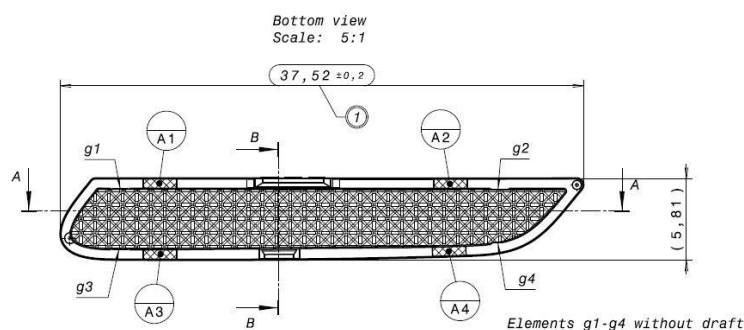


Рисунок 12. Фрагмент 2D креслення виробу з PA12

Коригування параметрів процесу здійснювали поступово, в три етапи, до досягнення максимально можливого ефекту стійкості до короблення.

Після кожного етапу коригування параметрів процесу лиття пластмас під тиском, отримували для подальшого дослідження по 30 од. виробів в серійних умовах.

Всі деталі, отримані з PA12 після належної релаксації та відстоювання були покладені до ємності із полярним розчинником етиловим спиртом C_2H_5OH в концентрації 96,6% об. Під дією такого середовища вироби були витримані 10 хвилин, після чого вилучені для проведення візуальної оцінки якості, оцінки габаритних розмірів (рис.14) та хімічної стійкості.

2.5. Методи статистичної обробки даних

В роботі було здійснено розрахунки *довірчого інтервалу* р для отриманих експериментальних даних [106]. Мінімальна прийнятна в даній роботі вибірка для визначення довірчого інтервалу становила 10 та 50.

Таким чином довірчий інтервал р для вибірки $n < 10$ обчислюється за формулою:

$$p = \frac{2,262}{\sqrt{n}} * v, \text{ де (5)}$$

n – розмір вибірки;

v – коефіцієнт варіації, який обчислюється за формулою:

$$v = \frac{S}{\bar{X}}, \text{ де (6)}$$

\bar{X} – середнє значення отриманих даних

S – квадратичне відхилення (коефіцієнт Стюдента), який обчислюється за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum (X - \bar{X})^2} \text{ (7)}$$

Довірчий інтервал р для вибірки $n \geq 10$ обчислюється за наступною формулою:

$$p = \frac{\frac{2,576}{n-1} + 1,96}{\sqrt{n}} * v = \frac{2,576 + 1,96(n-1)}{\sqrt{n}(n-1)} * v \text{ (8)}$$

Відносний довірчий інтервал розраховували за формулою:

$$\varepsilon = p * 100\% \text{ (9)}$$

Дані вважаються достовірними, якщо $p \leq 0,05$. Натомість відносний довірчий інтервал вказує на можливі коливання отриманих результатів в діапазоні $\pm \varepsilon$.

Всі розрахунки та обробка даних стосовно довірчих інтервалів, а також табличну обробку даних із побудовою графіків та діаграм виконували в програмному забезпеченні MSExcel 2016, використовуючи стандартні програмні формули.

Висновки до розділу 2. Обрані методи дають змогу здійснювати збір точних даних з можливістю їх подальшого аналізу для прийняття рішень та формулювання висновків стосовно вирішення важливої науково-прикладної проблеми в галузі виробництва виробів з пластмас, яка пов'язана з необхідністю переробки багатокomпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів за відсутності науково-обґрунтованої валідованої технології.

розплаву залежно від вмісту PA6GF30 та PC. В таблиці 7 і на рисунку 15 показано зміну реологічних властивостей вторинної полімерної суміші залежно від вмісту PA6GF30 та PC % мас. Для визначення властивостей будь-яких сумішей часто використовується *правило адитивності*, яке було застосоване для розрахунку показника текучості розплаву двохкомпонентної суміші полімерів, і в загальному вигляді може бути представлено формулою:

$$MVR_{i+j} = MVR_i \cdot \omega_i + MVR_j \cdot \omega_j \quad (10), \text{ де}$$

ω_i – масова частка і-компонента, ω_j – масова частка j-компонента, при цьому $i+j=1$; MVR_i значення показника текучості розплаву для і-компонента; MVR_j значення показника текучості розплаву для j-компонента. Результати розрахунку наведені в таблиці 6.

Таблиця 7 – Показники текучості розплаву композицій різного складу

№	PA6GF30, % мас	PC, % мас	MVR, см ³ /10 хв	MVR _{i+j}
1	100	0	57,7	57,7
2	90,0	10,00	75,5	58,0
3	80,0	20,00	89,7	58,3
4	70,0	30,00	68,6	58,6
5	60,0	40,00	58,7	58,9
6	50,0	50,00	98,0	59,3
7	40,0	60,00	111,5	59,6
8	30,0	70,00	88,8	59,9
9	20,0	80,00	72,6	60,3
10	10,0	90,00	81,5	60,6
11	0	100	60,9	60,9

Встановлено, що при поступовому збільшенні вмісту PC в суміші PA6GF30/PC відбувається підвищення показника текучості розплаву до встановлення співвідношення PA6GF30/PC 80/20% мас. в суміші.

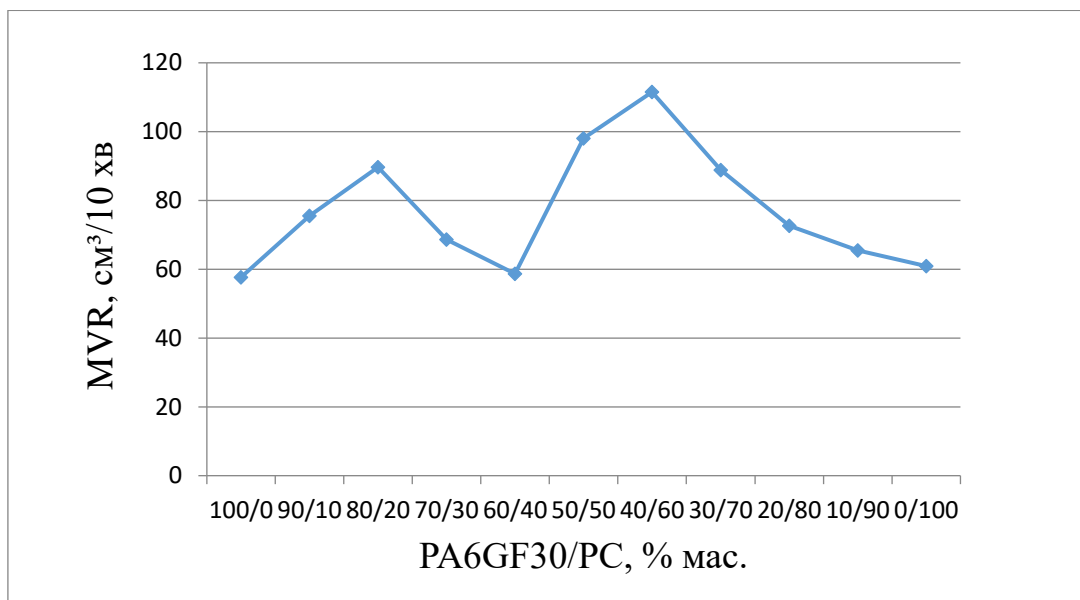


Рисунок 13. Зміна показника текучості розплаву MVR залежно від складу суміші PA6GF30/PC

При подальшому збільшенні вмісту PC в суміші відбувається зменшення показника текучості розплаву поки співвідношення PA6GF30 і PC не досягне 60/40% мас. В цій точці експериментальне значення MVR майже співпадає із значенням MVR, розрахованим за правилом адитивності. Під час експерименту було виявлено стрімке підвищення показника текучості розплаву при співвідношенні 40/60% мас. суміші PA6GF30/PC (рис. 13).

З даних таблиці 6 також можна зробити висновок про те, що показник текучості розплаву суміші PA6GF30/PC розрахований за правилом адитивності підвищується лінійно по мірі збільшення вмісту полікарбонату в суміші. Такі різні закономірності в зміні показника текучості розплаву можуть свідчити про те, що під час змішування двох різних за хімічною природою полімерів відбувається взаємний вплив компонентів суміші, їх часткова хімічна взаємодія, що супроводжується зміною молекулярної будови, утворенням надмолекулярних структур.

Класичний метод змішування полімерів, що не змішуються, полягає в додаванні блок- або прищепленого кополімеру або його утворення на місці під час змішування в розплаві [108]. Вирогідно під час змішування PA і PC в розплаві

за певних співвідношень відбувається їх кополімеризація, утворений продукт має вищу молекулярну масу, про що свідчить підвищення показника MVR суміші.

Тобто за переважаючого вмісту поліаміду можна говорити про ймовірний вплив поліаміду, пов'язаний з частковою кополімеризацією в результаті хімічної взаємодії. При цьому утворений продукт має вище значення MVR, а густина менша, тобто ступінь кристалічності менша.

Відомо [108], що наночастинки мінеральних наповнювачів використовуються для сумісності незмішуваних полімерних сумішей. Ключем до успіху є локалізація наночастинок на межі розділу полімер-полімер. Можливо у випадку застосування склонаповненого поліаміду в суміші з полікарбонатом саме частки скло-наповнювача виконують функцію своєрідного компатибілізатора.

Тому при підвищенні вмісту PC і зниженні вмісту склонаповненого PA, а отже і вмісту наповнювача в системі як компатибілізатора, превалюють властивості PC, що підтверджується зниженням показника MVR суміші, і при цьому має місце явище інкапсуляції поліаміду в структурі полікарбонату. Підтвердження цьому буде виявлене в результаті наступних досліджень морфології сумішей.

На рисунку 14 показано напруження зсуву потоку розплаву при вимірюванні MVR розплаву вторинної полімерної композиції PA6GF30/PC (40/60% мас.). Крива на рисунку 14 свідчить про те, що вторинна полімерна суміш у цих пропорціях характеризується високими швидкостями витіснення розплаву з капіляру, але не на всьому шляху вимірювання.

Таким чином, встановлено, що потік розплаву є турбулентним. Це пояснюється тим, що при високих швидкостях зміщення макромолекули полімерів хаотично з'єднуються між собою, що призводить до утворення зон (особливо на стінках каналу або капіляра), де в'язкість потоку екстремально зростає. Однак можна контролювати зсув розплаву шляхом регулювання відповідних параметрів процесу.

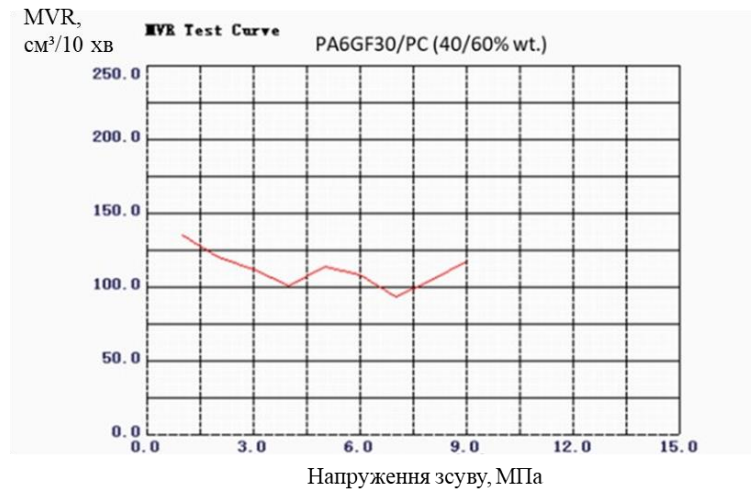


Рисунок 14. Напруження зсуву потоку розплаву для вторинної композиції PA6GF30 і PC (40/60% мас.)

Таким чином, щоб нівелювати вплив високих швидкостей витіснення, необхідно зменшити тиск впорскування розплаву, що відповідно зменшить величину напруги витіснення. Це також свідчить про те, що при переробці даної полімерної композиції енергоємність процесу не збільшиться, а навпаки зменшиться.

3.1.2. Дослідження морфології полімерних композицій із сумішей відходів з полімерних матеріалів

Для вибору та обґрунтування технологічних параметрів переробки полімерної суміші PA6GF30/PC, отриманої з технологічних відходів лиття під тиском, з метою зниження собівартості готової продукції та покращення стану навколишнього середовища та екосистем досліджувалася морфологія полімерних композицій із сумішей цих відходів.

На рисунку 17 показано розподіл матеріалів в отриманому екструдаті.

У суміші PA6GF30/PC 90/10% мас. і 80/20% мас. (Рис. 15a і 15b) демонструється рівномірний розподіл PC в PA6 та відсутність чітких меж між компонентами наряду із відсутністю порожнин.

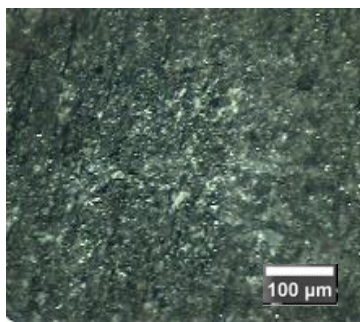
Порожнини чітко візуалізуються в сумішах із співвідношенням PA6GF30/PC 70/30% мас. і 60/40 %мас (рис. 15c, 15d). Під час подальшого додавання PC до PA6GF30 починаючи із співвідношення PA6GF30/PC 50/50

%мас і до 10/90 % мас (рис. 15e, 15f, 15g, 15h, 15i) спостерігаються порожнини з чіткими контурами. По суті відбувається інкапсуляція поліаміду в об'ємі полікарбонату. Yazdani Sarvestan і разом із співавторами у своїх дослідженнях [109] також продемонстрували утворення порожнин у суміші PA6/PC за умов концентрації PC 25% мас. і більше, що пояснюється недостатньою міжфазною адгезією та утворенням концентрації напружень між PA6 і PC. Автори роботи [110] також відзначали погіршення розподілу PC в середовищі PA за співвідношення (PA-6)/PC 70/30 % мас, де за такого розподілу відмічалось існування пустот на межі розділу PC і PA-6 і відповідно погана сумісність компонентів суміші.

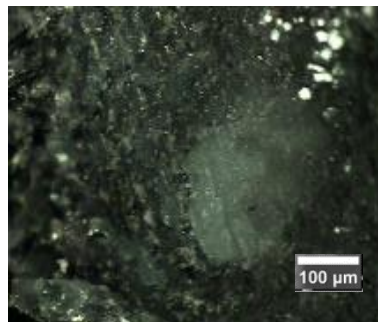
Ймовірно саме явищем інкапсуляції можна пояснити реологічні властивості суміші PA6GF30/PC за співвідношення 50/50% і вище, коли проявляється більший вплив полікарбонату на показник текучості розплаву. Gattiglia E. зі співавторами у роботі [111] під час дослідження термічних властивостей та сумісності полімерних композицій PA6 та PC також спостерігали чітке розмежування між двома компонентами і пояснювали це можливим явищем інкапсуляції.

Варто зазначити, що переробка суміші відходів PA6GF30/PC 90/10% мас. (рис. 15a) не потребувала суттєвої корекції параметрів технологічного процесу лиття під тиском [45], що підтверджується рівномірним морфологічним розподілом компонентів суміші на рисунку 15a. Це також може вказувати на достатній рівень однорідності полімерного композиційного матеріалу, отриманого із суміші PA6GF30/PC 90/10% мас.

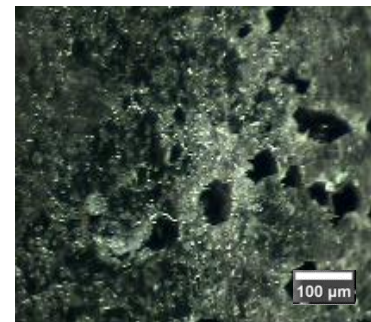
Можливість не підвищувати температуру переробки литтям під тиском суміші полімерів вірогідно пояснюється тим, що в результаті часткової хімічної взаємодії відбувається їх кополімеризація, утворений продукт має вищу молекулярну масу, про що свідчить підвищення показника MVR суміші, а ступінь кристалічності при цьому зменшується, про що свідчить менша густина утворених полімерних композицій.



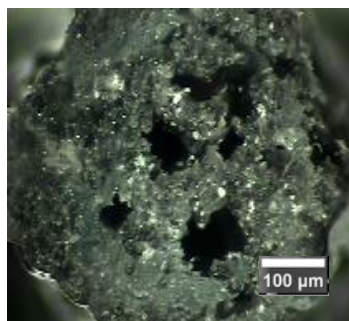
a



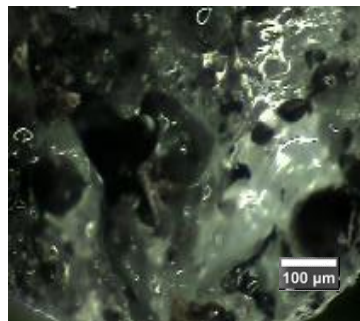
b



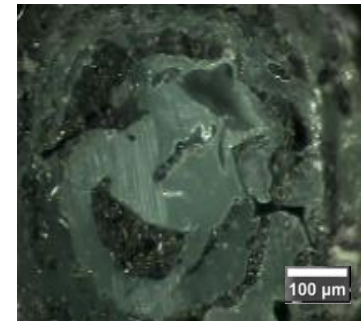
c



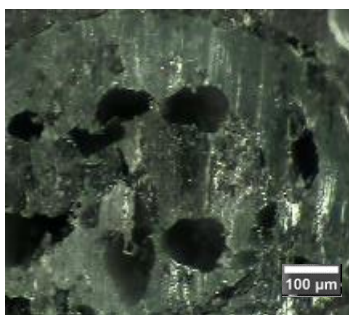
d



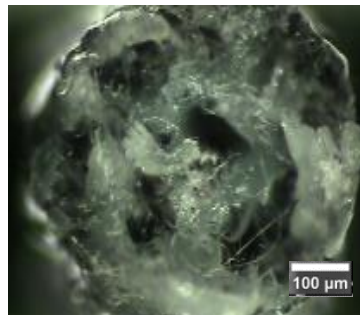
e



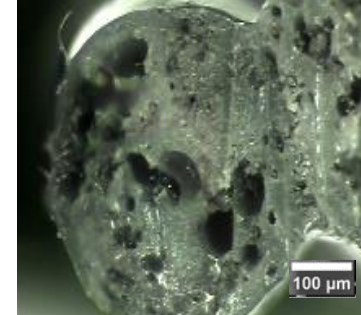
f



g



h



i

Рисунок 15. Мікрофотографії перерізу екструдату після вивчення показника текучості розплаву з вторинної суміші PA6GF30/PC з розподілом, % мас: а) 90/10; б) 80/20; в) 70/30; д) 60/40; е) 50/50; ф) 40/60; г) 30/70; х) 20/80; і) 10/ 90.

Під час дослідження магнітного резонансу сумішей PA6/PC, PA6/PPO автори роботи [112] встановили, що додавання PC до системи PA запобігає ефекту пластифікації шляхом виклику твердіння суміші, що пояснювали обмеженням рухливості групи NH в результаті взаємодії PA та PC.

Тим не менше, варто зауважити, що хоча отримана суміш (рис. 15f) демонструє чіткі межі між поліамідом 6 та полікарбонатом наряду з наявністю порожнин, але ймовірна хімічна взаємодія без розчинення PC в PA6, дає змогу отриману полімерну суміш переробляти литтям під тиском.

Отже, додавання полікарбонату до склонаповненого поліаміду робить можливим переробку сумішей відходів полімерних композиційних матеріалів без підвищення температури, що дозволяє знизити енергетичні витрати та навантаження на вузли впорскування литтєвих машин.

3.1.3. Дослідження впливу складу сумішей відходів полімерних матеріалів на фізико-механічні властивості отриманих полімерних композицій

Фізико-механічні властивості полімерних композицій, отриманих із сумішей відходів, оцінювали за зміною густини і межі міцності при стисненні. Експериментальну густину (ρ , г/см³) ПКМ розраховували за відношенням маси зразка на повітрі до різниці маси зразка в ізопропіловому спирті. Результати визначення наведені на рисунку 16.

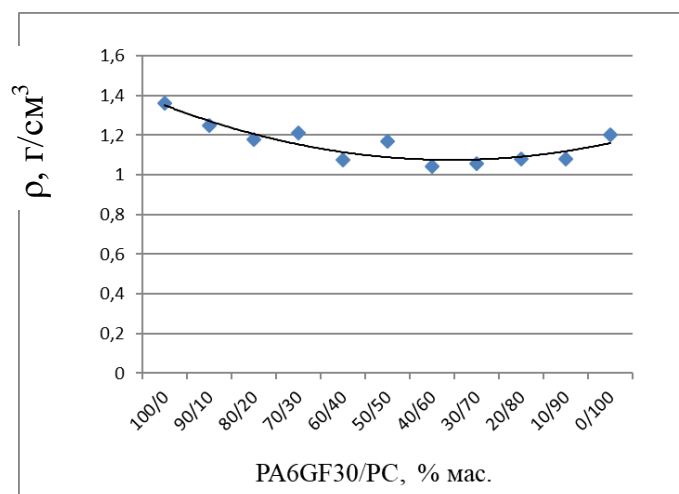


Рисунок 16. Зміна густини полімерної композиції залежно від складу

Як видно з даних на рисунку 16 по мірі підвищення вмісту полікарбонату в композиції, її густина зменшується, причому починаючи від 60/40 % мас. густина композиції стає меншою, ніж густина окремо полікарбонату і поліаміду. Як відомо, густина полімерів залежить від їх хімічної будови, а також ступеня кристалічності структури. Зменшення густини може свідчити про зниження ступеня кристалічності полімерної композиції.

За високого ступеня кристалічності полімерні ланцюги розташовані за регулярним і повторюваним малюнком, що призводить до більш щільної упакованої молекулярної структури, у порівнянні з аморфними полімерами, де ланцюги більш випадково орієнтовані та менш щільно упаковані [113]. Однак важливо зазначити, що інші фактори також впливають на кристалічність. Наприклад, полімери з довгим ланцюгом в результаті високого ступеня полімеризації менш схильні до кристалізації. Так само як і розгалужені полімери. Крім того, утворення ко-полімерів в результаті блок-кополімеризації чи рандомної кополімеризації не призводить до підвищення ступеня кристалічності, на відміну від прищепленої співполімеризації.

Таким чином, підтверджується наше попереднє твердження про те, що вирогідно під час змішування PA і PC в розплаві за певних співвідношень відбувається їх кополімеризація, утворений продукт має вищу молекулярну масу, про що свідчить підвищення показника MVR суміші.

Ступінь кристалічності також впливає на пружно-пластичні властивості полімерної композиції. Зокрема, збільшення кристалічності полімеру обумовлює підвищення його міцності, що іноді супроводжується появою крихкості, а аморфна частину полімеру відповідає за його пластичність. Повністю кристалічний полімер був би занадто крихким, щоб використовувати його як пластик. Аморфні області надають полімеру здатність згинатися без руйнування та поглинати енергію удару, тобто достатню міцність для практичного використання.

Результати визначення межі міцності зразків при стискуванні повністю це підтверджують (рис. 17).

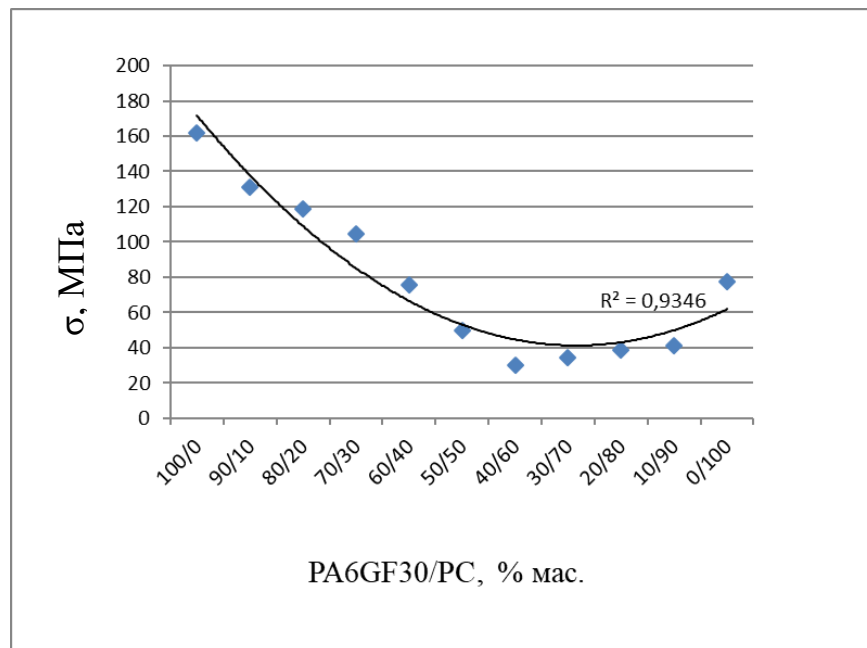


Рисунок 17. Межа міцності при стисненні залежно від складу полімерної композиції

Як видно з наведених даних (рис. 17), по мірі зменшення вмісту поліаміду в полімерній композиції, межа міцності при стисненні також знижується. Це узгоджується з раніше висловленим припущенням, що в результаті часткової хімічної взаємодії може мати місце кополімеризація поліаміду і полікарбонату, що супроводжується зниженням ступеня кристалічності ПКМ і проявляється в зменшенні густини.

За переважаючого вмісту полікарбонату в полімерній композиції вплив поліаміду нівелюється завдяки явищу інкапсуляції поліаміду в структурі полікарбонату, що чітко видно під час дослідження морфології сумішей. Суміш набуває характеристик полікарбонату, що супроводжується поступовим підвищенням межі міцності при стисненні.

3.2. Дослідження механічних властивостей деталей отриманих з оригінальних полімерних композиційних матеріалів та мультикомпонентних відходів полімерів методом лиття під тиском

В галузі автомобілебудування популярними полімерним композиційним матеріалом є ABS пластики, які ідеально поєднуються з PC. Така популярність пов'язана з тим, що ABS за своєю структурою забезпечують візуально ідеальну

поверхню, а PC надає відмінні механічні властивості. Сукупність цих характеристик дає змогу тривалий час експлуатувати деталі автомобіля без погіршення якості. Саме тому механічні властивості полімерної композиції ABS/PC активно досліджуються, зокрема із різним вмістом компонентів по % мас [114]. Також відзначається покращення цих властивостей за допомогою добавок співполімеру стирол-ізопрен-стирол (SIS) до суміші ABS/PC [115].

Однак, при повторному використанні полімерного композиційного матеріалу ABS/PC існують ризики втрат механічних властивостей, які нівелюються додаванням оригінального матеріалу до вторинної суміші до 90%. Таким чином можна без втрат основних характеристик переробляти >55% відходів [116].

Композитні матеріали на основі термопластів можуть неодноразово перероблятися. Приймаючи до уваги те, що повторна переробка у якійсь мірі призведе до зміни властивостей матеріалу, необхідно точно знати, настільки вагома буде ця зміна, і які саме властивості зміняться. Якщо властивості змінюються в допустимих межах (до 15%), то знижується не лише собівартість виробництва, але і одночасно вирішується одна з головних проблем - створення ресурсозберігаючої екологічно безпечної та майже безвідходної технології [117].

Наступним кроком було встановлення впливу використання оригінального, вторинного подрібненого та вторинного регранульованого полімерного матеріалу ABS/PC на механічні властивості деталей отриманих методом лиття пластмас під тиском шляхом проведення порівняльного аналізу середньої сили зламу отриманих деталей. Методи отримання матеріалу, зразків, а також методологія проведеного дослідження показана в розділі 2.2.

Як показано в таблиці 8, рисунок 18, спостерігаються не значні зміни сили зламу кліпс деталей, отриманих з полімерного композиційного матеріалу ABS/PC різного походження. Результати демонструють зменшення сили зламу кліпси деталі на 2,26% ($p = 0,032$) із подрібненого вторинного та збільшення на 0,56% ($p = 0,039$) із регранульованого матеріалу, відповідно, у порівнянні з оригінальною сировиною ABS/PC. Враховуючи те, що довірчий інтервал (ДІ) знаходиться в межах 0,032 – 0,039 і є меншим за 0,05 ($p(0,032-0,039) < 0,05$), можна зробити висновок, що сила зламу не

зазнала значущих змін. Це пояснюється тим, що вторинні полімерні композиційні матеріали з ABS/PC не підлягали впливу деструкційних процесів під час повторної переробки. Варто зазначити й те, що процес регрануляції дещо покращив показник сили зламу, ймовірно за рахунок переорієнтації полімерних ланцюгів, яка відбулась під час попередньої переробки подрібненого матеріалу під тиском. Також під час проведення експерименту було встановлено, що основні параметри процесу лиття пластмас під тиском не потребували суттєвих змін.

Таблиця 8 – Порівняльна характеристика середньої сили зламу кліпс полімерної деталі з ABS/PC

Індикатор	Походження полімерного матеріалу		
	Оригінальний первинний	Подрібнений вторинний	Регранульований вторинний
Середня сила зламу, Н	106,17	103,77	106,77
Абсолютна різниця від оригінального матеріалу, Н	-	-2,4	0,6
Відносні зміни від оригінального матеріалу, %	-	-2,26	0,56

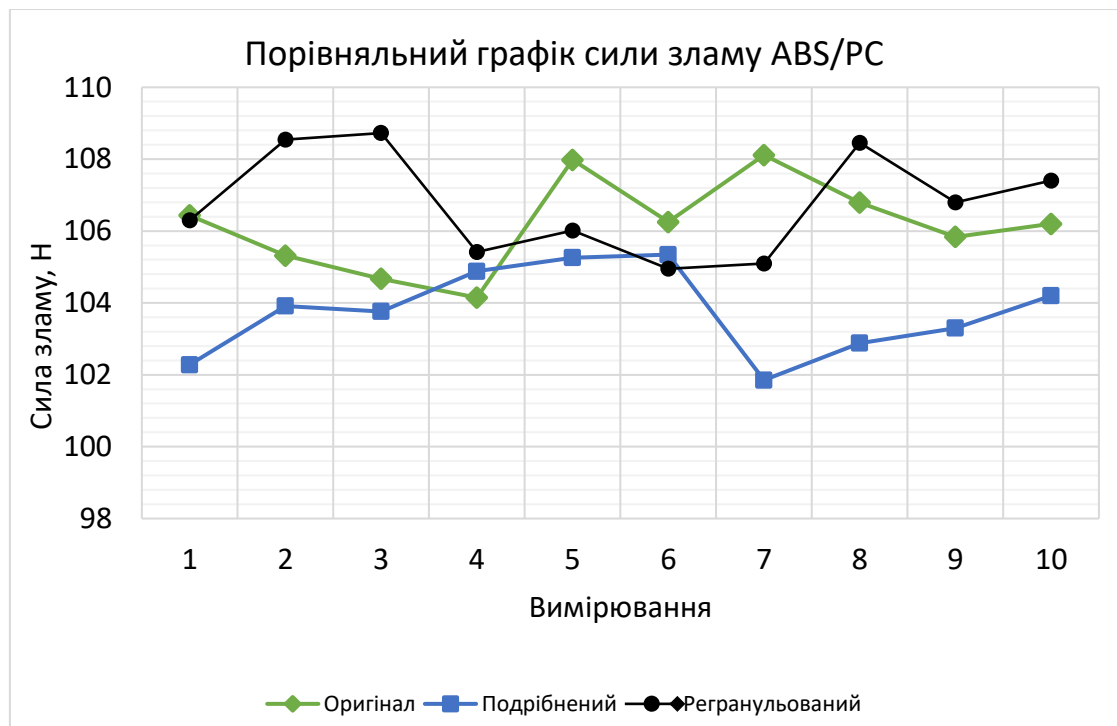


Рисунок 18 – Діаграма середньої сили зламу для деталей отриманих з ABS/PC різного походження

Отже, розбіжності сили зламу (рис. 18) є не значущими. Властивості подрібненого вторинного матеріалу ABS/PC відхиляються від оригінальної сировини менше ніж на 5%, що є цілком прийнятних для продукту. Для зменшення відхилення достатньо буде додати в подрібнений вторинний ABS/PC 50% мас оригінального матеріалу або регранульованого.

3.3. Регулювання експлуатаційних характеристик полімерних виробів отриманих методом лиття пластмас під тиском

Наступним етапом роботи було дослідження впливу деяких основних параметрів процесу лиття пластмас під тиском на властивості деталей з PA12, а саме на резистентність до етилового спирту C₂H₅OH.

Якість виробу з пластику, виготовленого методом лиття під тиском залежить від багатьох факторів і може бути описана функціональною залежністю:

$$K = f(Z, T, P) \quad (11),$$

де: K – якість деталі; Z, T, P – фактори, що характеризують сировину, технологію виготовлення, режим термообробки деталі.

Ефективність термообробки деталей із пластиків залежить від правильного вибору температурно-годинного режиму обробки. Основними факторами впливу при термообробці є температура і час перебування полімерної композиції в литтєвій формі[118]. Тому регулювання експлуатаційних характеристик ПКМ шляхом розробки ефективної технології їх переробки може відігравати важливу роль у превентивному зменшенні частки відходів, які не переробляються. Метод отримання деталей та методологія дослідження подана в розділі 2.4.

Для дослідження впливу параметрів процесу лиття пластмас під тиском на хімічну стійкість PA12 до C₂H₅OH провели декілька експериментів (табл. 9). Для кожного експериментувикористали по 30 од. виробів в серійних умовах. Всі деталі, отримані з PA12 після кондиціонування були покладені до ємності із полярним розчинником етиловим спиртом C₂H₅OH в концентрації 96,6% об. Під дією етилового спирту вироби були витримані 10 хвилин, після чого вилучені для проведення візуальної оцінки якості та змін габаритних розмірів (рис. 19,20).

Таблиця 9. Порівняння основних параметрів процесу лиття пластмас під тиском

Параметри процесу / № експерименту	1	2	3	Різниця, %
Швидкість впорскування, мм/с	48	70	70	31,4
Контур охолодження №1, °С	90	90	100	10,0
Контур охолодження №2, °С	80	80	90	11,1

Під час першого експерименту, використовували лише вихідні параметри процесу. В наступних експериментах була збільшена швидкість впорскування на 31,4%. Для отримання кращих експлуатаційних властивостей було збільшено температуру контурів охолодження на 10-11% у порівнянні з вихідними параметрами технологічного процесу лиття пластмас під тиском.

Стандартні серійні параметри процесу.

Були проведені обміри критичного габаритного розміру отриманих деталей. На стандартних валідованих параметрах процесу лиття пластмас під тиском значення стабільності машини C_{mk} склало 48,61, а стабільність процесу C_{pk} – 23,39. За середнім значенням розмір сягає свого номінального значення 5,81 мм (довірчий інтервал $p=0,00005 < 0,05$)

На рисунку 21 можна бачити, що процес лиття є стабільним, розкид значень є мінімальним та переважно всі отримані деталі мають номінальне значення габаритного розміру. На рисунку 20 візуально помітне короблення деталей, отриманих з полімерної композиції PA12 за стандартних параметрів процесу.

В результаті взаємодії полімерної композиції PA12 та полярного розчинника етилового спирту ймовірно відбувається часткове руйнування хімічних зв'язків в структурі полімеру, що супроводжується значною деформацією виробів (рис. 20). Авторами роботи [119] показано, що поліаміди мають сильну міжланцюгову взаємодію через водневі зв'язки між амідними групами, а етиловий спирт може частково руйнувати ці водневі зв'язки за рахунок витіснення вологи з PA12.

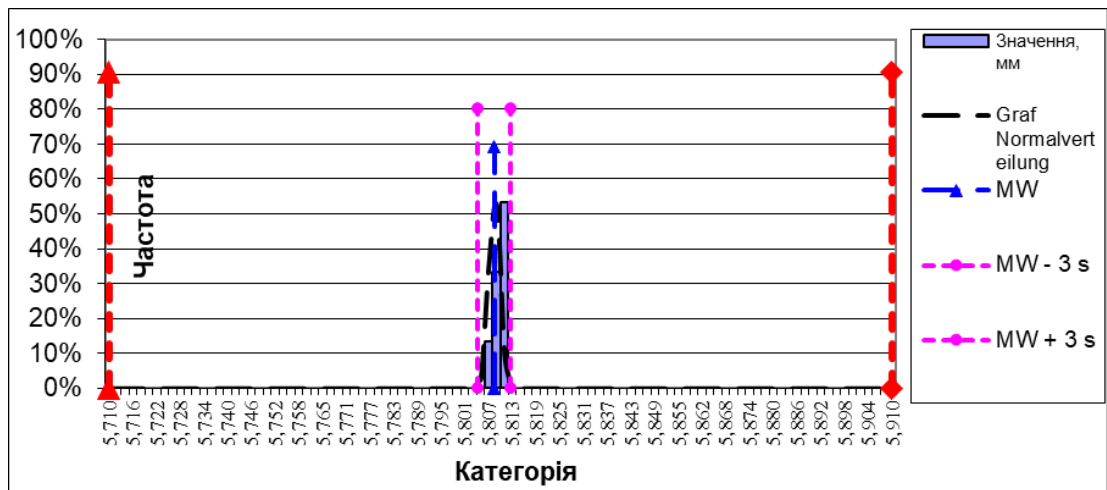


Рисунок 19. Діаграма нормального розподілу отриманих результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з PA12 за вихідних параметрів



Рисунок 20. Загальний вигляд виробу з PA12 із застосуванням стандартних параметрів процесу після витримки в C_2H_5OH

Після витримки в розчиннику, знову було проведено обміри габаритних розмірів. Діаграма (рис. 21) показує значущі зміни в розподілі отриманих значень. В такому випадку процес стає не стабільним, враховуючи і те, що деякі зразки мали розміри, які перебувають поза межами встановлених меж, а їх середнє значення склало 5,87 мм, що свідчить про збільшення на 0,06 мм габариту у порівнянні із виробами, які не підлягали дії розчинника.

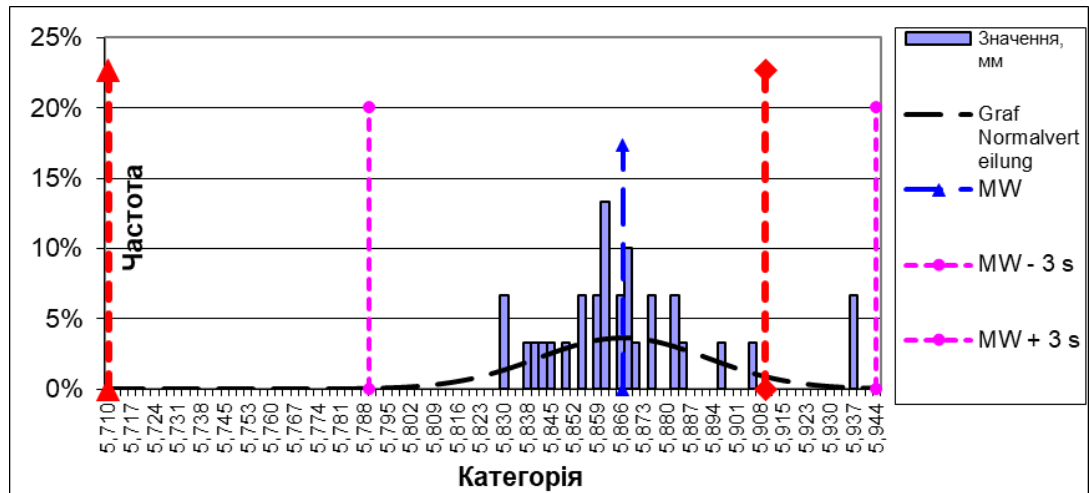


Рисунок 21. Діаграма нормального розподілу отриманих результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з РА12 на стандартних серійних параметрах після витримки в C_2H_5OH

Проводячи оцінку лінійних діаграм (рис. 22) можна зазначити, що відбулося значне збільшення габаритного розміру після витримки виробів у C_2H_5OH у порівнянні із деталями, які не підлягали зануренню в полярний розчинник. Також візуально можна бачити, що два розміри вийшли за допустимі межі.

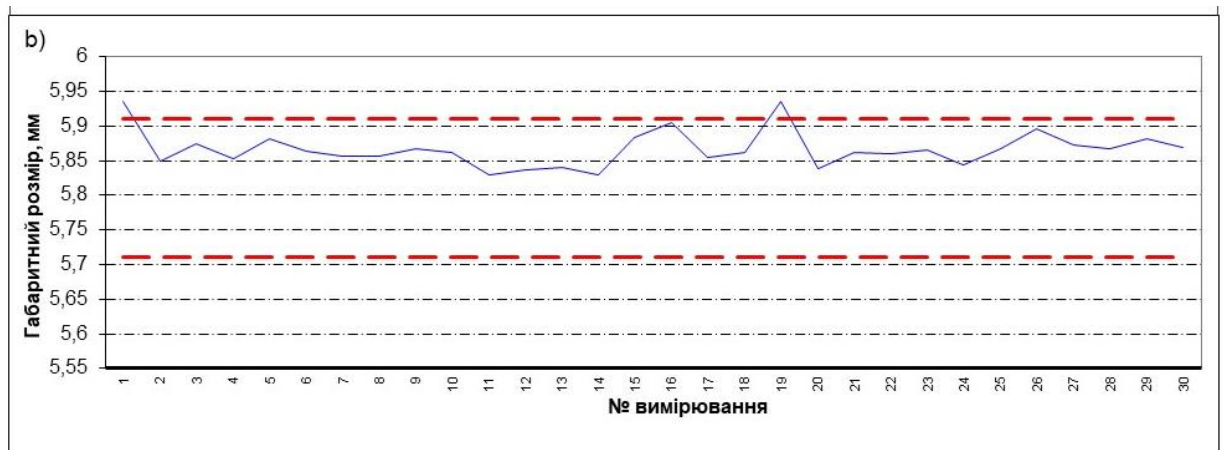


Рисунок 22. Лінійна діаграма отриманих результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з РА12 на стандартних серійних параметрах після витримки в C_2H_5OH 96,6% об.

Зміна швидкості впорскування в процесі лиття пластмас під тиском.

Під час проведення експерименту поступово були внесені суттєві зміни майже у всі параметри процесу, зокрема температури контурів охолодження прес-форми,

дозування. Однак після обробки в C_2H_5OH отриманих деталей за змінених умов, можна було спостерігати схожий ефект, який показано на рисунку 22.

Наступним етапом було проведення експерименту із такими параметрами, як швидкість впорскування. В результаті було отримано деталі, які не зазнали змін в якісних показниках. Підвищення швидкості впорскування відбувалося до стабілізації процесу, який сягнув значення $C_{pk} = 27,44$ та $C_{mk} = 27,11$ що відповідає вимогам та свідчить про успішну валідацію. Встановлено, що час впорскування при цьому зменшився на 38%. Водночас, габаритний розмір отриманих з PA12 виробів не зазнав значущих змін у порівнянні із серійними параметрами процесу та сягнув в середньому 5,809 мм ($p=0,00004 < 0,05$), що всього на 0,009 мм більше від номінального значення і знаходиться в допустимих граничних межах.

Діаграма нормального розподілу (рис. 23) показує достатньо високий рівень стабільності процесу попри внесені зміни, де більшість оцінюваних габаритних розмірів перебувають близько номінального значення.

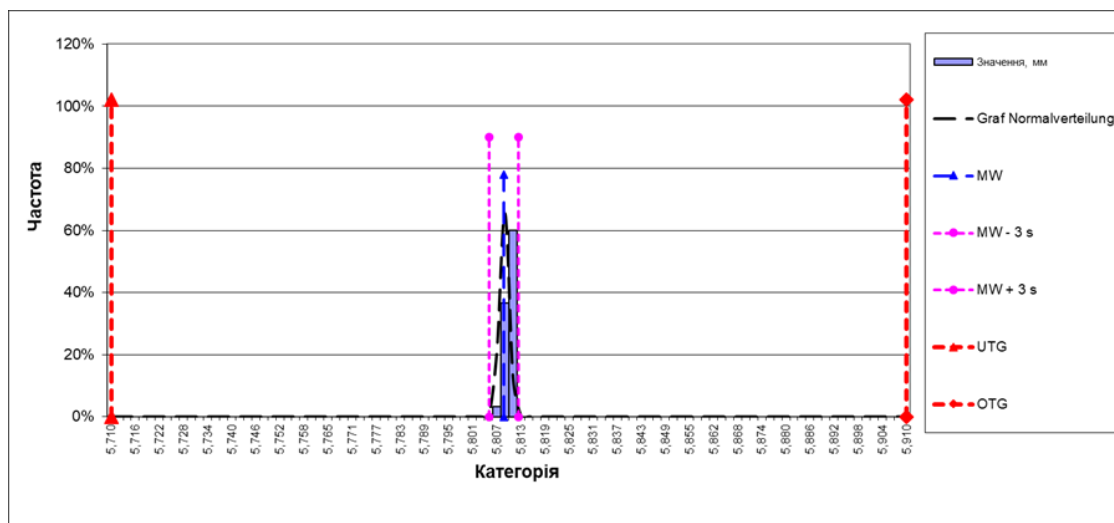


Рисунок 23. Діаграма нормального розподілу отриманих результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з PA12 із збільшеною швидкістю впорскування.

Після витримки деталей в звичайних кліматичних умовах, їх піддали впливу із витримкою в 10 хв полярному розчиннику.



Рисунок 24. Загальний вигляд виробу з PA12 із збільшеною швидкістю впорскування після витримки в C_2H_5OH 96,6% об.

На рисунку 24 можна також спостерігати короблення деталей, а отже змінюючи лише параметри впорскування, досягти необхідного рівня стійкості до полярного розчинника C_2H_5OH не вдалося.

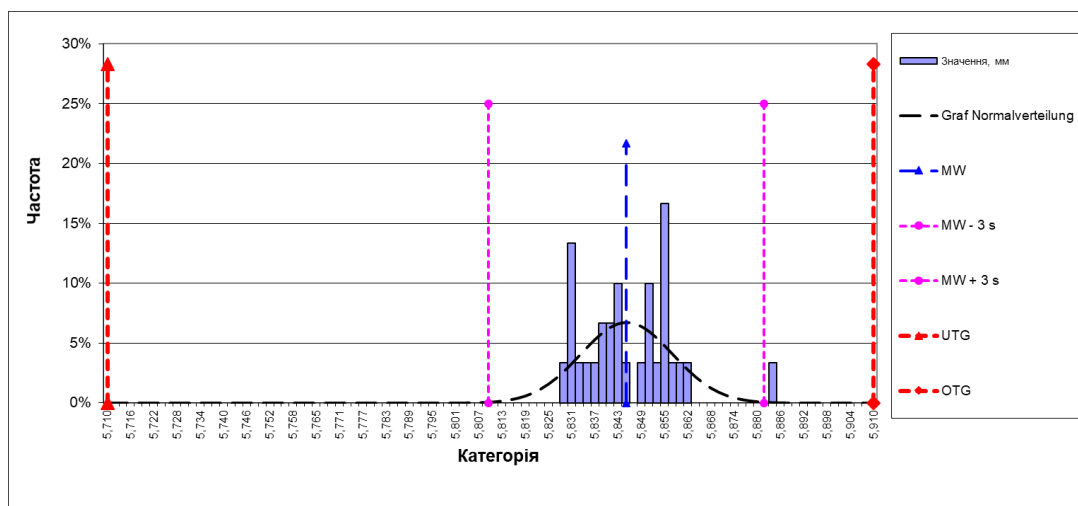


Рисунок 25. Діаграма нормального розподілу отриманих результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з PA12 із збільшеною швидкістю впорскування після витримки в C_2H_5OH 96,6% об.

Рисунок 25 демонструє вплив розчинника на габаритні розміри виробів, отриманих методом лиття пластмас під тиском із зміненими параметрами швидкості впорскування, де можна бачити відсутність виходу розмірів за межі допустимих, зважаючи також на те, що відхилення зменшилося в середньому на 0,021 мм у порівнянні із стандартними параметрами процесу.

Порівнюючи діаграми (рис.26) можна спостерігати, що габаритні розміри виробів, отриманих методом лиття пластмас під тиском із збільшеною швидкістю

впорскування після витримування в C_2H_5OH , знаходяться в допустимих межах (рис. 26b) у порівнянні із стандартними серійними параметрами (рис 26.a), де зафіксовано виходи розмірів за граничні допустимі межі.

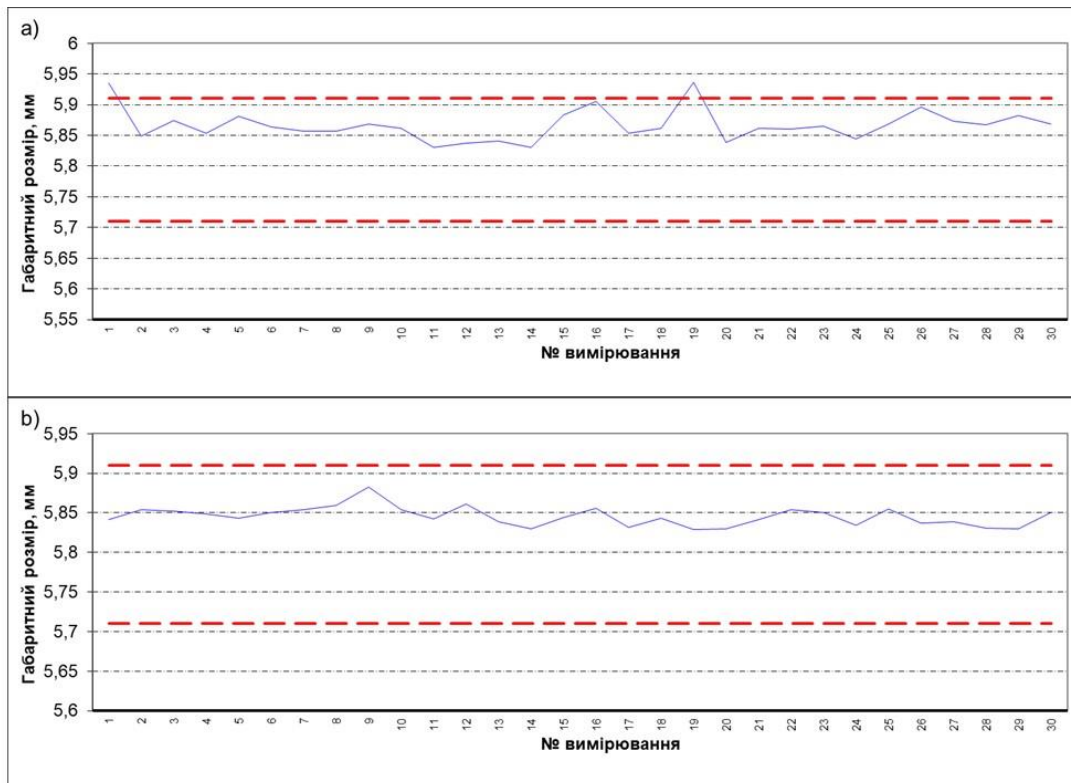


Рисунок 26. Лінійна діаграма отриманих результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з PA12 після витримки в C_2H_5OH 96,6% об: а) на стандартних серійних параметрах: б) зі зміненою швидкістю впорскування.

Зміни швидкості впорскування та температури контурів охолодження прес-форми процесу лиття пластмас під тиском.

Враховуючи те, що температура прес-форми має вплив на релаксацію деталей, прийнято рішення про незначне збільшення температури системи охолодження прес-форми із збереженням підвищеної швидкості впорскування. Після внесених температурних змін в контурах охолодження прес-форми, отримані деталі не зазнали змін в критеріях якості і є ідентичними до тих, що були отримані за серійних параметрів процесів лиття пластмас під тиском (рис.11). Сформовані вироби з PA12 витримували в етиловому спирті з метою оцінки їх хімічної резистентності.



Рисунок 27. Загальний вигляд виробу з PA12 із збільшеною швидкістю впорскування зі змінами температури охолодження прес-форми після витримки в C_2H_5OH

Отже, як показано на рис. 27, із оптимально підібраними параметрами процесу, короблення деталей візуально майже не спостерігається. Це, ймовірно, пояснюється тим, що при більшій швидкості впорскування та при вищій температурі системи охолодження прес-форми можна досягнути міцних ланцюгових міжмолекулярних взаємодій, що сприяє стійкості до агресивних хімічних середовищ, як це показано на прикладі етилового спирту.

Здійснивши обміри отриманих деталей та після обробки даних було встановлено, що стабільність процесу C_{pk} сягнула свого максимуму 48,61 та дорівнює стабільності машини C_{mk} , що і демонструє діаграма на рисунку 28. Це свідчить про те, що комплексні зміни параметрів лиття пластмас під тиском покращили показник стабільності.

Для об'єктивного підтвердження візуальних спостережень покращення хімічної стійкості отриманих виробів з PA12, були проведені обміри деталей, витриманих в C_2H_5OH за тих самих умов.

Діаграма нормального розподілу (рис. 29) показує відсутність значень габаритного розміру деталей, які не лише не вийшли за межі допустимих меж, а й знаходяться в діапазоні $\pm 3\sigma$, що в свою чергу свідчить про низьку вірогідність потрапляння за граничні межі. Це є важливою характеристикою експлуатаційних властивостей, адже не буде мати вплив на готові деталі у безпосереднього споживача.

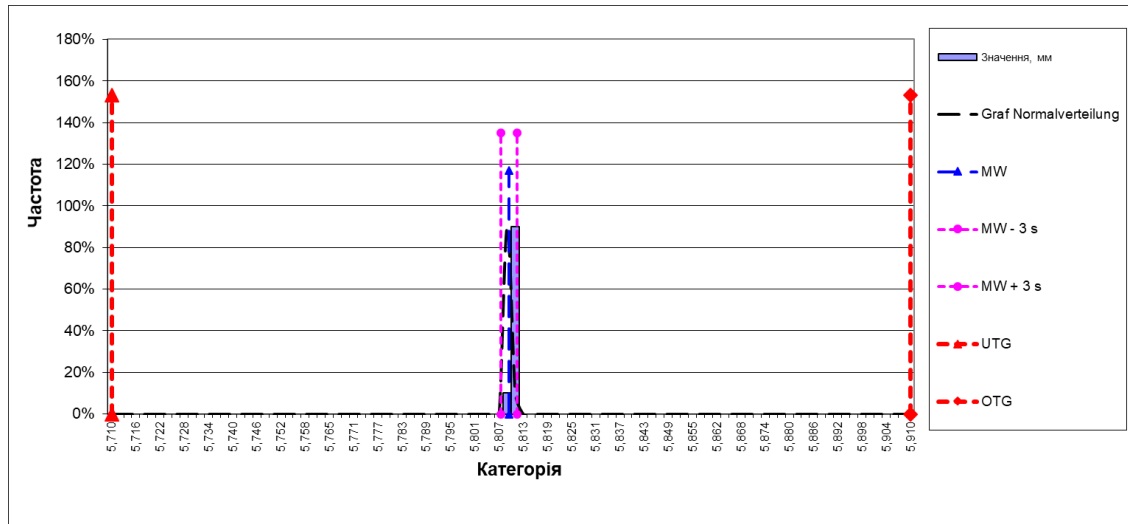


Рисунок 28. Діаграма нормального розподілу результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з РА12, отриманих із збільшеною швидкістю впорскування і підвищеною температурою охолодження прес форми.

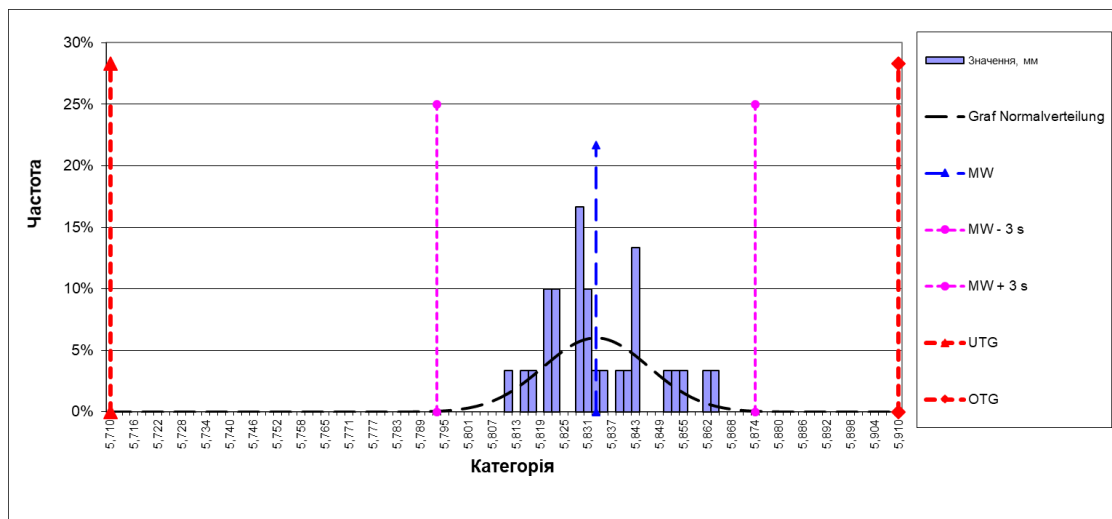


Рисунок 29. Діаграма нормального розподілу результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з РА12 після витримки в C_2H_5OH , отриманих із збільшеною швидкістю впорскування і температурою системи охолодження прес-форми

За таких умов середнє значення розміру складо 5,833 мм ($p=0,00003 < 0,05$) та є меншим на 0,012 мм відхиленням, ніж за параметрів без коригування температури контурів охолодження прес форми.

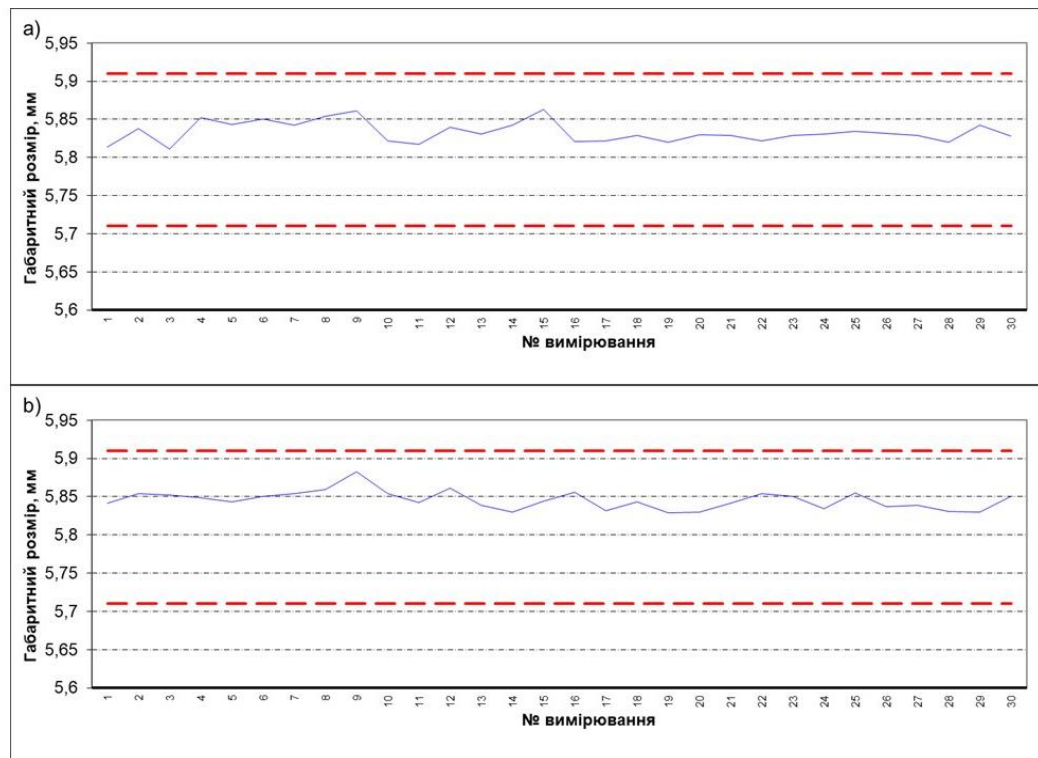


Рисунок 30. Лінійна діаграма результатів вимірювання габаритних розмірів деталей з PA12 після витримки в C_2H_5OH , отриманих: а) зі зміненою швидкістю впорскування; б) зі зміненими швидкістю впорскування та температурою охолодження прес форми.

Необхідно зазначити, що результати взаємодії із етиловим спиртом деталей з PA12, отриманих методом лиття під тиском на змінених параметрах швидкості впорскування та температури охолодження ПФ (рис. 30b), не суттєво відрізняються від результатів, отриманих зі змінами лише швидкості впорскування (рис. 30a), хоча спостерігається більша стабільність і менший розкид значень.

Таким чином, проведені дослідження вказали, що при відповідному режимі термічної обробки деталей, виготовлених із композитів на основі поліамідів, можна досягти поліпшення їх властивостей.

В ході проведення експерименту було виявлено можливість суттєво покращити експлуатаційні характеристики виробу з PA12, отриманого методом лиття пластмас під тиском. Доведено, що збільшення швидкості впорскування на 31,4% та збільшення температури охолодження прес-форми в обох контурах в середньому на 10,6% позитивно впливає не лише на хімічну стійкість деталей з PA12, а й вдвічі (на

207,8%) покращує стабільність процесу C_{pk} , який збільшився з 23,39 до 48,61. Показано, що деталі, які отримували з оптимізованими параметрами процесу лиття пластмас під тиском майже не зазнавали короблення під впливом полярного розчинника C_2H_5OH .

3.4. Обладнання та метод отримання гранул із подрібнених багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів

Отримання гранул із подрібненого матеріалу вторинних ПКМ має низку переваг. Окрім забезпечення чистоти навколо робочих зон технологічних процесів, це також позитивно впливає на фізико-механічні та реологічні властивості матеріалів та деталей, які отримуються з них [120, 121].

Існують вже готові для системного серійного застосування пристрої та обладнання для грануляції вторинних полімерів. Тим не менше, вибір і доцільність використання подібних установок залежить від основної сфери діяльності підприємств. Якщо однією з основних технологій є лиття пластмас під тиском, то інвестиції в промислові комплекси часто є не виправданими з точки зору фінансової ефективності.

В ході виконання досліджень, було розроблено процес та пристосування для отримання гранул з багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів. На рисунку 31 подано концептуальну модель додаткового пристосування.

Принцип дії пристосування (рис. 31) наступний: з розвернутого на 45° відносно осі литтєвої машини *вузла впорскування* 7 подається розплав ПКМ через *резервуар охолодження* 6 до валкового живильника 5; далі через *направляючий ложемент* 4 нитки екструдату потрапляють в зону нарізання, яка складається з *пневматичного циліндру* 3 та *ріжучої пари* 2; отриманий гранулят потрапляє до *збірника гранул* 1. Весь комплекс механізмів закріплений на *підставці* 8 та є мобільним.

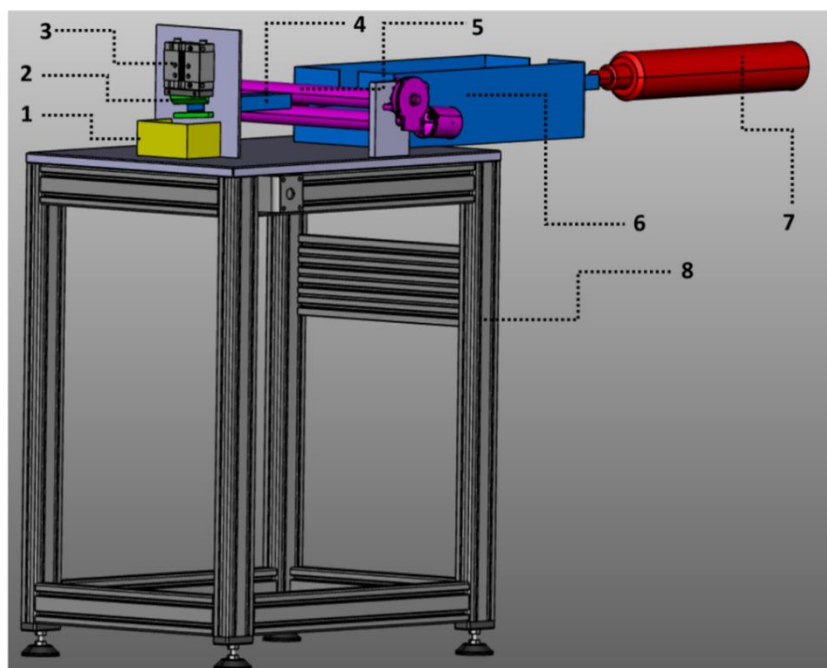


Рисунок 31. 3D модель додаткового пристосування до литтєвої машини для отримання гранул з подрібнених відходів ПКМ: 1) збірник гранул; 2) ріжуча пара; 3) пневматичний циліндр; 4) направляючий ложемент; 5) валковий живильник; 6) резервуар охолодження; 7) вузол впорскування з литтєвої машини; 8) підставка.

Параметри процесу налаштовуються на литтєвій машині в залежності від полімерних композицій, які підлягають обробці. В роботі гранули отримували з вторинної композиції ABS/PC, а також із суміші відходів PA6GF30/PC у співвідношенні компонентів 90/10 % мас. В таблиці 10 наведено основні параметри процесу отримання гранул із подрібнених відходів ABS/PC та суміші PA6GF30/PC.

Даний комплекс для отримання гранул з подрібненої вторинної сировини передбачає можливість проведення налаштувань технологічних параметрів, залежно від матеріалу чи суміші матеріалів, а також від інших специфічних вимог, таких як розмір гранули тощо. Для запуску процесу необхідно підготовлювати матеріал до переробки.

Таблиця 10. Параметри процесу отримання гранул із вторинних подрібнених матеріалів

Параметри процесу	ABS/PC	PA6GF30/PC
Температурний профіль зон циліндру, °C	255-260	275-285
Швидкість дозування, мм/с	46,2	21,7
Температура охолодження, °C	30	30
Температура сушіння, °C	110	115
Час сушіння, год	4	4,5

На рисунку 32 показано загальну схему технології отримання гранул із багатокomпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів.



Рисунок 32. Технологічна схема отримання гранул з відходів ПКМ

Отже, сам процес отримання гранул з відходів полімерних композиційних матеріалів (рис. 32) включає в себе весь цикл послідовних дій від збирання відходів до пакування отриманого матеріалу для подальшого використання.

Пристосування було складено із наявних засобів на *ТОВ «Костал Україна»*, де проводилися дослідження. Далі отримана концептуальна одиниця (рис. 33) обладнання була розміщена в робочій зоні литтєвої машини.



Рисунок 33. Фотографії розміщення обладнання в робочій зоні литтєвої машини

На рисунку 33 показано концептуальне розміщення пристосування відносно литтєвої машини. Компактні розміри створюють сприятливу ергономіку та доступи до налаштування чи обслуговування деталей та механізмів.

Створена концепція додаткового пристосування до литтєвої машини для отримання гранул із багатокомпонентних сумішей полімерних композитів демонструє придатність до використання, невеликі габаритні розміри та простоту конструкції, яка здатна до модернізації.

Висновки до Розділу 3.

Показано, що за переважаючого вмісту РА в суміші РА6GF30/РС ймовірно відбувається часткова кополімеризація в результаті хімічної взаємодії з РС. Вірогідно у випадку застосування склонаповненого поліаміду в суміші з полікарбонатом саме частки скло-наповнювача виконують функцію своєрідного компатибілізатора. Вище значення MVR і менша густина утвореного продукту може свідчити про нижчий ступінь кристалічності. Це дозволяє переробляти суміш не підвищуючи температуру без погіршення механічних властивостей.

Визначено, що за переважаючого вмісту полікарбонату в полімерній композиції вплив поліаміду нівелюється завдяки явищу інкапсуляції поліаміду в структурі полікарбонату, що чітко видно під час дослідження морфології сумішей. Суміш набуває характеристик полікарбонату, що супроводжуються поступовим підвищенням межі міцності при стисненні. З огляду на результати досліджень, можна

рекомендувати до переробки литтям під тиском вторинну суміш PA6GF30/PC за складом 90/10, 80/20, 70/30% мас. За вказаних співвідношень компонентів зберігаються передбачувані фізико-механічні властивості готової продукції у поєднанні із оптимальними режимами переробки лиття під тиском.

Доведено, що сила зламу полімерних деталей з ABS/PC під час переробки литтям під тиском не зазнала значного зменшення при повторному використанні подрібненої сировини, без суттєвих змін параметрів технологічного процесу. Регранульована вторинна полімерна суміш ABS/PC демонструє не значне збільшення сили зламу на $\approx 0,58\%$. Це в свою чергу доводить можливість отримати ресурсозберігаючу технологію та позитивно вплинути на екологічні аспекти. Рекомендується додавання подрібненої композиції ABS/PC до оригінального полімерного матеріалу до 50% мас., або регранульованої – до 80% мас.

Підтверджено, що основними факторами впливу при термообробці полімерів є температура і час перебування полімерної композиції в литтєвій формі. Експериментально доведено покращення експлуатаційних властивостей PA12, а саме стійкості до C_2H_5OH шляхом збільшення тиску впорскування на 31,4% та температури контурів системи охолодження литтєвої прес-форми на 10,6%, що забезпечило суттєве зростання (на 207,8%) стабільності процесу. Покращення якості деталей за сталих витрат у структурі собівартості виготовлення позитивно впливає на фінансову ефективність, а отже може забезпечити уникнення утворення відходів в процесі експлуатації виробів. Рекомендується проводити валідацію технологічного процесу отримання деталей з PA12 з оцінкою результатів визначення експлуатаційних та хімічних властивостей.

Створений концепт пристосування для отримання гранул із подрібнених сумішей вторинних ПКМ значно спрощує процес їх переробки. Це дає змогу позбутися чинників навколишнього середовища, які «забруднюють» матеріал та отримати гранули з сумішей, які після попередньої сушки є готовими до повторного використання. Гранули, на відміну від подрібненого матеріалу мають нижчий рівень варіації розміру, що спрощує не лише процес їх переробки, а й зменшує витрати на зберігання чи транспортування.

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ВАЛІДАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ МЕТОДОМ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ

4.1. Основні положення валідації процесу лиття пластмас під тиском

За ISO9000:2015, *валідація* – це надання об’єктивних доказів на підтвердження того, що вимоги дотримуються та процес працює так, як це передбачалося [122]. Інакше кажучи, *валідація* є процесом збору даних та аналізу отриманої інформації із подальшою оцінкою спроможності процесу досягати очікуваних результатів. В доступних наукових працях показано, що перші згадки про валідацію датуються 1928 р. Саме тоді виникла потреба валідувати методи випробування лісового насіння на ідентичність. Тим не менше, лише в 1954 році ці підходи були включені в європейські правила ISTA (International Seed Testing Association – Міжнародна Асоціація Тестування Насіння) [123].

Отже, валідації можуть підлягати, як будь які процеси, так і результати цих процесів у вигляді продукції, послуги тощо. Валідація передбачає проведення комплексної оцінки процесу та основних критеріїв якості результату на відповідність заданим вимогам. Як правило, це необхідно виконувати для отримання гарантій, які підтверджують наступне:

- процес протікає правильно;
- процес правильно використовується;
- всі рішення впроваджені правильно [124];
- процес та (або) результат є безпечним і відповідає критеріям якості (СТQ).

Існує багато методів та підходів щодо проведення валідації. Це залежить від сфери діяльності, де відбувається провадження процесу і від вимог, які висуваються до технології, продукту чи сервісу. В фармації верифікація може мати багато етапів, які включають в себе не лише перевірку обладнання, а й людських ресурсів [125]. В галузі лиття пластмас під тиском, необхідність проведення валідації може обумовлюватися специфічними внутрішніми чи галузевими вимогами, такими як:

- стандарти автомобілебудування [17];

- необхідністю у превентивному забезпеченні якості шляхом оптимізації параметрів лиття під тиском [126. 127];

- покращенні дизайну литтєвих прес-форм [128] та ін.

Отже, валідація технології лиття пластмас під тиском є складним процесом, однак необхідно розпочинати її впровадження за виникненням хоча б однієї з наступних умов:

- новий продукт;

- будь які інженерні зміни продукту;

- суттєві зміни параметрів технологічного процесу;

- втручання в прес форму: створення нової або корекція розмірів, або проведений ремонт;

- введення в експлуатації нової литтєвої машини;

- заміна сировини.

Для спрощення сприйняття та структурування етапів валідації, доцільно застосовувати методику *PDCA* (*Plan* - Плануй, *Do* - Виконуй, *Check* – Перевірй, *Act* - Дій)(табл. 11-14). Відповідно до ISO 9001 на етапі *планування* здійснюється визначення цілей, підготовка ресурсів, визначення необхідної документації для досягнення відповідних результатів. На стадії *виконання* реалізуються всі заплановані дії. Під час *перевірки* виконують аналіз отриманих даних та оцінку їх відповідності до очікуваних результатів. Завершальний крок *дія* передбачає прийняття подальших рішень відповідно до отриманих результатів аналізу та проведеної оцінки [129]. Структурований підхід до валідації сприяє уникненню втрат у вигляді виконання зайвих чи не потрібних кроків водночас із забезпеченням високої ефективності та швидкості прийняття необхідних рішень. *PDCA* це замкнута послідовність дій, яка дає змогу повернутися на будь який крок у разі досягнення негативного результату. До структури валідації технології лиття пластмас під тиском можна віднести наступне: документація, метод, опис методу, показники процесу та критерії оцінки.

Таблиця 11. Загальна структура фази «*плануй*» процесу *валідації* методу лиття

пластмас під тиском

Стадія	Крок / метод	Стислий опис	Примітки / показники	Документ
Plan (Плануй)	Підготовка ініціальної документації	1. Огляд технічної документації виробу 2. Визначення параметрів процесу 3. Визначення критеріїв якості 4. Визначення цільових меж	1. Критичні геометричні розміри, маса нето / брутто 2. Час циклу, тиск та швидкість впорскування, об'єм подушки розплаву 3. Допустимі відхилення	1. Креслення 2. Карта параметрів. Паспорт матеріалу. Характеристики обладнання. 3. Каталог помилок / браку 4. Контрольна карта валідації
	Підготовка матеріалу	1. Визначити розмір вибірки 2. Визначити потребу в сировині. 3. Доставка матеріалу до місця випробування	1. 10-50 циклів 2. Необхідно додати 5% технологічних втрат на запуск. Маса брутто.	1. Залежить від галузі 2. Креслення
	Підготовка основного та допоміжного обладнання	1. Налаштування процесу лиття під тиском. 2. Підготовка вимірювальних пристроїв	1. Час на переналадку	1. Карта параметрів 2. Креслення
	Підготовка до збору даних	Створення плану та протоколу вимірів	Відповідно до документації	1. Креслення 2. Карта параметрів 3. Каталог помилок / браку 4. Контрольні карти

Розмір вибірки в таблиці 11 залежить від основної галузі, де ПКМ переробляються методом лиття під тиском. В автомобілебудуванні прийнятною вибіркою для подальшої оцінки є 50.

Таблиця 12. Загальна структура фази «*виконуй*» процесу *валідації* методу лиття пластмас під тиском

Стадія	Крок / метод	Стислий опис	Примітки / показники	Документ
До (Виконуй)	Запуск процесу	1. Виконання студії наповнення 2. Вивід процесу на номінальний режим	1. Ступінь наповнення деталей 2. Перші 3-5 циклів необхідно вилучити із оцінки	1. Не вимагається 2. Карта параметрів.
	Отримання зразків	Після виходу процесу лиття пластмас під тиском на номінальний режим, зразки збираються та переміщуються до визначеного місця тимчасового зберігання	Отримані зразки мають бути витримані в звичайних умовах до 48 годин	Не вимагається
	Збір даних	1. Фіксуються визначені показники процесу. 2. Проведення обмірів продукції 3. Візуальний огляд продукції	1. Статистику збирають з монітору литтєвої машини 2. Після витримки 48 годин	1. Карта збору варіабельних показників 2. Карта збору варіабельних та атрибутивних показників, креслення

Студія наповнення деталей (табл. 12) необхідна для оцінки придатності литтєвої прес форми. Всі отримані зразки з всіх гнізд форми мають мати однакові візуальні ознаки. Параметри витримки обумовлені необхідністю належної релаксації та усадки деталей. Цей крок є необхідним для проведення належного аналізу отриманих лінійних розмірів. До атрибутивних показників відносять результати візуальної оцінки якості, основні критерії якої буде наведено в розділі 4.3.

Таблиця 13. Загальна структура фази «перевірй» процесу валідації методу лиття пластмас під тиском

Стадія	Крок / метод	Стислий опис	Примітки / показники	Документ
Check (Перевірй)	Визначення придатності процесу	Статистична обробка даних показників лінійних розмірів продукту за <i>6SIGMA</i>	C_{pk} – стабільність процесу	Карта збору варіабельних показників обмірів основних лінійних розмірів
	Визначення придатності машини	Статистична обробка даних показників процесу за <i>6SIGMA</i>	C_{mk} – стабільність машини	Карта збору варіабельних показників основних показників процесу
	Визначення рівня якості	Аналіз результатів візуальної оцінки якості отриманих виробів	ppm (partpermillion) – бракованих деталей на 1 мільйон виготовлених	Карта збору атрибутивних значень

Метод визначення стабільності процесу C_{pk} та стабільності машини C_{mk} , що подані в таблиці 13, наведено у розділі 4.2. Граничні межі цих показників обумовлюються стандартами та положеннями відповідних галузей застосування технології лиття пластмас під тиском. В даній роботі дослідження проводилося на прикладі процесу лиття під тиском деталей для автомобілів. Результати дослідження, а також прийнятні значення цих показників наведено в розділі 4.4.

Показник рівня якості ppm (partpermillion - бракованих деталей на 1 мільйон виготовлених) демонструє прогноз втрат через появу браку в далекоглядній перспективі. Опис показника наведено в розділі 4.3.

Таблиця 14. Загальна структура фази «*дій*» валідації методу лиття пластмас під тиском

Стадія	Крок / метод	Стислий опис	Примітки / показники	Документ
Act (Дій)	Аналіз отриманих даних та прийняття рішення	На підставі результатів статистичної обробки даних приймається рішення стосовно придатності процесу	C_{pk} – стабільність процесу C_{mk} – стабільність машини ppm (partspermillion) – бракованих деталей на 1 мільйон виготовлених	Контрольна карта (перевірочний лист) валідації

Завершальна фаза валідації технології лиття пластмас під тиском (табл. 14) передбачає прийняття рішень стосовно придатності та відповідності процесу до висунутих вимог. Серед основних рішень можна виділити наступні:

а) валідація пройдена успішно. Це означає, що процес досягнув очікуваних результатів та є придатним до використання;

б) валідація *не* пройдена. Таке рішення приймається у разі будь яких відхилень від граничних меж в будь яких визначених показників чи критеріях процесу та (або) продукту. В такому випадку необхідно впровадити коригуючі заходи для покращення визначених показників та провести повторну валідацію відповідно до описаного процесу. У разі, якщо впроваджені заходи не принесли бажаного результату, то така технологія вважається не придатною та потребує більш системної оптимізації.

Всі зазначені загальні положення знаходяться в сфері діяльності та відповідальності інженерії в якості прийняття рішень та формування міжфункційної команди фахівців для виконання валідації процесу.

4.2. Теоретичні обґрунтування методу оцінки стабільності процесу та основного обладнання лиття пластмас під тиском

В технологічному процесі лиття під тиском важливо отримувати вироби належного рівня якості з мінімальними втратами. Саме тому стабільність процесу (C_{pk}) та обладнання (в нашому випадку литтєвої машини) (C_{mk}) відіграють ключову роль під час проведення валідації. Адже відповідні показники стабільності процесу й машин забезпечують отримання продукції, яка на 100% відповідає вимогам клієнта й, зокрема, стандарту в галузі автомобілебудування *IATF 16949* [17].

Вимірювання стабільності є однією з методологій *6SIGMA*, що дає змогу досягати бажаних результатів багатьох складових процесів лиття пластмас під тиском, таких як: величина усадки, підбір раціональних параметрів [130]; профілів швидкості та тиску впорскування, що забезпечує певний рівень свободи для оптимізації і управління процесом [131]. Прийнятний рівень стабільності обладнання (C_{mk}), зокрема для литтєвої машини в галузі автомобілебудування має бути більшим за 1,67 або можна записати, як $C_{mk} \geq 1,67$ [132-134]. Показник стабільності процесу (C_{pk}) можна записати, як $C_{pk} > (1,33-2,0)$, тобто ідеально стабільним процес вважається зі рівня $C_{pk} > 2,0$, хоча допустимим прийнятним нижнім рівнем можна вважати $C_{pk} = 1,33$. В сфері автомобілебудування рекомендовано досягати $C_{pk} > 2,0$, що гарантує виготовлення якісної продукції [135, 136]. В литті пластмас під тиском, особливо для отримання продукції відповідно до високих рівнів вимог стосовно допусків розмірів, показник стабільності процесу відіграє ключову роль не лише при запуску серійного виробництва, а й впродовж всього циклу життя продукту. Ефективність застосування таких методів доводить свою практичну значимість шляхом покращення рівня якості отриманих деталей [137]. Це також сприяє оцінці стану та спроможності процесу [138]. Варто зазначити, що використання методики *6SIGMA* для управління та оптимізації технологій, може суттєво покращити їх рівень якості [139] шляхом здійснення статистичного контролю процесу. Це дозволяє вчасно виявити відхилення на системному рівні для запобігання повтореному виникненню невідповідностей.

Отже стабільність машини C_{mk} – це відношення відстані між фактичним середнім значенням вимірюваного показника машини та найближчою межею

специфікації до трьох стандартних відхилень фактичного значення. Стабільність процесу C_{pk} – те ж саме відношення, що і для C_{mk} , але середні значення формуються із значень множини вибірок. Тобто C_{mk} показує придатність самої машини під час збору даних, а C_{pk} показує вже комплексні результати придатності всього процесу з прогнозом оцінок на довготривалий термін. Зазначені показники обчислюються за формулами [140]:

$$C_{mk} = \left\{ \min \left(\frac{\bar{X} - LSL}{3S} \right); \left(\frac{USL - \bar{X}}{3S} \right) \right\} \quad (12),$$

$$C_{pk} = \left\{ \min \left(\frac{\bar{\bar{X}} - LSL}{3S} \right); \left(\frac{USL - \bar{\bar{X}}}{3S} \right) \right\} \quad (13).$$

В формулах 13 та 14:

S – квадратичне відхилення (коефіцієнт Стюдента), який обчислюється за формулою 3;

LSL (lowerspecificationlimit) – нижня межа специфікації;

USL (upperspecificationlimit) - верхня межа специфікації.

В формулі 7:

\bar{X} - середнє значення отриманих даних, яке розраховується за формулою:

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n} \quad (14), \text{ де}$$

x – значення отриманих даних;

n – число даних;

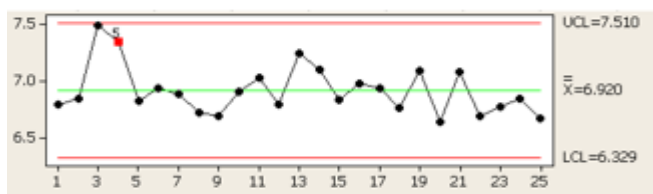
В формулі 8:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}}{m} \quad (15), \text{ де}$$

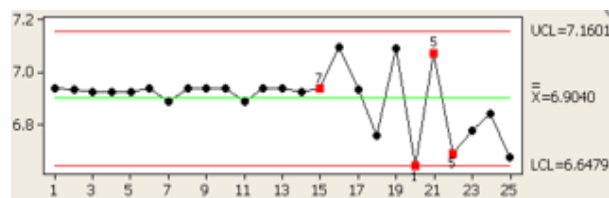
m – число вибірок.

Специфікації в формулі 12 можуть бути визначені критичні показники процесу лиття під тиском. Зазвичай використовують об'єм подушки розплаву або тиск впорскування. Натомість оцінку придатності процесу виконують, оцінюючи вже продукт, а саме такі його характеристики, як критичні лінійні розміри.

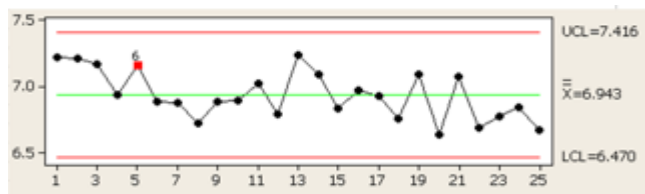
Для прийняття рішення, необхідно провести оцінку стану процесу по результатам отриманих показників стабільності C_{mk} та C_{pk} , а також оцінивши графічний розподіл отриманих даних (рис. 34).



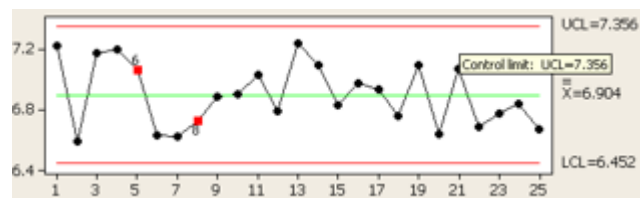
а)



б)



в)



г)

Рисунок 34. Основні ознаки неконтрольованого стану процесу: а) 2 з 3 значень відхиляються більше, ніж на 2 стандартних відхилення; б) 15 значень поспіль знаходяться в межах 1 стандартного відхилення від середнього значення; в) 4 з 5 значень відхиляються більше, ніж на 1 стандартне відхилення від середнього значення; г) 8 значень поспіль знаходяться за межами 1 стандартного відхилення від середнього значення.

Основні ознаки неконтрольованого технологічного процесу (рис.34) можуть вказувати на типові помилки, які необхідно усунути та провести повторну оцінку. Розподіл даних на рисунку 34а може вказувати на помилки, які були допущені під час або після запуску самого технологічного процесу. Ознаки на рисунку 34(б) демонструють несправність обладнання, яка виникає вже після запуску процесу. На рисунку 34в показано наслідки ймовірно не правильно обраний чи не придатний метод вимірювання. Перебіг процесу, що демонструється на рисунку 34г може вказувати на використання невідповідної сировини. У разі, якщо після повторної оцінки, отримуються подібні результати (рис.34), це свідчить про непридатність процесу.

4.3. Особливості оцінки якості виробів з вторинних сумішей полімерних композиційних матеріалів в автомобілебудуванні

До виробів, які отримуються з ПКМ методом лиття пластмас під тиском висувають різноманітні вимоги та критерії якості (*CTQ – criteriatioquality*). Це залежить від сфери використання виробів, від особливостей законодавчих вимог в країнах застосування та інших аспектів. Одним з методів забезпечення якості є метод контролю отриманих деталей. Сам контроль поділяють на наступні типи:

1. Візуальний контроль. Тут проводиться оцінка рівня якості виробів за візуальними атрибутивними ознаками шляхом порівняння сформованої продукції з еталонним зразком або іншою візуалізованою інформацією, такою як каталог браку, інструкції, тощо.

2. Варіабельний контроль. До цього типу контролю відносять проведення оцінки лінійних геометричних розмірів на відповідність до вимог. Вимоги в свою чергу обумовлені технічною документацією: кресленнями та (або) 3D моделями.

3. Атрибутивний контроль комбінує в собі перевірку виробів, як методом візуальної оцінки якості, так і оцінки геометричних розмірів. Відмінність полягає в тому, що фіксується лише факт наявності відхилення без зазначення об'єктивних даних.

Важливу роль, особливо при повторній переробці багатокомпонентних відходів ПКМ методом лиття пластмас під тиском, відіграє візуальний контроль, адже виявлені дефекти можуть свідчити про невідповідність самого матеріалу, наприклад наявністю сторонніх включень чи деструкції.

Основна складність у проведенні оцінки якості деталей, які отримуються методом лиття пластмас під тиском полягає в тому, що переважну більшість властивостей чи дефектів можна визначити лише після повного завершення технологічного циклу (розкриття прес-форми та вилучення сформованих деталей) [141].

Отже, в таблиці 15 наводяться основні дефекти отриманих методом лиття під тиском деталей з вторинних сумішей полімерних композиційних матеріалів в автомобілебудуванні.

Таблиця 15. Класифікація дефектів виробів, отриманих методом лиття під тиском з вторинних ПКМ

№	Назва дефекту	Візуальний приклад	Можливі причини виникнення
1	Пригари		Тривалий час та високі температури переробки.
2	Кольорові свилі		Несумісність матеріалів
3	Газоподібні включення		Термічна деструкція
4	Пригар (дизельний ефект)		Утворення газів в кінцевій точці протікання матеріалу
5	Вкраплення		Сторонні включення в сировині, інше забруднення. Термічна деструкція

В таблиці 15 подані лише основні значущі дефекти, які можуть виникати з більшою частотою та потребувати додаткового втручання в процес під час використання відходів багатокомпонентних ПКМ. До загальних невідповідностей

продукції, яка отримується методом лиття пластмас під тиском відносять: втяжини, вакуолі, недоливи, облої, наліт, дефекти поверхні та структури, такі як короблення, тріщини, відбитки виштовхувачів, відшарування та інші [142].

Враховуючи різноманіття та конструктивні особливості виробів, а також критеріїв якості, важливо володіти належною методикою візуальної перевірки (рис. 35) продукції на відповідність до вимог.

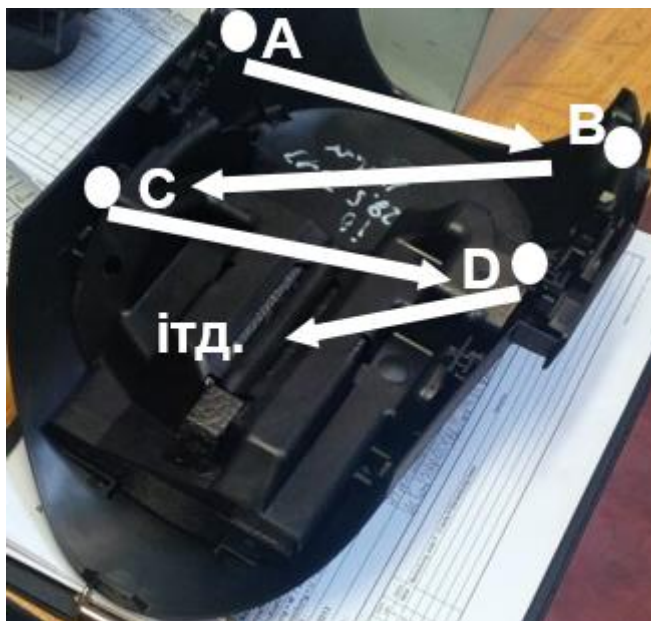


Рисунок 35. Порядок проведення візуального контролю деталей, отриманих методом лиття пластмас під тиском

Виконувати візуальний контроль необхідно починати з точки А (рис. 35). Далі погляд переводять на іншу деталь чи зразок і фокусують увагу на ту саму точку. Порівняння відбувається до тих пір, доки не буде встановлено відповідність до критеріїв якості або до виявлення дефекту. Далі, як показано на рисунку 35 необхідно сконцентрувати увагу на точці В (рис. 35) і виконати ті ж самі кроки, що і для точки А.

Для здійснення системного моніторингу рівня якості з метою покращення, використовують наступні показники:

- ppm – partspermillion – «деталей на 1 мільйон» - показує прогноз бракованої продукції, яка може утворитися за 1 мільйон циклів або за 1 мільйон готової якісної продукції. Показник розраховується за формулою:

$$ppm = \frac{\sum \text{бракованих виробів}}{\sum \text{виготовлених виробів}} * 10^6 \quad (16)$$

- рівень якості Q – є відношенням числа бракованої продукції до загального числа виготовлених деталей. Показник демонструє відносний загальний результат якості процесу та обчислюється за формулою:

$$Q = \frac{\sum \text{виготовлених виробів} - \sum \text{бракованих виробів}}{\sum \text{виготовлених виробів}} * 100\% \quad (17)$$

- відносний рівень браку D_q – показує рівень дефектів по відношенню до отриманої продукції та обчислюється за формулою:

$$D_q = \frac{\sum \text{бракованих виробів}}{\sum \text{виготовлених виробів}} * 100\% \quad (18)$$

Цільові значення поданих показників встановлюється індивідуально. Так, в сфері автомобілебудування ppm прагне нуля ($ppm \rightarrow 0$). Це обумовлюється тим, що виробники автомобілів беруть за основу принцип «нуль дефектів» [143] для досягнення найкращого результату, а також пояснюється складністю сучасних авто [144, 145]. Для технології лиття пластмас під тиском прийнятним є наступні граничні межі: $ppm \leq 2000$; $Q \geq 95\%$; $D_q \leq 5\%$.

4.4. Вплив використання багатокomпонентних полімерних відходів на основні технологічні параметри та на стабільність процесу лиття пластмас під тиском

На наступному етапі дослідження визначали вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском при повторному використанні нерозділених мультикомпонентних відходів полімерних композицій PA6GF30/PC.

Методи отримання зразків та проведення дослідження подано в розділі 2.1. Теоретичні основи оцінки стабільності процесу лиття пластмас під тиском відображені в розділі 4.2.

Відливання деталей з отриманої суміші багатокomпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів здійснювали за стандартних серійних параметрів технологічного процесу лиття пластмас під тиском з подальшою оцінкою та їх частковим коригуванням для досягнення оптимальної стабільності процесу та

рівня якості. При цьому було встановлено, що якість отриманих деталей з подрібнених полімерних відходів відповідає основним критеріям вимог та специфікаціям замовника: візуальним (без пошкоджень та із відповідною структурою, наповненою, без додаткових елементів чи облоїв), тактильним (вмонтовано в готовий виріб та перевірено відчуття перемикавання) та геометричним (відповідність до креслення). Це свідчить про те, що незначне коригування процесу в повному обсязі задовольняє всім вимогам до якості компонентів. Методи оцінки якості та типи контролів подані в розділі 4.4.

В таблиці 16 наведено значення показників тиску впорскування та подушки розплаву.

Таблиця 16. Порівняльний аналіз змін показників технологічного процесу в розрізі циклів

№	$P_{\text{впор}}$, бар (PA6GF30)	$P_{\text{впор}}$, бар (PA6GF30 /PC)	Різниця, %	$C_{\text{розп.}}$, см ³ (PA6GF30)	$C_{\text{розп.}}$, см ³ (PA6GF30/ PC)	Різниця, %
1	885,4	982	11,92	4,83	4,76	19,25
2	890,8	985,5	11,53	4,81	5,81	20,79
3	897,3	986,6	9,95	4,85	5,48	12,99
4	886,7	977,8	10,27	4,84	5,85	20,87
5	897,4	980,0	9,23	4,56	5,68	24,56
6	887,4	988,1	11,35	4,92	5,98	21,54
7	890,0	986,9	10,89	4,51	5,72	26,83
8	887,8	985,1	10,96	4,60	5,94	29,13
9	900,3	981,1	8,97	4,73	5,73	21,14
10	891,4	982,7	10,24	4,91	5,91	20,37
$X_{\text{ср}}$	891,5	985,3	10,52	4,76	5,79	21,66
$C_{\text{мк}}$	2,68	2,38	-11,19	1,67	1,62	-2,99
$C_{\text{рк}}$	2,17	2,11	-2,77	2,02	2,01	-0,50

В ході дослідження встановлено статистично значимі зміни за середнім значенням двох показників процесу лиття під тиском, а саме тиску впорскування ($P_{\text{впор.}}$) та подушки розплаву (C) для вторинної суміші PA6GF30/PC у порівнянні з використанням первинного PA6GF30 (табл. 16, рис. 36).

З результатів, представлених в таблиці 15 видно, що середнє значення тиску впорскування для суміші PA6GF30/PC склало 985,3 бар, а подушки розплаву склало 5,79 см³, що на 10,5% та 21,7% відповідно більше в порівнянні з первинним PA6GF30.

Відмінності, що продемонстровані на рисунку 36 можна пояснити тим, що при температурних умовах процесу лиття (280-290⁰C), PC має більшу в'язкість за PA6GF30, що обумовлює зростання тиску впорскування та подушки розплаву (об'єму розплаву, який має залишатись до кінця фази підживлення перед головкою шнеку) для суміші PA6GF30/PC.

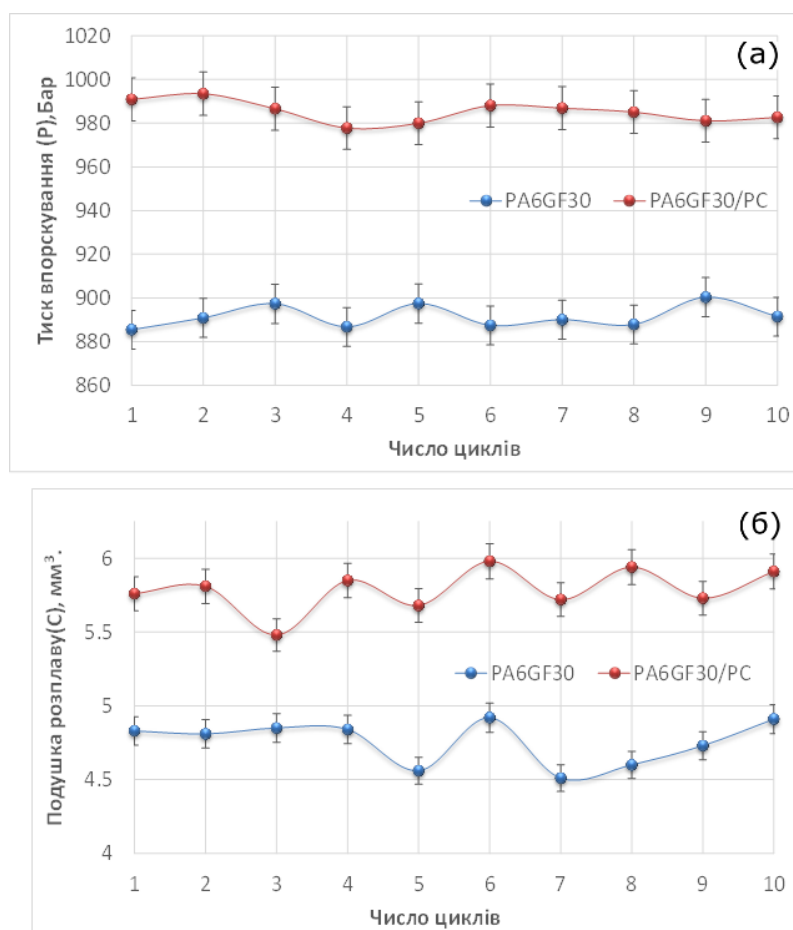


Рисунок 36. Зміни тиску впорскування (а) та подушки розплаву (б) в розрізі циклів при переробці композицій PA6GF30 та PA6GF30/PC.

В ході дослідження, було зафіксовано й зміни в стабільності роботи машини та процесу. На рисунку 37 наведені результати вимірювань змін тиску впорскування при переробці первинної та вторинної сировини в залежності від числа циклів роботи литтєвої машини. Червоною лінією виділена контрольована верхня допустима межа значень тиску впорскування.

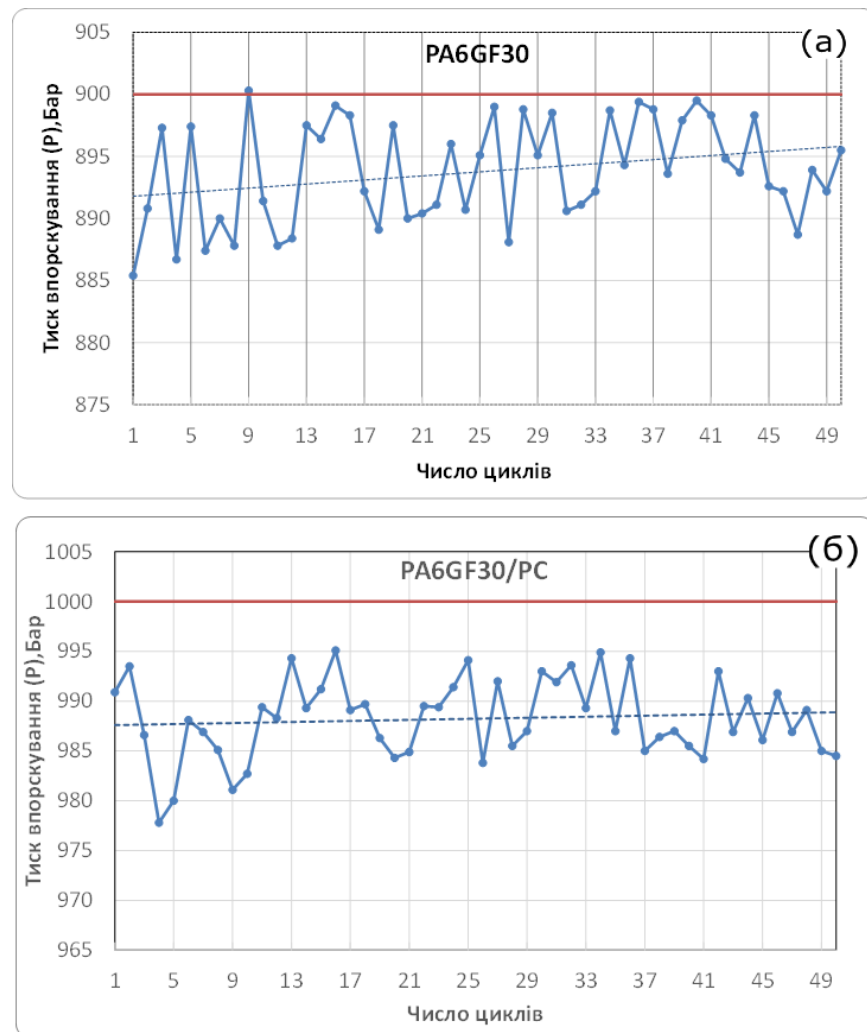


Рисунок 37. Стабільність тиску впорскування при переробці первинної (а) та вторинної (б) сировини.

В таблиці 17 наведені відмінності параметрів процесу лиття під тиском композицій PA6GF30 та PA6GF30/PC.

Було з'ясовано, що вторинна суміш PA6GF30/PC потребує більшого часу (на 12,5%) та температури (на 37,5%) сушки в порівнянні з PA6GF30 (табл.17). Такі

зміни, ймовірно, пов'язані з кумулятивним гігроскопічним ефектом, який проявляється в суміші.

Таблиця 17. Основні та відкориговані параметри процесу лиття під тиском композицій PA6GF30 та PA6GF30/PC

Параметри процесу	PA6GF30	PA6GF30/PC
Мінімальний час сушки, год	4,0	4,5
Температура сушки, °C	80,0	110,0
I зона нагріву циліндру, °C	290,0	290,0
II зона нагріву циліндру, °C	290,0	290,0
III зона нагріву циліндру, °C	280,0	280,0
IV зона нагріву циліндру, °C	275,0	275,0
Час впорскування, с	0,67	0,67
Час дозування, с	4,0	4,0
Час дії тиску підживлення, с	2,5	2,5
Час охолодження, с	9,0	9,0
Час циклу, с	24,5	24,5
Макс. тиск впорскування, бар	1250	1250
Протитиск, бар	70	70
Швидкість впорскування, мм/с	41,0	41,0
Швидкість підживлення, мм/с	33,0	33,0
Хід дозування, мм	28,0	28,0
Об'єм подушки розплаву, мм ³	4,5	5,5
Швидкість декомпресії, мм/с	5,0	5,0

В таблиці 17 також показано збільшення для PA6GF30/PC показника подушки розплаву (на 22,2%), що також пов'язано із підвищенням тиску впорскування із незмінним параметром дії протитиску.

Попри встановлені зміни тиску впорскування, стабільність машини C_{mk} відповідає стандартам галузі автомобілебудування ($C_{mk} \geq 1,67$). Для обох композицій

(незважаючи на більший розкид при використанні вторинної суміші PA6GF30/PC) значення S_{mk} зазнало статистично значущих змін в сторону зменшення на 11,2% (табл.17) та стабілізації впродовж подальших серійних виробничих циклів лиття під тиском ($\varepsilon=0,2\% \leq 5\%$).

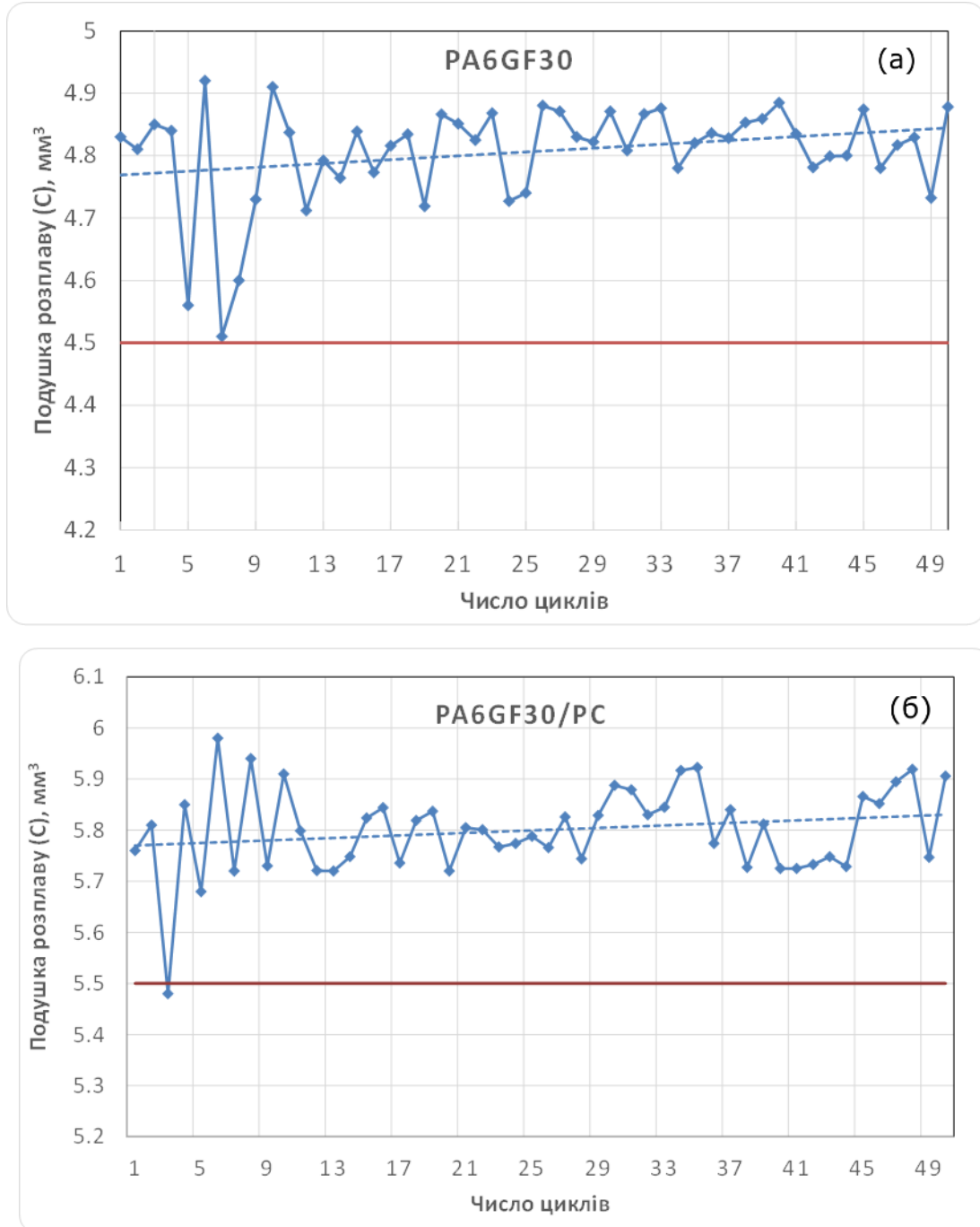


Рисунок 38. Стабільність подушки розплаву при переробці первинної (а) та вторинної (б) сировини

На рисунку 38 наведені результати вимірювань зміни об'єму подушки розплаву при переробці первинної та вторинної сировини в залежності від числа циклів роботи литтєвої машини. Червоною лінією виділена контрольована нижня допустима межа значень об'єму подушки розплаву. Як можна бачити, стабільність подушки розплаву зазнала незначних змін ($\epsilon=0,86\% \leq 5\%$) в процесі для PA6GF30/PC (рис. 38б) у порівнянні з первинним PA6GF30 (рис. 34а).

На рисунку 39 наведені результати статистичного аналізу стабільності процесу лиття по відхиленню розміру готових деталей при використанні вторинної композиції PA6GF30/PC.

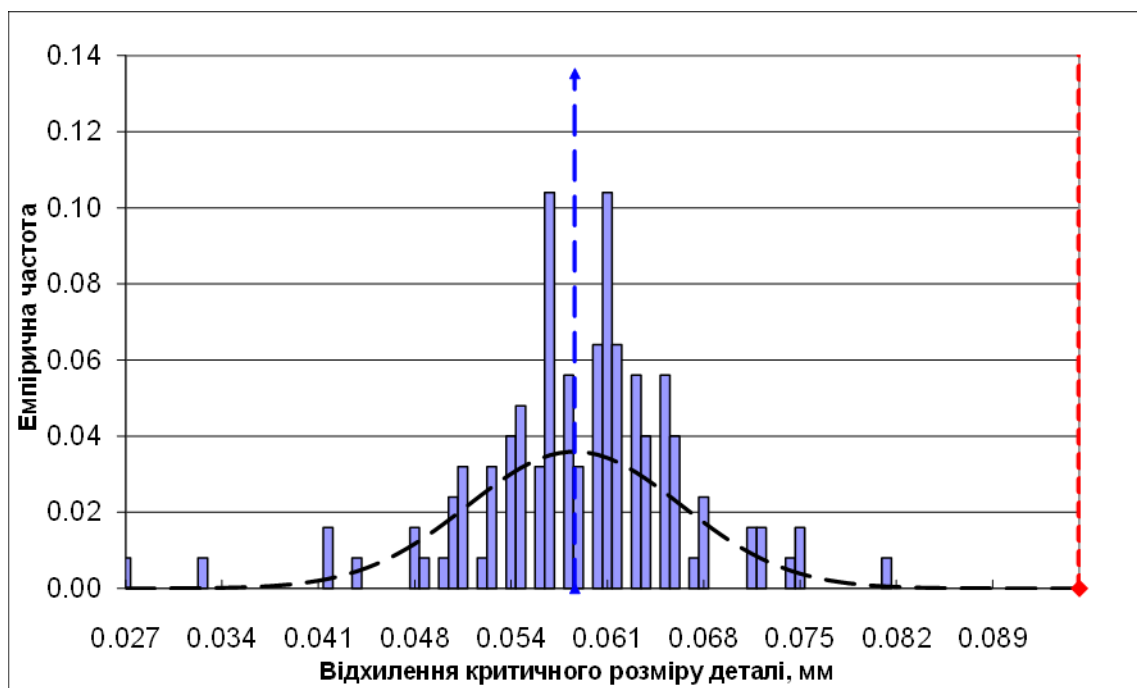


Рисунок 39. Гістограма розподілу відхилення критичного розміру деталі при переробці суміші відходів PA6GF30/PC.

Результати проведеного аналізу свідчать, що стабільність процесу лиття не зазнала статистично значимих змін у порівнянні з первинним PA6GF30 та знаходиться в межах допустимих обмежень. Це вказує на придатність вторинної композиції PA6GF30/PC для стабільного процесу лиття під тиском з урахуванням скоригованих технологічних параметрів.

Висновки до Розділу 4

Сформульовано основні теоретичні положення валідації процесу лиття пластмас під тиском. Розроблено системний підхід шляхом структурування процесу валідації за методом *PDCA*.

Показано метод оцінки стабільності процесу та основного обладнання лиття пластмас під тиском, як один з основних аспектів оцінки придатності технології.

Висвітлено особливості оцінки якості виробів з вторинних сумішей полімерних композиційних матеріалів в автомобілебудуванні. Виділено основні критерії якості до продукції, яка отримується із багатокомпонентних відходів ПКМ методом лиття під тиском.

Показано, що використання суміші PA6GF30/PC потребує збільшення часу (на 12,5%) та температури (на 37,5%) сушки, параметра подушки розплаву (на 22,2%) в порівнянні з первинним PA6GF30. При цьому інші параметри процесу не зазнали суттєвих змін.

Встановлено, що стабільність процесу лиття при використанні вторинної композиції PA6GF30/PC не зазнала статистично значимих змін у порівнянні з первинним PA6GF30 та знаходиться в межах допустимих обмежень.

Отримані результати доводять можливість повторної переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів методом лиття під тиском. Це дозволяє знизити собівартість продукції за рахунок зменшення витрат на сировину, зменшити частку неперероблених полімерних відходів, що в свою чергу позитивно вплине на екологічні аспекти навколишнього середовища та на фінансові результати виробничих компаній.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ БАГАТОКОМПОНЕТНИХ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

5.1. Теоретичне обґрунтування основних ключових показників лиття пластмас під тиском

Відповідно до ISO9001:2015 та IATF16949, окрім показників якості (розділ 4), організації зобов'язані проводити оцінку продуктивності та ефективності [127, 17]. Одним з основних показників ефективності лиття пластмас під тиском є *OEE (Overall Equipment Effectiveness- Всезагальна Ефективність обладнання)*. OEE є множенням трьох процесних показників, таких як *доступність, продуктивність, якість* та обчислюється за формулою [146]:

$$OEE = A * P * Q \quad (19), \text{ де}$$

A – Availability – Доступність – показує рівень використання технологічного обладнання та є відношенням фактичного часу роботи до запланованого (очікуваного) часу роботи. Індикатор розраховується за формулою:

$$A = \frac{\text{Запланований час роботи [год]} - \text{Час простоїв [год]}}{\text{Запланований час роботи [год]}} * 100\% \quad (20);$$

P – Productivity – Продуктивність – демонструє рівень здатності технологічного процесу досягати очікувані результати, такі як обсяг виготовленої продукції, наданих послуг, оброблених запитів тощо. В литті пластмас під тиском продуктивність є відношенням фактичного часу циклу до ідеального часу циклу та розраховується за формулою:

$$P = \frac{\text{Фактичний Робочий Цикл (ФРЦ)[сек]}}{\text{Ідеальний Робочий Цикл (ІРЦ)[сек]}} * 100\% \quad (21);$$

Q – Quality – Якість – відношення обсягу отриманих деталей, які відповідають встановленим критеріям якості до загального обсягу отриманої продукції та розраховується за формулою:

$$Q = \frac{\sum \text{Виготовлених деталей [шт]} - \sum \text{Бракованих деталей [шт]}}{\sum \text{Виготовлених деталей [шт]}} * 100\% \quad (22).$$

Таким чином ОЕЕ – це коефіцієнт, який вимірює ефективність процесу впродовж запланованого часу та показує об’єктивну оцінку втрат технологічного процесу.

Світовим класом ідеального рівня ОЕЕ прийнято вважати 85% [147] за умови досягнення доступності 90%, продуктивності – 95% та якості – 99% [148]. Решта 15% є допустимим втратами та враховують в основному час на виконання технічного обслуговування обладнання та на переналадку.

В литті пластмас під тиском прийнято вважати наступне:

- а) $OEE \geq 85\%$ - процес наближений до ідеалу;
- б) $85\% < OEE < 75\%$ - процес задовільний, але може бути покращений;
- в) $OEE < 75\%$ - процес потребує глибокого аналізу та впровадження реактивних заходів.

Отже, як видно з формул 20, 21, 22, показник ОЕЕ дає можливість контролювати перебіг процесу та виявляти основні втрати в часі (рисунок 40), такі як очікування, сповільнення, дефекти, зайві переміщення, надмірна обробка та втрати потенціалу.

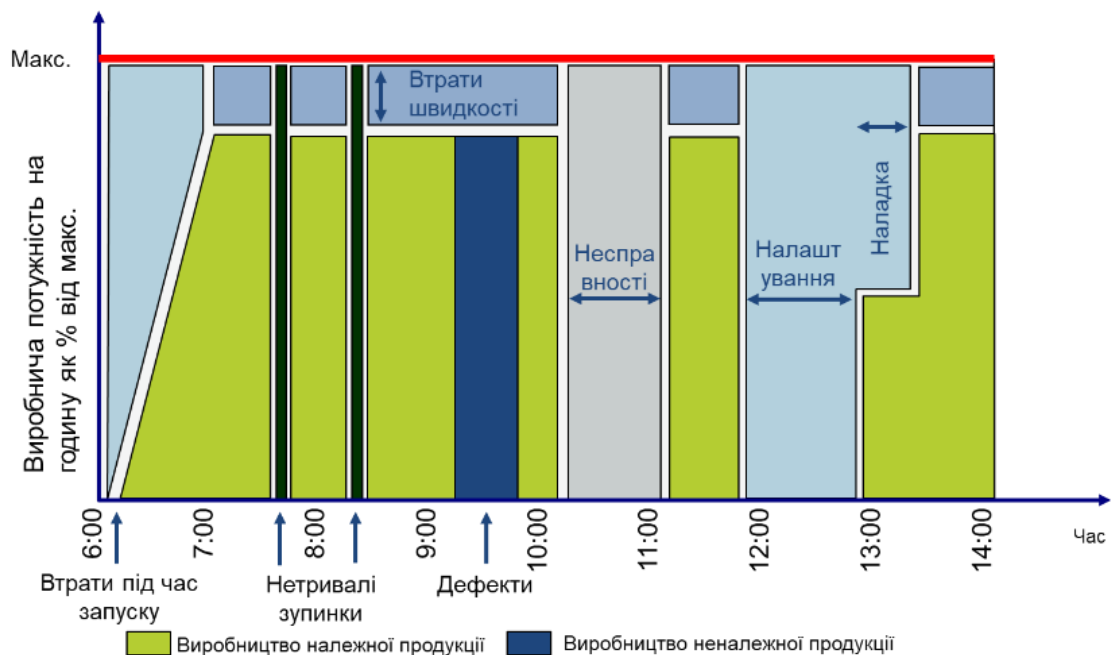


Рисунок 40. Основні виробничі втрати в часі

Проведення аналізу складових ОЕЕ відіграє важливу роль не лише в контролі, а й в покращенні процесу, адже:

- аналізуючи *доступність* можна визначити основні причини довготривалих зупинок обладнання шляхом ранжування часу простою за типами поломок чи за іншими подіями, які призвели до помилок в процесі і його зупинку. До інших (не технічних причин) відносять: відсутність матеріалу, визначення рівня якості, перебої із енергоносіями, потреба в проведенні навчань, переналаштування та інші;

- аналіз *продуктивності* дає змогу визначити втрати швидкості шляхом порівняння фактичного та планового часу циклу. Моніторинг продуктивності також сприяє виявленню короткотривалих (до 1 хвилини) зупинок внаслідок помилок процесу, які потребують здійснити його перезапуск;

- проводячи аналіз *якості*, можна з'ясувати причинно-наслідкові зв'язки виникнення бракованої продукції та проблемами, які трапляються під час перебігу процесу. Часто низький рівень якості може бути наслідком проблем доступності, такими як невірне налагодження та (або) несправність основного обладнання чи прес-форми.

Результати досліджень [149] показують суттєве зростання ОЕЕ з 77% до 94% за допомогою проведення аналізу складових ОЕЕ. Це призвело до виявлення основних втрат лиття пластмас під тиском, які були усунені на системному рівні, що своєю чергою має позитивний вплив на діяльність виробничих компаній [150].

Варто зауважити, що збір даних для обчислювання ОЕЕ є складним процесом. Враховуючи особливості лиття пластмас під тиском, сьогодні не можливо впровадити 100% автоматичний збір даних та їх обробку. Саме тому в результаті об'єднання інтелектуальних та ручних систем збору даних, можна досягти покращення якості як самих даних, так і результатів аналізу [151].

5.2. Основні аспекти філософії бережливого виробництва (Lean) та Lean Management у підтримці технології переробки сумішей відходів полімерних композиційних матеріалів

Повторна переробка багатокомпонентних відходів ПКМ є складним процесом. Складність обумовлюється не лише технологіями та потребами в додаткові інвестиції, а й здатністю впроваджувати ефективне управління через прийняття змін та трансформацію мислення. Правильний менеджмент технологій може забезпечувати, як високий рівень ефективності вторинної переробки полімерів, так і превентивне зменшення утворення відходів. Важливу роль в цьому відіграє лідерство, розуміння ролей лідерів та поведінки. Варто відмітити, що існує багато апробованих концептуальних та загально відомих інструментів аналізу та мислення, таких як: *6SIGMA*, *Lean*, *PDCA (PlanDoCheckAct)* та багато інших. Зокрема основні принципи ощадливого виробництва закладаються в основі сучасних виробничих систем та систем якості. Незважаючи на це, приділяється недостатньо уваги стилям керування, методам прийняття рішень та поведінці. Дедалі, набуває актуальності питання визначення різниці між керівником і лідером та чіткого розуміння ролей. Утримання сталих позитивних результатів в переробці багатокомпонентних полімерних відходів часто залежить від роботи всієї команди в цілому, де лідерство має проявлятися у задаванні напрямку через візії та місії.

В цьому розділі здійснено огляд світового досвіду лідерства, філософії та інструментів менеджменту, направлених для покращення управління технологіями переробки полімерних композицій. Проводжуючи лиття під тиском багатокомпонентних відходів ПКМ, зазвичай зіштовхуються із проблемами якості, продуктивності та фінансової ефективності, які мають бути вирішеними на системному рівні. Для цього будуть досліджені питання критеріїв вибору інструменту для формулювання, аналізу та вирішення проблем.

Організації, які переробляють відходи полімерних композитів повинні мати системи управління. Системи управління – це комплекс визначених процесів, які стандартизують та певною мірою регламентують саму діяльність та функціонування організацій. Всі процеси зазвичай розділяють на три типи: основний процес,

підтримуючий або сервісний процес та процес управління (менеджмент). Два останні призначені для підтримки функціонування основних процесів, які створюють додану цінність. В даному випадку доданою цінністю є процес трансформації полімерних відходів в корисний продукт, придатний для подальшого тривалого використання. В цьому розділі мова йдеться про управлінські процеси та їх дослідження в галузі автомобілебудування. До менеджменту та лідерства зокрема висувають й вимоги в міжнародних стандартах, таких як *ISO 9001* [129]. В поданому стандарті від лідерів в загальному вимагається підтримка систем управління якості, орієнтованість на клієнта, розуміння ролей та відповідальностей в організації, а також наявності вмінь структуровано вирішувати проблеми та постійно покращувати процеси.

Покращення процесів, зокрема покращення їх якості, досягається лише за участі всієї компанії від вищого керівництва до працівників, які безпосередньо задіяні в переробці полімерів. Зокрема, як стверджує сам Ішикава, участь мають брати не лише технологи, дизайнери, виробництво, а й відділи продажу, логістики, бухгалтери та менеджери. Як результат можна мати позитивний вплив не лише в забезпеченні якості, але і мати значний внесок в бізнес компанії [152]. Більше того варто зазначити й стратегічну перевагу такого підходу на державному рівні, зокрема в освітніх закладах та процесах. Це дасть змогу отримати сталий результат розвитку країни в довготривалій перспективі шляхом значного покращення процесів навчання. в тому числі і через впровадження ключових показників діяльності (*KPI – KeyPerformanceIndicators*). *KPI* мають містити в собі не лише моніторинг поточної ситуації, а й *SMART* цілі (*Specific, Measurable, Assignable, Realistic, Time-related - Конкретна, Вимірювана, має Виконавця, Реалістична, обмежена в Часі*), на які можуть впливати учасники процесу, застосовуючи провідні методики вирішення проблем.

Тож, одним з методів покращення є використання *діаграми Ішикава* (рис. 41), або *діаграми Причин і Наслідків*. Компанія, яка не може забезпечити процес постійного покращення, може втратити своє місце на ринку. Вважається, що завдання менеджменту також полягає в тому, щоб визнати важливість подібних інструментів

та методів. Менеджер власним прикладом має демонструвати свою підтримку та відданість якості.



Рисунок 41. Діаграма причин та наслідків (діаграма Ішікави)

Метод, поданий на рисунку 41 передбачає збір всіх можливих причин, які можуть потенційно впливати на виникнення проблеми із подальшим ранжуванням по категоріям шляхом проведення мозкового штурму. Зазвичай використовують шість стандартних категорій проблем: навколишнє середовище, вимірювання, машина, метод, персонал та менеджмент. Це є невичерпний перелік, і у разі необхідності, ранжування може відбутися за іншими ознаками. Тут важливу роль відіграє лідер або модератор, який має залучити кожного учасника в процес. Згаданий мозковий штурм використовують активно вже понад 50 років із зазначенням переваг командної та індивідуальної роботи [153]. Наступним кроком є визначення найбільш впливових факторів шляхом пошуку доказів прямого впливу чинника на зазначену проблему із подальшим визначенням кореневих причин методом *5 Чому*. Дана методика дає змогу знайти саме кореневі причини виникнення проблем, враховуючи всі можливі фактори, але потребує високого рівня самоорганізації, вміння спрямовувати команду до структурованого підходу. Також рекомендується спочатку побудувати діаграму, а вже потім за методом *Парето* (рис. 42) ідентифікувати фактори та визначити

пріоритети. Це призведе до підвищення ефективності пошуку кореневих причин [154].

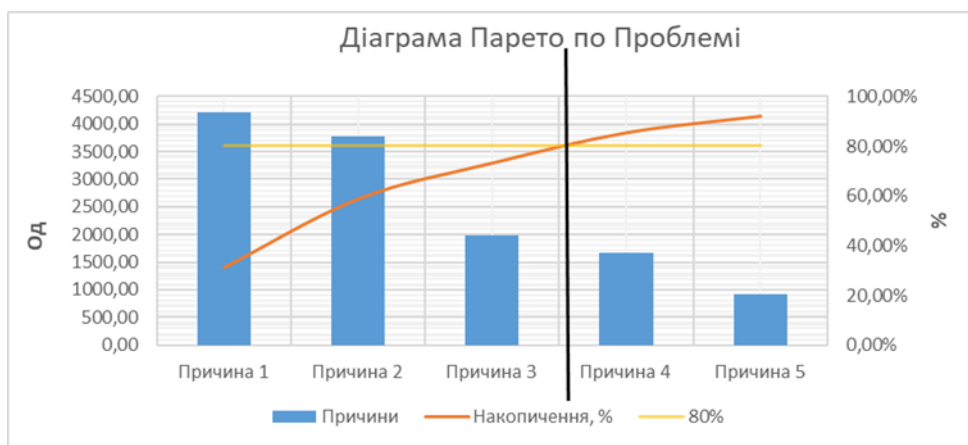


Рисунок 42. Загальний вигляд діаграми Парето

Діаграма Парето (рис. 42) або метод Парето дає змогу об'єктивно визначити пріоритети для проблем, які мають найбільший вплив за принципом: 20% причин створюють 80% проблем. Часто менеджмент починає вирішувати прості або навпаки складні проблеми, вважаючи, що це принесе сталий позитивний результат, що зазвичай призводить до зворотного ефекту, адже основні причини не піддалися аналізу.

Після визначення та верифікації кореневих причин, необхідно впровадити фіксоване вистежування заходів. Моніторинг заходів має мати на меті не лише контролювати хід виконання, а й забезпечити дотримання методу *PDCA*, цикл якого наведено на рисунку 43.

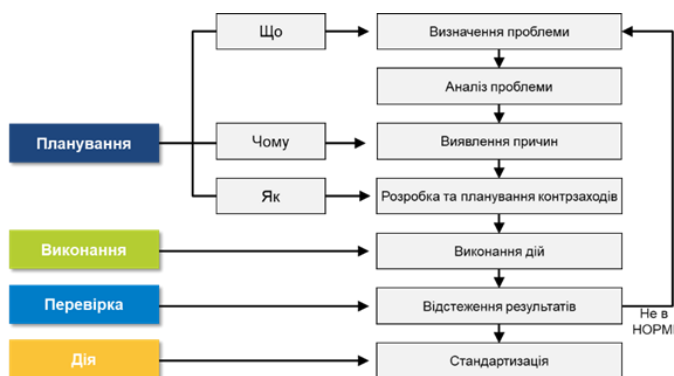


Рисунок 43. Візуальна схема процесу PDCA

PDCA передбачає обов'язкову необхідність оцінювати вплив дії/заходу на результат із подальшим прийняттям рішення: розповсюдити, як кращу практику чи повернутися до фази аналізу. Питання має залишатися відкритим і моніторитися до тих пір, доти не буде знайдено оптимальне рішення, яке усуває проблему повністю чи мінімізує вірогідність її повторного виникнення. Таким чином можна створити й нові стандарти, які містять в собі вже перевірені та ефективні методи впливу на ситуацію. При цьому варто зазначити, що стандарти є ефективними лише тоді, коли їх можна покращити чи дослідити. Метод *PDCA* не лише покращує процеси, а й вдосконалює стандарти.

Не зважаючи на те, що *PDCA* доводить свою ефективність, процес верифікації заходів є не достатньо вивченим або існують лише обмежені дані, які не доступні. Можна знайти дослідження по верифікації продуктів, послуг, систем вимірювання, програмного забезпечення та багато іншого. Незважаючи на це, питання управління технологіями повторної переробки полімерів є недослідженими та потребує уточнень. Це потрібно тому, що, менеджменту властиві помилки вважати проблему вирішеною лише на підставі звіту команди без проведення верифікації, яка б надавала гарантії превентивного забезпечення збереження сталого позитивного результату – помилка більше не повторюватиметься.

Безумовно такий структурований підхід (рис. 45) вимагає від лідера інвестицій часу, що утворює певні складнощі. З огляду на концепцію «8 великих втрат», де остання є втрата потенціалу, лідери часто припускаються помилок у наслідок орієнтації на самі задачі чи процеси, а не на команду. Саме тому вважається, що радикальна децентралізація (наділення повноваженнями) забезпечує вирішення проблем, зокрема таких як відсутність відповідальності, ініціатив, прозорості та, як наслідок, неповноважених команд. Модель децентралізації базується на підзвітності та винагороді, прозорості інформації та процесів, які виникають знизу вгору, а не навпаки. В такому випадку команда має повноваження та відповідальність за визначення необхідних задач і забезпечення їх виконання [155], що сприяє їхньому розвитку та як наслідок це значно підвищує зрілість організації. Тим не менше існує ментальна проблема у сприйнятті проблем як факту у після радянському просторі.

Нова форма мислення передбачає готовність до змін, але вплив комуністичної філософії продовжує мати місце і сьогодні [156].

Необхідно зазначити і про доцільність використання подібних інструментів. Незважаючи на те, що вони вже друге століття доводять свою ефективність, існують незначні втрати під час переробки багатокomпонентних відходів ПКМ, які можуть потребувати більш простих ситуативних підходів. Системний підхід до вирішення проблем вимагає значних затрат ресурсів. Для вибору раціонального методу потрібно чітко визначити основні критерії, які впливатимуть саме на вибір того чи іншого інструменту, наприклад, якщо проблема не комплексна та потенційно має просте рішення і не суттєво впливає на основні показники технологічного процесу, то достатньо скористатися лише методом *5 Чому*, в інших випадках – потрібно застосовувати більш структуровані підходи, такі як *Ішикава і Парето*.

Проводячи дослідження, встановлено, що питання вибору критеріїв чи підходу до розробки цих критеріїв є не вивченим, або не висвітленим. Це свідчить про те, що лідери мають самостійно розробити чи визначити критерії для вибору інструменту аналізу проблем чи їх комбінацій, опираючись на досвід, обізнаність чи методики прийняття рішень.

Вирішення поточних питань, особливо на рівні ТОП менеджменту суперечить філософії досягнення успіху в довгостроковій перспективі. Класична *Lean* філософія передбачає нехтувати короткотривалими успіхами чи вигодами на користь перспективним досягненням [157]. Саме тому необхідно зосереджуватися на вирішенні стратегічних питань та здійснювати *макроменеджмент*, застосовуючи наставницький стиль керування, наділяючи повноваженнями команди для вирішення ситуативних проблем на місцях їх виникнення. Ще на початку ХХ століття, Уїнстон Черчилль, видатний прем'єр-міністр Великої Британії зазначив, що відповідальність нічого не варта без повноважень [158]. Саме тому, якщо лідери бажають мати відповідальні команди, вони мусять їх наділити достатнім рівнем повноважень для можливості самостійно впливати на ситуації.

Отже, поведінка лідерів має суттєвий вплив на поведінку працівників [159], тому необхідно переосмислити існуюче становище та забезпечити професійне

конструктивне спілкування, яке базується на даних, фактах і не містить демотивуючу складову.

Незважаючи на те, що менеджмент наділяє команди повноваженнями самостійно приймати рішення, фіксуються випадки, де учасникам, які підтримують технологію переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів бракує повноважень для здійснення впливу на чинники особливо на ті, які потребують стратегічних змін чи фінансових інвестицій. В таких випадках лідери зіштовхуються з новими викликами, додатковою вищою відповідальністю. Саме тому очікується, що команда має чітко сформулювати проблемне питання, яке не вдасться вирішити на їхньому рівні. Виникає потреба в ескалації. В ідеальному випадку варто вимагати від команди виносити рішення, а не проблему. Якщо все ж таки виноситься проблема, то це означає, що учасники вичерпали всі можливості та ресурси, не вирішивши задачі. В такому разі необхідно надати звіт стосовно дій, які вже були реалізовані, але не принесли бажаного результату. Це говорить про те, що ТОП менеджмент має показати прийнятні шляхи вирішення проблеми, надавши належний зворотний зв'язок лідерам команд.

Термін «Ескалація» в менеджменті визначений як процес продовження невдалих дій, є постійною проблемою для осіб, які приймають рішення [160] на своєму рівні. Також це може бути методом управління конфліктами [161], але у випадку менеджменту це конфлікт не між особами чи суб'єктами, а між процесами, інструкціями, функціями, стандартами тощо.

Отже, рівень зрілості організації здебільшого можна визначити рівнем здатності вирішувати поточні проблеми на системному рівні таким чином, щоб превентивно забезпечити якість функціонування технології повторної переробки ПКМ. Ідеальний світовий рівень вирішених проблем, які не повторюються сягає позначки 70%. Як показує рисунок 44, решту 30% можна розділити на ті, які є фінансово недоцільними та ті, кореневу причину яких достовірно неможливо визначити.

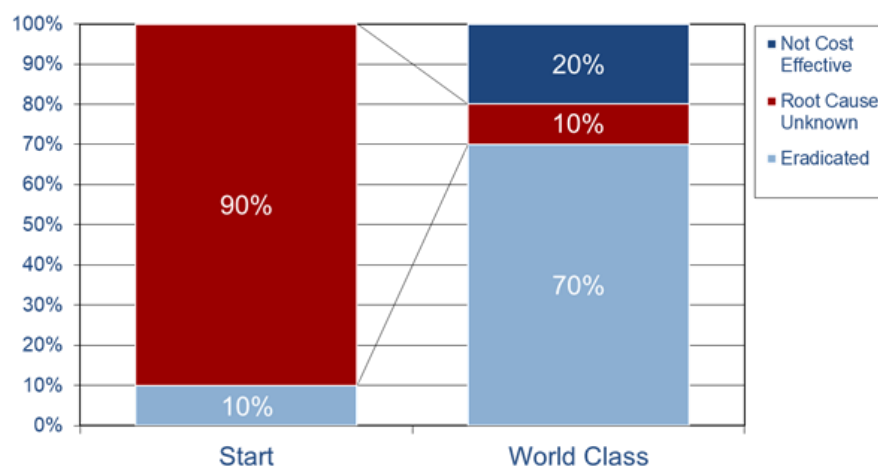


Рисунок 44. Порівняльна діаграма рівня вирішення проблем в організаціях

Зазвичай стартове становище знаходиться на рівні 10% вирішених остаточно проблем (рис. 44) через демонстрацію своєю поведінкою відсутності бажання з'ясувати кореневу причину на противагу постійній витраті часу на повсякденні подолання симптомів помилки, замість розробки превентивних заходів.

Проте, ідентифікувати проблему та правильно визначити кореневу причину не достатньо. Для досягнення результату, заходи мають бути розроблені перш за все таким чином, щоб дана помилка більше не повторювалася. Ефективність системних заходів продемонстрована на прикладі покращення стану екології в Китаї. Як показують дослідження, завдяки структурованому порядку дій і наявними системними планами управління, стало можливим зменшити викиди і покращити якість повітря [162]. Важливу роль у запобіганні виникненні помилок чи проблем відіграє процес верифікації ефективності впроваджених заходів, який відіграє вирішальну роль в досягненні успіху. Зокрема ефективність верифікації продемонстрована у боротьбі з пандемією «COVID-19», що підтверджують наявні чисельні дослідження, зокрема, використовуючи аналіз за сценарієм «що, якщо» [163]. Незважаючи на наявні дослідження, існують обмежені дані стосовно ефективності верифікації впроваджених заходів.

5.3. Розробка системного підходу для менеджменту до вирішення проблем технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів

На виробничій компанії галузі автомобілебудування ТОВ «Костал Україна», яка здійснює переробку багатокомпонентних відходів ПКМ було впроваджено систему управління виробничими дільницями, яка базується на дотриманні циклу *PDCA*. Дослідження проводилося на трьох виробничих дільницях за однакових умов і наявних компетенцій стосовно *PDCA*. Здійснювали оцінку рівня дотримання класичного циклу *PDCA* та ефективності вирішення проблем. Перевірка проводилася із дотриманням рекомендацій за ISO 19011:2011 [164].

Була запропонована модель оцінки із ранжуванням за категоріями «А», «В», «С», які базуються на стандарті союзу німецької автомобільної промисловості VDA 6.3 [165]. Опис ранжування наведено в таблиці 18.

Таблиця 18. Ранжування рівня ефективності менеджменту, реалізованих та верифікованих заходів

№	ОМЕ до	ОМЕ після	Ранг до	Ранг після	% поліпшення
1	4,9%	54,5%	С	В	49,6%
2	1,5%	71,4%	С	В	69,9%
3	4%	75,9%	С	В	71,9%

Рівень функціонування або ефективність менеджменту (*managementeffectivity* – ME_x) для критеріїв «реалізовано», «в процесі» (табл. 18) визначали як відношення суми критеріїв до загального числа визначених заходів:

$$ME_x = \frac{\sum C_a}{\sum A} * 100\%, (23)$$

де $\sum C_a$ – сума критеріїв по протоколу *PDCA*;

$\sum A$ – загальне число заходів.

Ефективність заходів та ефективність верифікації ME_v визначали як відношення числа активностей відповідного критерію до загальної суми реалізованих заходів:

$$ME_a = \frac{\sum C_v}{\sum R_a} * 100\%, (24),$$

де $\sum C_v$ – число верифікованих заходів;

$\sum R_a$ – число реалізованих заходів по протоколу *PDCA*.

Всезагальну ефективність менеджменту (*Overall Management Effectivity - OME*) визначали як множення ефективності заходів ME_v та ефективності загальної імплементації заходів ME_r :

$$OME = ME_v * ME_r \quad (25), \text{ де}$$

$$ME_v = \frac{\sum C_{pv}}{\sum R_a} * 100\%, \quad (26) \text{ де}$$

де $\sum C_{pv}$ – число заходів, які перебувають в процесі верифікації;

$\sum R_a$ – число реалізованих заходів по протоколу *PDCA*.

Отримані результати для критеріїв порівнювали із ранжуванням (табл. 18) для подальшого присвоєння рангу. Необхідно зазначити, що кожен критерій по суті відображає статус дії, яка направлена на вирішення проблеми.

Для здійснення оцінки визначили критерії, які подані в таблиці 19. Критерії відображають статуси подій, ініційованих лідерами команд.

Таблиця 19 містить набір стандартних статусів заходів по виявленим проблемам. Для критеріїв «Реалізовано», «Верифіковано», а також для *OME* (табл. 19) було розраховано показник ефективності за формулою 25 для кожної з чотирьох крос-функційних команд та визначений рейтинг відповідно до таблиці 20.

Таблиця 19. Критерії оцінки *ME*

Статус заходів	Опис критерію
Реалізовано	Заходи, які звітовано командою, як реалізовані
Верифіковано	Ефективність реалізованих заходів підтверджена
Не верифіковано	Ефективність реалізованих заходів не підтверджена
На верифікації	Заходи, які реалізовані та їхня ефективність в процесі дослідження
В процесі	Не реалізовані заходи
Всього	Всього визначених заходів

Таблиця 20. Ранжування рівня ефективності не верифікованих заходів, заходів в статусі «в процесі» та тих, що перебувають на верифікації

Ранг	Опис	Рівень функціонування, %
А	Ефективний менеджмент	<20
В	Процес працює із затримками	20-60
С	Не ефективний менеджмент	>60

Ранжування, подані в таблиці 20 застосовувалися для визначення ефективності менеджменту за формулою 25 для наступних критеріїв (табл. 19): «не верифіковано», «на верифікації».

Необхідно зазначити, що критерій «реалізовано» показує загальну ефективність імплементації заходів, критерій «верифіковано» демонструє ефективність самих заходів чи дій, направлених на вирішення проблеми. Проте, критерій «на верифікації» визначає ефективність самої верифікації (табл. 19).

Розрахунки, побудову графіків та діаграм здійснювали за допомогою програми MSExcel. Дані збирали з впровадженого протоколу заходів (табл. 21)

Таблиця 21. Протокол відслідковування дій за стандартним підходом

№ з/п	Опис Проблеми	Коренева Причина	Дата відкриття	Захід	Цільова дата	Дата виконання
-------	------------------	---------------------	-------------------	-------	-----------------	-------------------

В таблиці 21 можна побачити відсутність даних стосовно верифікації впроваджених заходів. Для здійснення оцінки, застосовували метод опитування лідерів команд стосовно верифікації. Тут варто зазначити, більшість з опитуваних не висловлювали достатньої мотивації стосовно витрат часу на верифікацію заходів, попри те, що це є одним з показників зрілості компанії.

На рисунку 45 продемонстровано первісний підхід лідерів до вирішення проблем, процес якого було зафіксовано під час проведення експерименту.



Рисунок 45. Початковий підхід до процесу вирішення проблем

На рисунку 45 можна бачити, що лідери не вимагали верифікації впроваджених заходів від команди, що може свідчити про недостатній рівень зрілості організації. В таблиці 22 показані зведені результати досліджень по трьом командам. Розрахунки здійснювали за формулами 23-26.

Таблиця 22. Порівняльний аналіз ефективності менеджменту під час вирішення проблем

№	Критерій	Активності, од	Ефективність, %	Рейтинг	Опис показника
1	Реалізовано	46	75,4	B	Ефективність імплементації
	Верифіковано	3	6,5	C	Ефективність заходів
	На верифікації	43	-	C	Ефективність верифікації
	OME	-	4,9	C	Ефективність менеджменту
2	Реалізовано	50	76,9	B	Ефективність імплементації
	Верифіковано	0	2	C	Ефективність заходів
	На верифікації	49	-	C	Ефективність верифікації
	OME	-	1,5	C	Ефективність менеджменту
3	Реалізовано	48	96	A	Ефективність імплементації
	Верифіковано	2	4,2	C	Ефективність заходів
	На верифікації	46	-	C	Ефективність верифікації
	OME	-	4	C	Ефективність менеджменту

Аналіз отриманих даних (табл. 22) свідчить про те, що лідери не здійснюють належане управління процесом вирішення проблем, адже всі три групи мають ранг «С» *OME*, що свідчить про непридатність управлінського процесу та не належну лідерську поведінку.

В подальшому, були прийняті рішення, які спонукають керівників змінити свою поведінку, тим самим мотивуючи команду на більш ефективну роботу. Таким чином було впроваджено новий протокол (табл. 23) відслідковування дій.

Таблиця 23. Протокол відслідковування дій за новим підходом

№ з/п	Опис Проблеми	Коренева Причина	Дата відкриття	Захід	Цільова дата	Дата виконання	Цільова дата верифікації	Дата верифікації	Результат верифікації
-------	---------------	------------------	----------------	-------	--------------	----------------	--------------------------	------------------	-----------------------

Як показано в таблиці 23, було змінено підхід до вирішення проблем, а саме додано вимоги до проведення верифікації із планом відслідковування. Таким чином, у разі, якщо отримується негативний результат верифікації, лідер зобов'язується розпочати процес заново, повертаючись до фази планування циклу *PDCA*. Це в свою чергу передбачає повторне вивчення проблеми разом із командою та впровадження коригуючих дій для досягнення позитивного результату верифікації. Позитивний результат свідчить про превентивність реалізованих дій і запобігає повторному виникненню помилок.

Рисунок 46 демонструє вже новий комплексний підхід із застосуванням методів для пошуку кореневих причин та верифікації факторів впливу на наявну проблему, що вимагає від лідерів застосовувати діаграму *Ішикави* та як мінімум метод *5 Чому*.

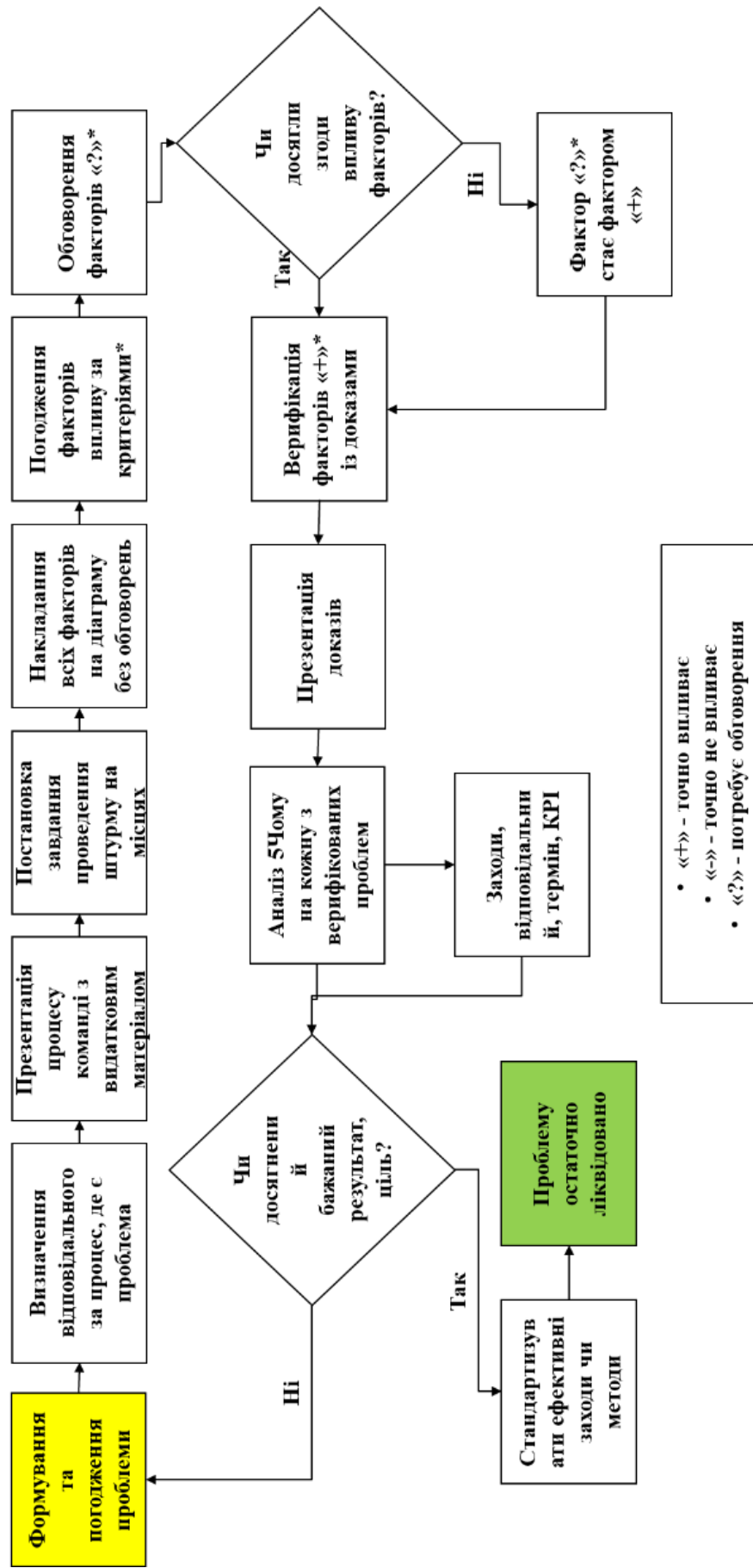


Рисунок 46. Пропонований підхід до вирішення проблем

Збір даних по оцінці покращеного процесу вирішення проблем відновили та здійснили через 6 місяців після впровадження. Розрахунки (табл. 24) здійснювали за вказаною методикою за формулами 24-27.

Результати оцінки (табл. 24) демонструють суттєве покращення рівня ефективності менеджменту в середньому на 64% в кожній групі, що свідчить про ефективність впроваджених заходів

Таблиця 24. Порівняння результатів ОМЕ по командам

№	ОМЕ до	ОМЕ після	Ранг до	Ранг після	% поліпшення
1	4,9%	54,5%	С	В	49,6%
2	1,5%	71,4%	С	В	69,9%
3	4%	75,9%	С	В	71,9%

Аналіз процесу пакування деталей дільниці виробництва виробів з пластмас:

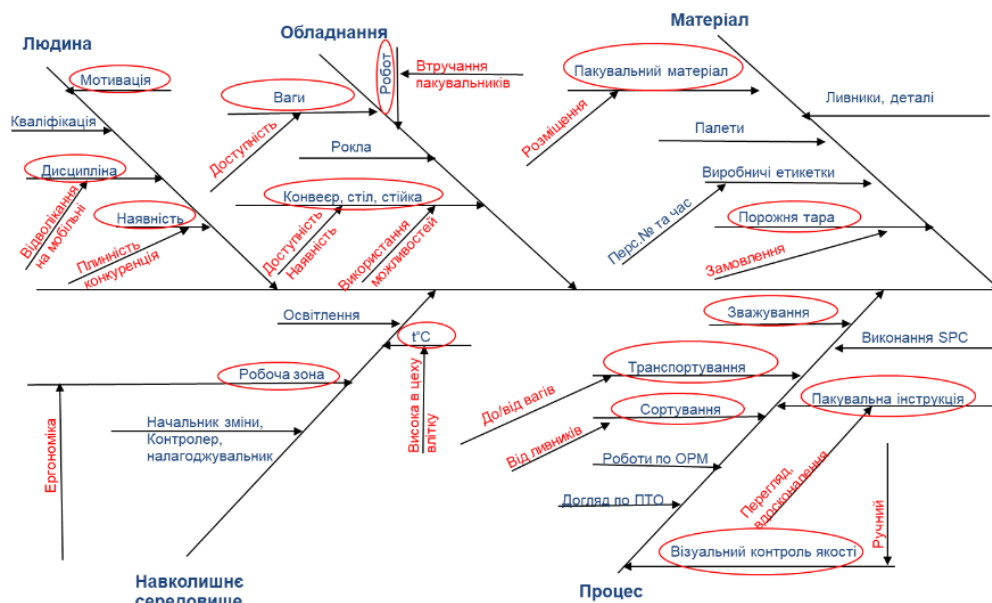


Рисунок 47. Діаграма Ішикави, яку застосовують лідери для вирішення проблем

Як показано на рисунку 47, лідери команд спонукають учасників до ефективної участі в процесі вирішення проблем. У порівнянні зі стартовим становищем, попри наявні компетенції, менеджмент уникав активностей для пошуку кореневих причин виниклих помилок в процесі лиття пластмас. Діаграма також демонструє більш

широке коло причин та наслідків, що збільшує вірогідність уникнення проблем в майбутньому наряду із більшим розширенням повноважень команд.

На діаграмі (рис. 48) чітко показано суттєве покращення рівня *ОМЕ*, які продемонстрували команди на чолі зі своїми лідерами. Це свідчить про те, що керівники змінили свої підходи та поведінку під час вирішення комплексних завдань. Тим самим можна зазначити, що команди отримали більше відповідальності за результат на ряду із більшими повноваженнями.

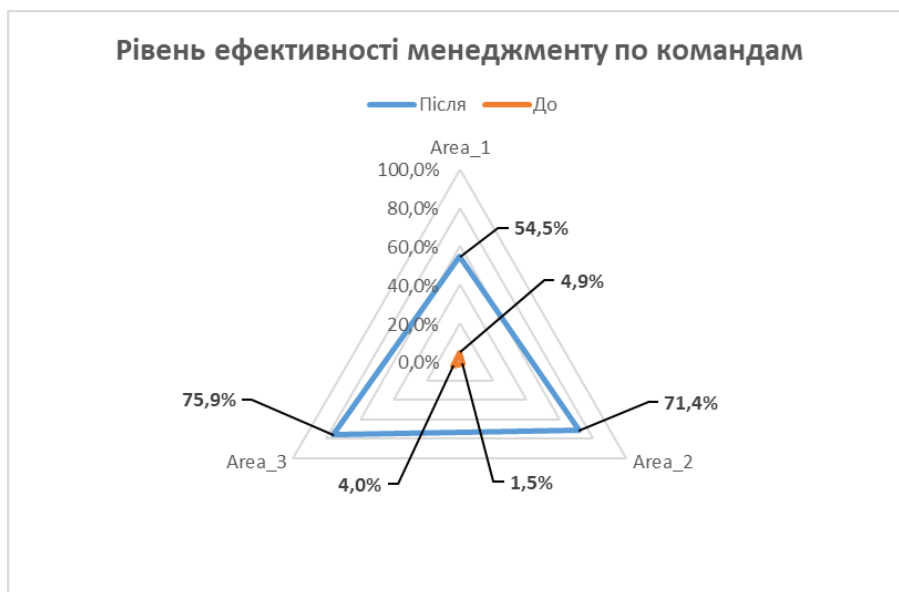


Рисунок 48. Порівняльна діаграма досягнутих рівнів *ОМЕ*

Для верифікації результатів покращення, впродовж всієї фази дослідження, обрано для відслідковування основний ключовий показник технології лиття пластмас під тиском *ОЕЕ*. Індикатор розраховували за формулою 20, яка наведена в розділі 5.1. На рисунку 49 показано тенденцію *ОЕЕ*.

Встановлено суттєве покращення *ОЕЕ* впродовж всього 2023 року у порівнянні з 2022 роком. Лінія тренду (рис. 49) демонструє стале поліпшення вже починаючи з лютого 2022 року, де відбулися зміни в підході до вирішення проблем. Це демонструє високу ефективність управління процесом лиття пластмас під тиском, що забезпечило зростання *ОЕЕ* в середньому на 2,5% впродовж року, що корелюється із поліпшеним показником *ОМЕ* із коефіцієнтом $0,77 > 0$. Позитивний коефіцієнт кореляції свідчить

про узгодженість і пряму залежність покращення показника менеджменту та показника процесу [166].

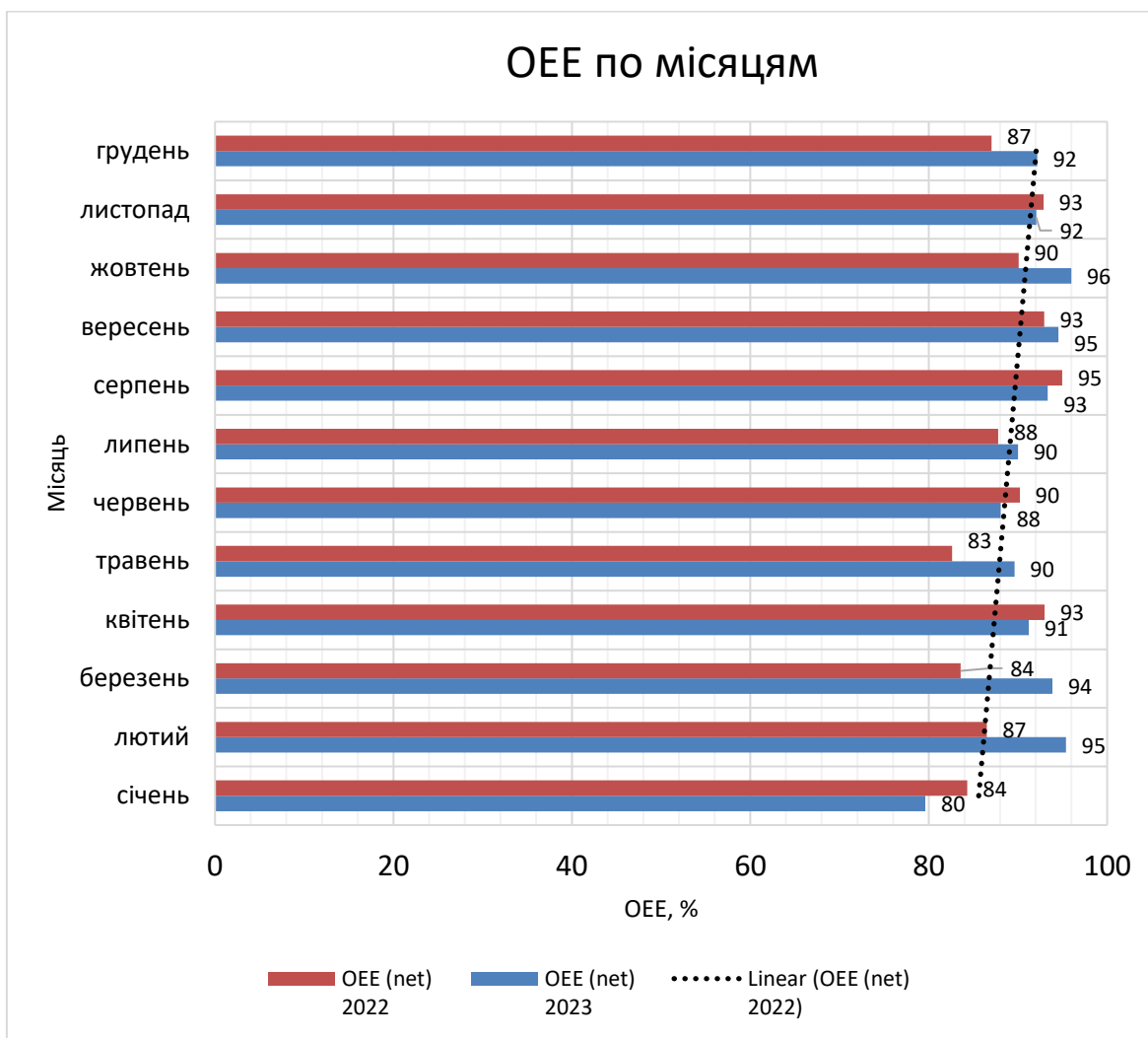


Рисунок 49. Показники ОЕЕ по місяцям

5.4. Фінансова доцільність впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів

Впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів методом лиття пластмас під тиском вимагає інвестицій таких, як: час на розробку, валідацію та впровадження; закупівля додаткового обладнання та інструментів; додаткові енергоресурси; додатковий фонд оплати праці. Всі інвестиції передбачають додаткові витрати коштів та потребують здійснення оцінки ефективності інвестованого капіталу.

Для прийняття рішення по інвестиціям, мати розрахунок лише одного показника не достатньо. Крім визначення рівня прибутковості, інвестору ще буде необхідно розуміти, через який термін інвестиції окупляться.

Саме тому ефективність інвестованого капіталу обумовлена трьома основними показниками: *NPV* (netpresentvalue–чиста поточна вартість), *PP* (PaybackPeriod – період окупності) та *ROI* (ReturnOnInvestment–прибуток на інвестиції).

Чиста поточна вартість *NPV* визначається як сума приведених вартостей (*PV*) витрат та доходів пов'язаних з інвестицією чи проектом впродовж усього часу тривання. Зміна вартості коштів у часі означає, що чиста поточна вартість залежить не тільки від величини витрат та доходів, але й від часу в який ці платежі відбуваються та процентної ставки, за допомогою якої платежі дисконтуються. Чиста поточна вартість обчислюється за формулою:

$$NPV = \frac{\sum_{t=0}^n S_t}{(1+i)^t} \quad (27), \text{ де}$$

S_t – чистий грошовий потік у періоді t , тобто різниця між сумою всіх доходів та сумою всіх витрат за цей період;

i – відсоткова ставка дисконтування для одного періоду (зазвичай року). В залежності від ситуації це може бути норма прибутку для інвестицій з подібним ступенем ризику, середньозважена вартість капіталу, або альтернативна вартість капіталу

n – горизонт інвестицій – номер останнього досліджуваного періоду.

У випадку дослідження інвестицій, які вимагають лише початкових витрат, а в наступні періоди досягаються доходи, формулу можна представити у вигляді:

$$NPV = \frac{\sum_{t=0}^n S_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (28), \text{ де}$$

I_0 – величина початкових витрат.

Одиницею виміру чистої поточної вартості є грошова одиниця початкового періоду інвестиції. Інтерпретація величини чистої поточної вартості залежить від цілей інвестиційного аналізу та обраної ставки дисконтування. Наприклад, якщо дисконтування відбувається при використанні норми прибутку для інвестицій з

подібним ступенем ризику, то в залежності від отриманих результатів обчислення *NPV* можна визначити наступні прогнози:

- $NPV > 0$ – означає, що досліджувана інвестиція матиме прибутки вище середніх;

- $NPV < 0$ - прибутки будуть нижчими за середні;

- $NPV = 0$ – досліджувана інвестиція не відрізняється від пересічної [167].

Період окупності *PP* – це період часу, впродовж якого початкові вкладення та інші витрати, пов'язаних із реалізацією інвестиційного проекту, покриваються сумарними результатами його здійснення. Або, це число років, за які відшкодовуються початкові інвестиції. Період окупності розраховується за формулою:

$$PP = \frac{I_s}{\sum CF} \quad (29), \text{ де}$$

I_s – початкові інвестиції;

$\sum CF$ - величина грошових надходжень (грошового потоку), або величина економії від реалізації інвестиційного проекту наростаючою сумою [168].

Показник *PP* використовується для визначення періоду окупності (в роках, місяцях) інвестицій – через який період підприємство отримає «назад» у вигляді прибутку або ефекту від економії вкладені кошти. Період окупності відповідає моменту часу в розрахунковому періоді, після якого кумулятивна (визначена нараощеним підсумком) величина поточних елементів грошового потоку від інвестиційної та операційної діяльності (*CF*) стає і надалі залишається додатною.

Прибуток на інвестиції *ROI* - фінансовий коефіцієнт, який показує рівень прибутковості або збитковості проекту, враховуючи суму інвестицій, які необхідно витратити на його реалізацію. *ROI* зазвичай вимірюється у відсотках, рідше - у вигляді дробу. Цей показник може також мати такі назви: прибуток на інвестований капітал, прибуток на інвестиції, повернення інвестицій, прибутковість інвестованого капіталу, норма прибутковості.

Показник *ROI* є відношенням суми прибутку або збитків до суми інвестицій. Значенням прибутку може бути процентний дохід, прибуток / збитки за

бухгалтерським обліком, прибуток / збитки з управлінського обліку або чистий прибуток / збиток. Значенням суми інвестицій можуть бути активи, капітал, та інші. Прибуток на інвестиції *ROI* розраховується за формулою:

$$ROI = \frac{EBIT}{\Sigma I} \quad (30), \text{ де}$$

EBIT - Earnings Before Interest and Taxes - обсяг прибутку до вирахування відсотків за позиковими коштами і сплати податків, або - це різниця між доходами та витратами;

ΣI – сума інвестицій [169].

Показник *ROI* використовується для оцінки ефективності інвестицій. При оцінці інвестиційних проектів розраховане значення *ROI* порівнюють із прийнятим для компанії рівнем рентабельності. Проект вважатиметься економічно вигідним, якщо значення показника *ROI* перевищує величину рентабельності, прийняту інвестором.

Цей метод також використовується для порівняльної оцінки альтернативних варіантів вкладення капіталу. Проект можна вважати ефективним, якщо його *ROI* не менше, ніж величина банківської облікової ставки. Це не тільки встановлює факт прибутковості проекту, а й оцінює ступінь його прибутковості.

Отже, в даній роботі наведено обґрунтування фінансової доцільності впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів в виробничій компанії ТОВ «Костал Україна». Підприємство виготовляє мехатронні вироби для автомобільної промисловості. Одна з технологій, яка застосовується є лиття пластмас під тиском, де і відбувається впровадження переробки багатокомпонентних відходів ПКМ.

За значення прибутку обрано потенційну економію на використанні оригінальної сировини, додаючи до неї 20% подрібнених полімерних відходів.

В таблиці 25 вартість сировини складає середнє значення закупівельних цін для підприємства в 2023 році. Інформацію про вихідну сировину подано в розділі 2.1 та 2.3. Валідація розробленої технології подано в розділі 4.4. Обсяги виробництва вказані відповідно до плану на 2024 рік. Розрахунки здійснені за допомогою програми

MSExcel. Для розрахунку фінансової ефективності буде використане значення потенційної економії (табл. 25), як ефект, який очікується в результаті впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів.

Таблиця 25. Техніко-економічні характеристики деталі, яка буде отримуватися із суміші вторинної сировини

№	Назва деталі	Кнопка, що гойдається
1	Вихідний матеріал	Durethan BKV 30 H 3.0 black 901510
2	Вага деталі брутто, кг	0,01
3	Річний обсяг виготовлення, шт./рік	1424000
4	Річна потреба в сировині, кг (3*2)	14240
5	Вартість сировини грн/кг	120
6	Вартість обсягу, грн/рік (4*5)	1708800
7	Вартість обсягу після впровадження технології, грн/рік (6*80%)	1367040
8	Потенційна економія (6-7)	341760

Кошти, які необхідно інвестувати для отримання вторинної сировини подані в таблиці 26. Варто зауважити, що ТОВ «Костал Україна» на момент впровадження технології вже має на балансі необхідне обладнання.

Таблиця 26. Інвестиції в технологію переробки багатокомпонентних відходів ПКМ литтям під тиском

Потреба у вторинній сировині, кг/рік	2848
Собівартість отримання вторинної суміші, грн/рік	51101

В таблиці 26, з міркувань політики конфіденційності ТОВ «Костал Україна» не показані тарифи та норми для отримання вторинної сировини. Собівартість

отримання вторинної суміші ПКМ (табл. 26) буде взято за розмір інвестицій в розрахунку фінансової доцільності.

Отже, на підставі отриманих даних (табл. 25, 26) за формулами 28-30 були здійснені розрахунки основних показників фінансової ефективності, на підставі яких приймається рішення про доцільність впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття пластмас під тиском.

Таблиця 27. Зведені результати показників фінансової ефективності

Фінансовий показник	Значення	Рішення	Критерії для рішення
NPV, тис грн	1 413	доцільно	> 0
PP, місяців	2	доцільно	< 18
ROI, %	2765,9	доцільно	>230

Критерії для рішення (табл.27) визнані політикою інвестицій ТОВ «Костал Україна». Таким чином, на підставі отриманих даних в таблиці 27 можна зробити висновок, що впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском є доцільною, про свідчать позитивні результати оцінки фінансової ефективності. Варто зауважити, що таке рішення стосується лише для виробництва поданої в цьому розділі деталі. Саме тому, рекомендується використовувати такий підхід й для інших варіантів продукції.

Висновки до розділу 5.

Розглянуті основні ключові та процесні показники лиття пластмас під тиском. Обґрунтовано ефективність їх використання для здійснення системного контролю за перебігом технологічного процесу та забезпечення його постійного покращення.

Висвітлено основні аспекти Lean менеджменту, які відіграють важливу роль у підтримці технології переробки сумішей відходів полімерних композиційних матеріалів

Встановлено, що поведінка лідера під час вирішення проблем має суттєвий вплив на ефективність менеджменту та на мотивацію учасників команд. Показано, що

застосування та дотримання повного циклу PDCA підвищує всезагальну ефективність менеджменту на 28%, що в свою чергу позитивно впливає на рівень зрілості підприємства та відіграє важливу роль у зменшенні частки відходів шляхом постійного покращення якості технологічних процесів та систем.

Здійснено огляд основних показників фінансової ефективності. Показано фінансову доцільність впровадження технології переробки багатокomпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів на прикладі ТОВ «Костал Україна». Варто зауважити, що доцільність показана лише для одного варіанту полімерного виробу. Це, ймовірно, може вказувати на всезагальну доцільність впровадження подібних технологій з огляду на покращення таких основних аспектів, як фінансової ефективності та стану екосистем.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема в галузі виробництва виробів з пластмас, пов'язана з необхідністю переробки багатокомпонентних сумішей відходів ПКМ за відсутності науково-обгрунтованої валідованої технології. При цьому вперше на основі системних досліджень встановлені закономірності фізико-хімічних перетворень в процесі переробки багатокомпонентних відходів PA6GF30/PC залежно від складу суміші.

2. Показано, що за переважаючого вмісту PA в суміші PA6GF30/PC ймовірно відбувається часткова кополімеризація в результаті хімічної взаємодії з PC. Вірогідно у випадку застосування склонаповненого поліаміду в суміші з полікарбонатом саме частки скло-наповнювача виконують функцію своєрідного компатибілізатора. Вище значення MVR і менша густина утвореного продукту може свідчити про нижчий ступінь кристалічності. Це дозволяє переробляти суміш не підвищуючи температуру без погіршення механічних властивостей.

3. Визначено, що за переважаючого вмісту полікарбонату в полімерній композиції вплив поліаміду нівелюється завдяки явищу інкапсуляції поліаміду в структурі полікарбонату, що чітко видно під час дослідження морфології сумішей. Суміш набуває характеристик полікарбонату, що супроводжується поступовим підвищенням межі міцності при стисненні. З огляду на результати досліджень, можна рекомендувати до переробки литтям під тиском вторинну суміш PA6GF30/PC за складом 90/10, 80/20, 70/30% мас. За вказаних співвідношень компонентів зберігаються передбачувані фізико-механічні властивості готової продукції у поєднанні із оптимальними режимами переробки лиття під тиском.

4. Під час переробки литтям під тиском багатокомпонентних відходів полімерних композитів PA6GF30/PC за складом 90/10% мас., було встановлено збільшення значення тиску впорскування на 11% та подушки розплаву на 22% для суміші PA6GF30/PC в порівнянні з первинним PA6GF30. При цьому стабільність процесу склала 2,01 та зазнала не значущих змін в сторону зменшення в середньому на 1,63% і знаходиться в допустимих межах для автомобілебудівної промисловості ($S_{pk} \geq 2,0$). Показано збільшення часу сушки на 12,5% та температури сушки на 37,5%

для підготовки вторинної суміші PA6GF30/PC до переробки литтям під тиском. Для нівелювання цих втрат рекомендується додавати вторинну суміш PA6GF30/PC до 20% мас. до оригінальної полімерної композиції PA6GF30.

5. Створено концепцію додаткового пристосування до литтєвої машини для отримання гранул із багатокомпонентних сумішей полімерних композитів. Концепт продемонстрував придатність до використання, невеликі габаритні розміри та простоту конструкції, яка здатна до модернізації.

6. Доведено, що сила зламу полімерних деталей з ABS/PC під час переробки литтям під тиском не зазнала значного зменшення при повторному використанні подрібненої сировини, без суттєвих змін параметрів технологічного процесу. Регранульована вторинна полімерна суміш ABS/PC демонструє не значне збільшення сили зламу на $\approx 0,58\%$. Це в свою чергу доводить можливість отримати ресурсозберігаючу технологію та позитивно вплинути на екологічні аспекти. Рекомендується додавання подрібненої композиції ABS/PC до оригінального полімерного матеріалу до 50% мас., або регранульованої – до 80% мас.

7. Підтверджено, що основними факторами впливу при термообробці полімерів є температура і час перебування полімерної композиції в литтєвій формі. Експериментально доведено покращення експлуатаційних властивостей PA12, а саме стійкості до C_2H_5OH шляхом збільшення тиску впорскування на 31,4% та температури контурів системи охолодження литтєвої прес-форми на 10,6%, що забезпечило суттєве зростання (на 207,8%) стабільності процесу. Покращення якості деталей за сталих витрат у структурі собівартості виготовлення позитивно впливає на фінансову ефективність, а отже може забезпечити уникнення утворення відходів в процесі експлуатації виробів. Рекомендується проводити валідацію технологічного процесу отримання деталей з PA12 з оцінкою результатів визначення експлуатаційних та хімічних властивостей.

8. Встановлено, що використання системного підходу для менеджменту до вирішення проблем технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів має позитивний вплив на ключові показники технологічного процесу. Доведено, що використання основних принципів ощадливого менеджменту (Lean

Management) забезпечило покращення показника всезагальної ефективності менеджменту (OME) в середньому на 64%, що підтверджується зростанням комплексного ключового показника технологічного процесу лиття під тиском всезагальної ефективності обладнання (OEE) на 2,5% із коефіцієнтом кореляції 0,77. Позитивний результат кореляції свідчить про узгодженість і пряму залежність покращення показника OME та OEE. Це сприяє забезпеченню якості, зменшенню браку і частки утворення відходів полімерних матеріалів. Рекомендується застосовувати основні принципи Lean із системним контролем ефективності управління технологічними процесами шляхом впровадження моніторингу показника OME.

9. Доведена економічна доцільність впровадження технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів литтям під тиском шляхом оцінки фінансової ефективності. Встановлено, що додавання вторинної суміші 20% мас. PA6GF30/PC зі складом компонентів 90/10% мас. до оригінального полімерного матеріалу PA6GF30 забезпечує позитивні показники фінансової ефективності, що відповідають встановленим критеріям прийняття рішень. Показано високий рівень чистої поточної вартості NPV на рівні 1413 тис грн, що відповідає межі $NPV > 0$. При цьому період повернення інвестицій (PP) становив 2 місяці, що є меншим за умови $PP < 18$ місяців та прибуток на інвестиції ROI складає 2765,9% при визначеній межі доцільності $ROI > 230\%$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles - Commission Statements. *Official Journal*. L 269, 21.10.2000. P. 34–43. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/53/oj> (date of access: 13.04.2024).
2. AlMa'adeed M., Ponnamma D., El-Samak A. Polymerstoimprove the world and lifestyle: physical, mechanical, and chemical needs. *Polymer Science and Innovative Applications*. Elsevier, 2020. P. 1–19. DOI:10.1016/B978-0-12-816808-0.00001-9.
3. Aamir M., Tolouei-Rad M., Giasin K. et al. Recent advances in drilling of carbonfiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. № 105. P. 2289–2308. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04348-z>
4. Froes F., Boyer R., Dutta B. Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing. *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00001-7>.
5. Baillie C., Peijs T. The Land of Polymers. *Navigating the Materials World*. 2003. p. 135–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012073551-8/50008-8>.
6. Kabat O., Sytar V., Derkach O., Sukhyy K. Polymeric composite materials of tribotechnical purpose with a high level of physical, mechanical and thermal properties. *Chemistry & Chemical technology*. 2021. № 15 (4). P. 543–550. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht15.04.543>.
7. Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M., Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. № 16 (1). P. 107–118. DOI:10.1016/j.dt.2019.04.008.
8. Hussain A. R. J., Alahyari A. A., Eastman S. A., Thibaud-Erkey C., Johnston S., Sobkowicz M. J. Review of polymers for heat exchanger applications: Factors concerning thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*. 2017. № 113. P. 1118–1127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.041>

9. Kim H.-N., Yang S. Responsive Smart Windows from Nanoparticle–Polymer Composites. *Advanced Functional Materials*. 2020. № 30 (2). 1902597. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201902597>.
10. Сайтарли С. В., Плаван В. П., Дзюбенко Л. С., Коренівський О. С., Євдокименко Д. М. Розробка наповнених поліолефінових композицій для литтєвих виробів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 6 (140). С. 95–103. DOI: <https://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.9>.
11. Ехсан К. Я. А. Композиційні матеріали зі зниженою горючістю на основі поліамідів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06 / Карімі Язді Амір Ехсан ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". Київ, 2013. 22 с.
12. Пристинський С. В., Будащ Ю. О., Ступа В. І., Пустовойт І. О. Особливості переробки наповнених поліамідних композицій методом лиття під тиском. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 6 (140). С. 71–80. DOI: <https://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.7>.
13. Bruchmuller M., Geis J., Koch M. Mechanical property model for fiber filled thermoplastics incorporating surface tensionю. *AIP Conference Proceedings*. 2019. № 2055. P. 700–714. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5084858>.
14. Peplow M. The plastics revolution: how chemists are pushing polymers to new limits. *Nature*. 2016. № 536. 7616. DOI: 10.1038/536266a.
15. Kim M.-K., Kim H.-I., Nam J.-D., Suhr J. Polyamide-nylon 6 particulate polycarbonate composites with outstanding energy-absorbing properties. *Polymer*. 2022. № 254. 125082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125082>.
16. Beloshenko V., Voznyak Y., Voznyak A., Savchenko B. New approach to production of fiber reinforced polymer hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*. 2017. № 112. P. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.030>.
17. IATF 16949:2016. Automotive quality management system standard : Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts

organizations. 1st Edition. *International Automotive Task Force*. URL: <https://www.iatfglobaloversight.org/iatf-169492016/>(date of access: 13.04.2024).

18. DINENISO 14001:2015 – Umweltmanagementsysteme. 2015. 81 p.

19. Saitarly S., Plavan V., Rezanova N., Sova N. Regulation of rheological and mechanical properties of polypropylene compositions for automotive parts. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. № 6 (3(44)). P. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.152056>.

20. Славінський В. В. Машина для лиття під тиском з модернізацією механізму пластикації. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 11–12.

21. Kitayama S., Miyakawa H., Takano M. et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for short cycle time and warpage reduction using conformal cooling channel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. № 88. P. 1735–1744. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8904-x>.

22. Mianehrow H., Abbasian A. Energy monitoring of plastic injection molding process running with hydraulic injection molding machines. *Journal of Cleaner Production*. 2017. № 148. P. 804–810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.053>

23. Bek M., Gonzalez-Gutierrez J., Kukla C., Pušnik Črešnar K., Maroh B., Slemenik Perše L. *Applied Sciences*. 2020. № 10 (22). 7993. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10227993>.

24. Gogoi R., Kumar N., Mireja, S., Ravindranath, S. S., Manik, G., Sinha, S. Effect of Hollow Glass Microspheres on the Morphology, Rheology and Crystallinity of Short Bamboo Fiber-Reinforced Hybrid Polypropylene Composite. *JOM*. 2019. № 71. P. 548–558. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3268-3>.

25. Prystynskyi S. V., Budash Yu. O., Stupa V. I., Pustovoit I. O. Features of processing filled polyamide compositions by injection molding method. Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. *Technical Science Series*. 2019. № 140 (6). P. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.7>.

26. Münstedt H. Rheological measurements and structural analysis of polymeric materials. *Polymers*. 2021. № 13 (7). 1123. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13071123>.

27. Hellmann W., Marino D., Megahed M. et al. Human, AGV or AIV? An integrated framework for material handling system selection with real-world application in an injection molding facility. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. № 101. P. 815–824. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2958-x>.
28. Pervez H., Mozumder M. S., Mourad A.-H. I. Optimization of injection molding parameters for HDPE/TiO₂ nanocomposites fabrication with multiple performance characteristics using the Taguchi method and grey relational analysis. *Materials*. 2016. № 9. P. 710. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9080710>.
29. Chen W. C., Fu G. L., Kurniawan D. A two-stage optimization system for the plastic injection molding with multiple performance characteristics. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2012. P. 386–390. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.468-471.386>
30. Huang W.-T., Tsai C.-L., Ho W.-H., Chou J.-H. Application of intelligent modeling method to optimize the multiple quality characteristics of the injection molding process of automobile lock parts. *Polymers*. 2021. № 13 (15). 2515. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13152515>.
31. Sánchez-Safont E., Arrillaga A., Anakabe Onaindia J., Gamez-Perez J., Cabedo L. PHBV/TPU/cellulose compounds for compostable injection molded parts with improved thermal and mechanical performance. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. № 136 (13). 47257. DOI: <https://doi.org/10.1002/aP.47257>.
32. Roda A., Matias A. A., Paiva A., Duarte A. R. C. Polymer Science and Engineering Using Deep Eutectic Solvents. *Polymers*. 2019. № 11(5). 912. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11050912>.
33. Mabesoone M. F. J., Palmans A. R. A., Meijer E. W. Solute–Solvent Interactions in Modern Physical Organic Chemistry: Supramolecular Polymers as a Muse. *Journal of the American Chemical Society*. 2020. № 142 (47). P. 19781–19798. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.0c09293>.
34. Laurati M., Arbe A., Rios de Anda A., Fillot L.-A., Sotta P. Effect of polar solvents on the crystalline phase of polyamides. *Polymer*. 2014. № 55 (12). P. 2867–2881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.04.031>

35. Bratychak M., Zemke V., Chopyk N. The features of rheological and tribological behavior of high-viscosity polyolefine compositions depending on their content. *Chemistry*. 2021. № 15(4). P. 486–492. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht15.04.486>.
36. Spina R. Optimisation of injection moulded parts by using ANN-PSO approach. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006. № 15 (1–2). P. 146–152.
37. Hopmann Ch., Reßmann A., Heinisch J. Influence on product quality by pvT-optimised processing in injection compression molding. *International Polymer Processing*. 2016. № 31 (2). P. 156–165. DOI: <https://doi.org/10.3139/217.3058>.
38. Rosli M.U., Khor C.Y., Nawi M. A. H., Mohamad N. S., Zakaria S. Minimizing Warpage and Shrinkage of Plastic Car Rear Bumper Fabrication via Simulation Based Optimisation. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. 012012. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012012>.
39. Gómez-Monterd E, J., Sánchez-Soto M., MasPOCH M. L. Influence of injection molding parameters on the morphology, mechanical and surface properties of ABS foams. *Advances in Polymer Technology*. 2018. № 37 (8). P. 2707–2720. DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.21944>.
40. Wang J., Mao Q., Jiang N., Chen J. Effects of Injection Molding Parameters on Properties of Insert-Injection Molded Polypropylene Single-Polymer Composites. *Polymers*. 2022. № 14(1). 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14010023>.
41. Weiland J., Dittmar H., Beier C., Ramesh C., Marx B., Schiebahn A., Jaeschke P., Overmeyer L., Reisgen U. Improvement of the adhesive bonding properties of an polyamide 6 injection molded fiber reinforced plastic component by laser beam pre-treatment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D : Journal of Automobile Engineering*. 2021. № 235 (13). P. 3243–3255. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407020976195>.
42. Xie P., et al. Plasma sprayed thermal barrier coatings: Effects of polyamide additive on injection molding part quality. *Journal of Applied Polymer Science*. 2022. № 139 (16). 51980. DOI: <https://doi.org/10.1002/aP.51980>.

43. Levytskyi V., Masyuk A., Katruk D., Kuzioła R., Bratychak Jr M., Chopyk N., Khromyak U. Influence of polymer-silicate nucleator on the structure and properties of polyamide 6. *Chemistry*. 2020. № 14 (4). P. 496–503. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht14.04.496>
44. Meng C., Liu X. Micro and macro analysis of physicochemical properties of bio-based semi-aromatic high temperature polyamide PA5T/56. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2022. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2039186>.
45. Пристинський С., Будащ Ю., Плаван В, Шуляк В. Вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском мультикомпонентних відходів полімерних композицій. *Технічні науки та технології*. 2022. № 4 (30). С. 148–157. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-148-157](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-148-157).
46. Thioun T., Smith Rhett C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*. 2020. № 58 (10). P. 1347–1364. DOI: <https://doi.org/10.1002/pol.20190261>.
47. Bergqvist T., Lannö J. Managing Sustainability Transformations: barriers for implementing recycled plastics in the automotive industry. 2020. 56 p.
48. Krause M. Technologies and Innovations for the Plastics Industry: Polymer 2030. *Innovative Technologies for Market Leadership*. Springer, Cham, 2020. P. 233–243. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41309-5_15.
49. Kuzmanović M., Delva L., Cardon L., Ragaert K. The effect of injection molding temperature on the morphology and mechanical properties of PP/PET blends and microfibrillar composites. *Polymers*. 2016. № 8 (10). 355. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8100355>.
50. De Kort G. W., Bouvrie L. H. C., Rastogi S., Wilsens C. H. R. M. Thermoplastic PLA-LCP Composites: A Route toward Sustainable, Reprocessable, and Recyclable Reinforced Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2020. 8. P. 624–631. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06305>

51. Huang M. S., Nian S. C. Robust parameter search for IC tray injection molding using regrind resin. *Journal of Polymer Engineering*. 2020. № 40. P. 876–885. DOI: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2020-0097>
52. Bozzelli J. Injection Molding: Another way to deal with regrind. *Plastics Technology*. 2015. № 61. P. 38–41.
53. Datta J., Głowińska E., Włoch M. Mechanical Recycling via Regrinding, Rebonding, Adhesive Pressing, and Molding. *Recycling of Polyurethane Foams*. William Andrew Publishing, 2018. P. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00005-X>.
54. Woo W. N. Optimization Of Injection Molding Parameters For 80: 20 Virgin-Regind Blended ABS Plastic Material. 2018. 24 P.
55. Jack B. S. In the war on plastic is Coca-Cola friend or foe? *BBC*. 2019. URL: <https://www.bbc.com/news/business-50175594> (access date 25.10.2019).
56. Dobrowszky K. Upcycling of polymer waste from automotive industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2011. № 55 (2). P. 73–77. DOI: <https://doi.org/10.3311/P.me.2011-2.02>.
57. La Mantia F. P., Mistretta M. C., Titone V. An additive model to predict the rheological and mechanical properties of polypropylene blends made by virgin and reprocessed components. *Recycling*. 2021. № 6 (1). 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6010002>.
58. Spicker C., Rudolph N., Kuehnert I., Aumnate C. The use of rheological behavior to monitor the processing and service life properties of recycled polypropylene. *Food packaging and shelf life*. 2019. № 19. P. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.01.002>.
59. Wang C. qing, Wang H., Fu J. gang, Liu Y. nian. Flotation separation of waste plastics for recycling - A review. *Waste Management*. 2015. № 41. P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.027>.
60. Sherwood J. Closed-loop recycling of polymers using solvents. *Johnson Matthey Technology Review*. 2020. № 64 (1). P. 4–15. DOI: <https://doi.org/10.1595/205651319x15574756736831>

61. Phengsaart T., Ito M., Azuma A., Tabelin C. B., Hiroyoshi N. Jig separation of crushed plastics: the effects of particle geometry on separation efficiency. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2020. № 22 (3). P. 787–800. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00967-6>.
62. Mohammed H., Alzuhairi M., Ibrahim S. I., Hussein S. S. Ternary waste plastic blends for binding and adhesion. *International Journal of Environmental Studies*. 2021. № 80 (4). P. 978–988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2021.2006919>
63. Dorigato A. Recycling of polymer blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021. № 4 (2). P. 53–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.005>.
64. Kucherenko Y., Budash Y., Plavan V., Shevtsova D., Horbatenko M. Manufacturing and properties of nonwovens based on waste from elastic fibers. *International Conference on Advanced Materials and Systems (ICAMS)*. 2018. P. 343–348.
65. ISO 9000:2015. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary. German and English version EN ISO 9000:2015. Official edition. 2015. 51 p. URL: <https://www.iso.org/standard/45481.html> (date of access: 13.05.2024).
66. Patrício Silva A. L., Prata J. C., Walker T. R., Campos D., Duarte A. C., Soares A.M.V.M., Barcelò D., Rocha-Santos T. Rethinking and optimising plastic waste management under COVID-19 pandemic: policy solutions based on redesign and reduction of single-use plastics and personal protective equipment. *Science of the Total Environment*. 2020. № 742. 140565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140565>
67. Vanapalli K. R., Sharma H. B., Ranjan V. P., Samal B., Bhattacharya J., Dubey B. K., Goel S. Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*. 2021. № 750. 141514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141514>.
68. Kedzierski M., Frère D., Maguer G., Bruzaud S. Why is there plastic packaging in the natural environment? Understanding the roots of our individual plastic waste management behaviours. *Science of the total environment*. 2020. № 740. 139985. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139985>.

69. Chu S., Zhang B., Zhao X., Soo H., Wang F., Xiao R., Zhang H. Photocatalytic conversion of plastic waste: from photodegradation to photosynthesis. *Advanced Energy Materials*. 2022. № 12 (22). 2200435. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202200435>
70. Lamba P., Kaur D. P., Raj S. et al. Recycling/reuse of plastic waste as construction material for sustainable development: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. № 29 (57). P. 86156–86179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16980-y>.
71. Cao Y., Fan X., Guo Y., Li S., Huang H. Multi-objective optimization of injection-molded plastic parts using entropy weight, random forest, and genetic algorithm methods. *Journal of Polymer Engineering*. 2020. № 40 (4). P. 360–371. DOI: <http://dx.doi.org/10.13039/501100001809>.
72. Borrelle S. B., et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*. 2020. № 369. 6510. P. 1515–1518. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba3656>.
73. Van Fan Y., et al. Forecasting plastic waste generation and interventions for environmental hazard mitigation. *Journal of hazardous materials*. 2022. № 424. 127330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127330>.
74. Ящук Є. С., Сова Н. В., Слепцов О. О., Федорів Т. Р., Осауленко С. І. Повторна переробка співполімеру поліетилентерефталату в процесі адитивного виробництва. *Технології та інжиніринг*. 2022. P. 80–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.8>
75. Пристинський С. В., Плаван В. П., Гриценко А. М., Малишко Д. О., Шуляк Р. О. Порівняння механічних властивостей пластмас, виготовлених із вторинної сировини методом лиття під тиском. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання* : мат. Всеукр. конф. (18 жовтня 2023 р., м. Київ). Київ : КНУТД, 2023. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26266>.
76. Замлинський В. А., Герецький Р. В., Фірса Д. Р., Степаненко С. В. Посилення економічної безпеки через концепцію zero waste у сталому бізнесі. Strengthening economic security through the zero waste concept in sustainable business.

Український журнал прикладної економіки та техніки. 2023. № 8 (4). С. 139–149.

DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-22>

77. Білоус-Сергеева С. О. Роль управління якістю у концепції «Lean Production» та проблеми її впровадження на вітчизняних виробництвах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Економічні науки*. 2018. № 35. С. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6725.35.2018.133625>.

78. Коровіна О. В. Lean-production в системі управління промисловим підприємством. *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2018. № 1 (6 (18)). С. 52–56. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ijite/01072018/5935

79. Токарєва У. Д. Концептуальні підходи до визначення поняття ошадливе управління. *Менеджер*. 2018. № 3. С. 92–100.

80. Bernstein I. The lean years: A history of the American worker, 1920-1933. Haymarket Books, 2010. 577 p.

81. Pepper M. P. J., Spedding T. A. The evolution of lean Six Sigma. *The International Journal of Quality & Reliability Management*. 2010. № 27 (2). P. 138–155. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/02656711011014276>.

82. Leite H., Vieira G. Lean philosophy and its applications in the service industry: a review of the current knowledge. *Production*. 2015. № 25 (3). P. 529–541.

83. Bhasin S., Burcher P. Lean viewed as a philosophy. *Journal of manufacturing technology management*. 2006. № 17 (1).

84. Antosz K., Stadnicka D. Lean philosophy implementation in SMEs—study results. *Procedia Engineering*. 2017. № 182. P. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-6513.079012>.

85. Bhasin S., Found P. Sustaining the lean ideology. *Management Decision*. 2020. № 59 (3). DOI: <https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1254>.

86. Йосипенко О., Йосипенко С. Філософія в сучасній Україні: проблеми конституювання поля. *Ідеологія і політика*. 2022. № 1 (20). С. 164-180. DOI: <https://doi.org/10.36169/2227-6068.2022.01.00004>

87. Гордійчук О. Вплив комуністичної ідеології та радянської дійсності на ментальність українців: соціально-філософський аналіз. *Вісник Львівського*

університету. Серія філософсько-політологічні студії. 2019. № 24. С. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.30970/2307-1664.2019.24.3>.

88. Гнатюк Ярослав. Дух капіталізму і привид комунізму на сцені української історії. *Вісник Прикарпатського університету. Філософські і психологічні науки*. 2012. № 16. С. 40–47.

89. Терешкун О. Концепція індустріальної культури у філософії техніки Б. Вишеславцева. *Науковий вісник Чернівецького університету. Філософія*. 2011. № 539–540. С. 99–106.

90. Sutharsan S. M., Prasad M. M., Vijay S. Productivity enhancement and waste management through lean philosophy in Indian manufacturing industry. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.976>

91. Rimanoczy I. The sustainability mindset principles: A guide to developing a mindset for a better world. *Routledge*. 2020. 254 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003095637> .

92. Axelrod A. Winston Churchill, CEO: 25 Lessons for Bold Business Leaders. Sterling Publishing Company, Inc., 2009. 276 p. DOI: <https://doi.org/2010.30464/jmee.2021.6.1.21>.

93. Uluskan M. Six Sigma in Plastic Injection Molding: Reuse Defective Parts in New Article Production As Raw Material Input or Not? *Endüstri Mühendisliği*. 2021. № 32 (2). P. 341–363. DOI: <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.876034>.

94. Saad N. The fatigue behavior of composite materials for high-temperature applications. *Lightweight Composite Structure in Transport*. Woodhead Publishing, 2016. P. 239–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-325-6.00010-4>.

95. Hsiung H. M. et al. Study on Tensile Properties of Nylon 66 Reinforced Composites. *Study on Tensile Properties of Nylon 66 Reinforced Composites*. Atlantis Press, 2016. P. 1660–1663. DOI: <https://doi.org/10.2991/emcs-16.2016.415>.

96. Zhang J., et al. Morphology and selected properties of NR/BR/CNT nanocomposites effect of ethanol-assisted mixing. *Polimery*. 2023. № 68 (5). P. 251–258. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.2023.5.1>.

97. Urbaniak W., Bednarek W., Paukszta D., Szostak M., Szymańska J. The improvement in properties of polyester resin-based composites using a new type of silane coupling agent. *Polimery*. 2023. № 68 (4). P. 221–225. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.2023.4.4>.
98. Кобець А. С., Деркач О. Д., Чигвінцева О. П., Кабат О. С., Рула І. В., Дудін В. Ю., Макаренко Д. О., Бойко Ю. В. Застосування полімерних композитів в АПК : монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 210 с.
99. ДСТУ EN ISO 604:2019. Пластмаси. Визначення властивостей під час стискання (EN ISO 604:2003, IDT; ISO 604:2002, IDT). Чинний від 2019-09-01. Вид. офіц.
100. Qiao H., Zheng B., Zhong G., Li Z., Cardinaels R., Moldenaers P., Lamnawar K., Maazouz A., Liu C., Zhang H. Understanding the rheology of polymer–polymer interfaces covered with Janus nanoparticles: Polymer blends versus particle sandwiched multilayers. *Macromolecules*. 2023. № 56 (2). P. 647–663. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c01973>.
101. Malla K. P., Henning S., Lach R., Jennissen H., Prof. em. Dr. habil. Michler G., Beiner M., Adhikari R. Correlation between Morphology, Mechanical Properties and Microdeformation Behavior of Electrospun Scaffolds Based on a Biobased Polymer Blend and Biogenic Nano-Hydroxyapatite. *Procedia Structural Integrity*. 2023. № 43. P. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.237>
102. Son Y., Lee S. Compatibility between aliphatic polyketone terpolymer and Nylon6 polymer blend. *Journal of Polymer Research*. 2023. № 30 (1). 33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03414-7>.
103. Ma H., Aravand M. A., Falzon B. G. Influence on fracture toughness arising from controlled morphology of multiphase toughened epoxy resins in the presence of fibre reinforcement. *Composites science and technology*. 2022. № 217. 109095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109095>.
104. Масюк А. С., Тарнавський А. Б., Левицький В. Є. Морфологія і властивості поліпропіленових композицій з металовмісним полімер-силікатним

наповнювачем. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. 2017. № 868. С. 400–405.

105. UNE EN ISO 1133–1:2023. Plastics – Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics - Part 1: Standard method (ISO 1133–1:2022). 39 p.

106. Володарський Є. Т., Кошева Л. О. Статистична обробка даних: навч. посіб. Київ: НАУ, 2008. 308 с.

107. Jeziórska R., Szadkowska A., Studziński M., Żubrowska M. The use of modified silica to control the morphology of polyamide 11 and poly(phenylene oxide) blends. *Polimery*. 2021. № 66 (7–8). P. 399–410. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.2021.7.3>.

108. Guo L., Xu Y., Zhang X., Hu G.-H. In-situ compatibilization of polyamide 6/polycarbonate blends through interfacial localization of silica nanoparticles. *Polymer*. № 2. 2023. 125898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125898>.

109. Yazdani Sarvestani M. R., Arefazar A., Moini Jazani O., Saeb M. R. Effect of poly [styrene-*b*-(ethylene-co-butylene)-*b*-styrene] (SEBS) and maleic anhydride-grafted SEBS triblock copolymers in immiscible blends of (polyamide-6)/polycarbonate: Morphology-mechanical properties relationships. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2015. № 21 (4). P. 245–252. DOI: <https://doi.org/10.1002/vnl.21385>.

110. Tjong S. C., Meng Y. Z. Structural-mechanical relationship of epoxy compatibilized polyamide 6/polycarbonate blends. *Materials research bulletin*. 2004. № 39 (11). P. 1791–1801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2003.12.020>.

111. Gattiglia E., Turturro A., Pedemonte E. Blends of polyamide 6 with bisphenol-A polycarbonate. I. Thermal properties and compatibility aspects. *Journal of applied polymer science*. 1989. № 38 (10). P. 1807–1818. DOI: <https://doi.org/10.1002/aP.1989.070381003>.

112. [Encyclopedia of Polymer Science and Technology / H. F. Mark \(Editor\). 4th Edition](#). John Wiley & Sons, Inc., 2002. 12344 p. DOI: 10.1002/0471440264.

113. Khan M. M. K., et al. Rheological and mechanical properties of ABS/PC blends. *Korea-Australia Rheology Journal*. 2005. № 17 (1). P. 1–7.

114. Costa D. A., Oliveira C. M. F., Tavares M. I. B. Solid-state nuclear magnetic resonance of the PA6/PC, PA6/PPO, and PA6/PC/PPO blends. *Journal of applied polymer science*. 1998. № 69 (1). P. 129–133. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19980705\)69:1%3C129::AID-APP15%3E3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19980705)69:1%3C129::AID-APP15%3E3.0.CO;2-V).
115. Verma N. S. A., Banerjee S. S. Development of material extrusion 3D printable ABS/PC polymer blends: Influence of styrene–isoprene–styrene copolymer on printability and mechanical properties. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023. № 62 (4). P. 419–432. DOI: <https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2121218>.
116. Pelto J., Barreto Soler C., Anwar H., Strobl L., Schlummer M. Compatibilized PC/ABS blends from solvent recycled PC and ABS polymers from electronic equipment waste. *Polymer Testing*. 2023. № 120. 107969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107969>.
117. Кобець А. С., Деркач О. Д., Чигвінцева О. П., Кабат О. С., Рула І. В., Дудін В. Ю., Макаренко Д. О., Бойко Ю. В. Застосування полімерних композитів в АПК : монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 210 с.
118. Кобець А. С., Деркач О. Д., Чигвінцева О. П., Кабат О. С., Рула І. В., Дудін В. Ю., Макаренко Д. О., Бойко Ю. В. Застосування полімерних композитів в АПК : монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. С. 214–215.
119. Ma N., Liu W., Ma L., He S., Liu H., Zhang Z., Sun A., Huang M., Zhu C. Crystal transition and thermal behavior of Nylon 12. *e-Polymers*. 2020. № 20 (1). P. 346–352. DOI: <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0039>
120. Pruss P., Burzynski M. Properties of the agglomerate and re-granulate of multicomponent and multilayer foil waste. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis Agricultura Alimentaria Piscaria et Zootechnica*. 2019. № 50 (2 (349)). DOI: <http://dx.doi.org/10.21005/AAPZ2019.50.2.05>.
121. Ławińska K., Szufa S., Modrzewski R., Obraniak A., Weżyk T., Rostocki A., Olejnik T. P. Obtaining Granules from Waste Tannery Shavings and Mineral Additives by Wet Pulp Granulation. *Molecules*. 2020. № 25 (22). 5419. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25225419>.

122. ISO 9000:2015. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary. German and English version EN ISO 9000:2015. Official edition. 2015.
123. Pereira V. J., Santana D. G. D., Salomão A. N., Wielewicki A. P., Maag G. B. From crop seeds to Brazilian forest seeds: history of validation methods for germination tests. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 2022. № 52. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272452>.
124. Fonseca i Casas P. A Continuous Process for Validation, Verification, and Accreditation of Simulation Models. *Mathematics*. 2023. № 11 (4). 845. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11040845>.
125. Shukla R., Manocha Dr, Chhabra Dr. Theoretical Approaches to Process Validation in Pharmaceutical Manufacturing Process. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2024. № 11. P. 573–585. DOI: 10.32628/IJSRST52411229.
126. Huang M. S., Chang C. H. Hyperparameter optimization strategy of multilayer perceptron model for injection molding quality prediction. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. № 131. P. 1879–1895. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13228-0>
127. Konuskan Y., Yilmaz A. H., Tosun B., Lazoglu I. Machine learning-aided cooling profile prediction in plastic injection molding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. № 130. P. 2957–2968. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12879-9>
128. Mercado-Colmenero J. M., Garcia-Molina D. F., Gutierrez-Jiménez B., Martín-Doñate C. Enhancing Complex Injection Mold Design Validation Using Multicombined RV Environments. *Applied Sciences*. 2024. № 14. 3355. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14083355>.
129. ISO 9001:2015 (E). Quality management systems – Requirements. Fifth edition. 40 p.
130. Chou S., Chen J. Six Sigma-Based Optimization of Shrinkage Accuracy in Injection Molding Processes. *International Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering*. 2018. № 5 (3). P. 150–155.

131. Dong S., Chunsheng E., Fan B., Danai K., Kazmer D. O. Process-driven input profiling for plastics processing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 2007. № 129. P. 802–809. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2738094>.
132. Prístavka M., Bujna M. Monitoring the capability of production equipment in organization. *Acta technologica agriculturae*. 2014. № 17 (2). P. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2014-0009>.
133. Kampker A., Kreisköther K., Büning M. K., Treichel P., Theelen J. Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE*. 2017. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDPC.2017.8328146>
134. Korenko M., Kaplik P., Bujna M., Pristavka M. Statistical Process Control in Automotive Industry. *Acta Technologica Agriculturae*. 2013. № 16 (2). P. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.2478/ata-2013-0010>
135. Ambarwati D. Analisis pengendalian kualitas produk injection molding part rivet x menggunakan metode dmaic dan fmea di perusahaan spare part automotive: PhD Thesis. Universitas Mercu Buana Jatisampurna, 2020.
136. De Siqueira S. S. S. Use of DMAIC and Lean Six Sigma to Reduce Body Defects in an Automotive Factory. *International Joint conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Springer, Cham, 2020. P. 367–379. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-56920-4_30
137. Ambarwati D. Analisis pengendalian kualitas produk injection molding part rivet x menggunakan metode dmaic dan fmea di perusahaan spare part automotive: PhD Thesis. Universitas Mercu Buana Jatisampurna, 2020.
138. Dobránsky J., Pollák M., Doboš Z. Assessment of production process capability in the serial production of components for the automotive industry. *Management systems in production engineering*. 2019. № 27 (4). P. 255–258. DOI: <https://doi.org/10.1515/mspe-2019-0040>.

139. Kim J.-K., Kim J., Lee J.-H., Kwak J. A Study on Dimension Optimization of Injection-molded Automotive Bumper by Six Sigma. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*. 2017. № 16 (6). P. 109–116.
140. Perez-Wilson M. Machine/Process Capability Study. *Advanced Systems Consultants PO Box*. 1989. № 1176. P. 85252–1176.
141. Kazmer D. Precision Process Control of Injection Molding. *Precision Injection Molding*, 2004.
142. Guide to Surface Defects on Thermoplastic Injection-molded Parts. 9th Edition. Kunststoff-Institut Luedenscheid, 2007. 157 p.
143. Kuper F. G. Automotive IC reliability: Elements of the battle towards zero defects. *Microelectronics reliability*. 2008. № 48 (8-9). P. 1459–1463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.06.026>.
144. Ralf A. A Tutorial of How to Ensure High Automotive Microcontroller Quality. *2021 IEEE European Test Symposium (ETS)*. IEEE, 2021. P. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1109/ETS50041.2021.9465379>.
145. Healy S., Wallace M., Murphy E. Review of test methods for zero PPM performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2008. № 25 (7). P. 757–771. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/02656710810890908>.
146. Kennedy R. K. Understanding, Measuring, and Improving Overall Equipment Effectiveness: How to Use OEE to Drive Significant Process Improvement. Productivity Press, 2017. 92 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315166957>.
147. Willmott P., McCarthy D. *TPM-: A Route to World Class Performance*. Newnes, 2001. 264 p.
148. Ngadiman Y., Hussin B., Abdul majid I. Exploring the overall equipment effectiveness (OEE) in an industrial manufacturing plant. *IC On Global Optimization and Its Applications*, 2013. P. 26–36.
149. Agung D., Debora F., Purba Humiras H. Increased Productivity of Injection Molding with Analysis of Overall Equipment Effectiveness (OEE). *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. 2018. № 1 (12). P. 1–7.

150. Sunadi S., Purba H. H., Paulina E. Overall Equipment Effectiveness to Increase Productivity of Injection Molding Machine: A Case Study in Plastic Manufacturing Industry. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*. 2021. № 12 (1). P. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.21512/comtech.v12i1.6706>.
151. Luisi G., Di Pasquale V., Pietronudo M. C., Riemma S., Ferretti M. A Hybrid Architectural Model for Monitoring Production Performance in the Plastic Injection Molding Process. *Applied Sciences*. 2023. № 13 (22). 12145. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212145>.
152. Ishikawa K. Quality control in Japan. *The Japanese Approach to Product Quality*. Pergamon, 1984. P. 1–5.
153. Dunnette M. D., Campbell J., Jaastad K. The effect of group participation on brainstorming effectiveness for 2 industrial samples. *Journal of applied psychology*. 1963. № 47 (1). P. 30–37.
154. Stefanovic S., Kiss I., Stanojevic D., Janjic N. Analysis of technological process of cutting logs using Ishikawa diagram. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*. 2014. № 7 (4). P. 93–98. URL: <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2014-4/ACTA-2014-4-15.pdf> (date of access: 17.05.2024).
155. Martela F. What makes self-managing organizations novel? Comparing how Weberian bureaucracy, Mintzberg’s adhocracy, and self-organizing solve six fundamental problems of organizing. *Journal of Organization Design*. 2019. № 8 (1). P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41469-019-0062-9>.
156. Пристинський С. В. Сучасні тенденції філософії бережливого виробництва (Lean) в світі та в Україні. *Дослідження проблем гуманітарних наук*. Київ : КНУТД, 2020. С. 95–99.
157. Лайкер Дж. К. *Філософія Toyota. 14 принципів роботи злагодженої команди* / пер. з англ. Н. Валевська. Київ : Наш формат, 2017. 424 с.
158. Axelrod A. Winston Churchill, CEO: 25 Lessons for Bold Business Leaders. Sterling Publishing Company, Inc., 2009. 276 p.

159. Inceoglu I., Thomas G., Chu C., Plans D., Gerbasi A. Leadership behavior and employee well-being: An integrated review and a future research agenda. *The Leadership Quarterly*. 2018. № 29 (1). P. 179–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2017.12.006>.
160. Sarangee K. R., Schmidt J. B., Calantone R. J. Anticipated regret and escalation of commitment to failing, new product development projects in business markets. *Industrial Marketing Management*. 2019. № 76. P. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.08.008>.
161. Hamre K. V., Fauske M. R., Reknes I., Nielsen M. B., Gjerstad J., Einarsen S. V. Preventing and neutralizing the escalation of workplace bullying: The role of conflict management climate. *International Journal of Bullying Prevention*. 2022. № 4 (4). P. 255–265. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42380-021-00100-y>.
162. Feng Y., Ning M., Lei Y., Sun Y., Liu W., Wang J. Defending blue sky in China: Effectiveness of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on air quality improvements from 2013 to 2017. *Journal of Environmental Management*. 2019. № 252. 109603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109603>.
163. Haug N., Geyrhofer L., Londei A. et al. Ranking the effectiveness of worldwide COVID-19 government interventions. *Nature human behaviour*. 2020. № 4 (12). P. 1303–1312. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41562-020-01009-0>.
164. ISO 19011:2011. Guidelines for auditing management systems, 2011. Publication date : 2011-11. Status: Withdrawn. New version available: ISO 19011:2018.
165. VDA 6.3:2010. Quality Management in the Automotive Industry. Part 3 - Process Audit, 2016.
166. Sharma A. K. *Text book of correlations and regression*. Discovery Publishing House, 2005. 212 p.
167. Hopkinson M. *Net present value and risk modelling for projects*. Routledge, 2017. 180 p.
168. Au T., Au T. P. *Engineering economics for capital investment analysis*. 2nd ed. Prentice-Hall, Inc, 1992. 540 p.
169. Phillips P. P., Phillips J. J. *ROI fundamentals: Why and when to measure return on investment*. John Wiley & Sons, 2008. 184 p.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора з
фінансів ТОВ «Костал Україна»



О. Закрасняний

«__» травня 2024 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Пристинського Сергія Володимировича **«Технології переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском»**, представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія

ТОВ «Костал Україна» (м. Переяслав) є світовим лідером у виробництві мехатронних виробів для автомобільної промисловості для таких відомих автомобільних компаній як FORD, VW, Mercedes Benz, BMW, Renault, Skoda, Seat, Porsche, Audi, Lamborghini. Один з основних напрямків діяльності – розробка та виробництво пластикових комплектуючих для автомобілів методом лиття під тиском.

Після ознайомлення з результатами дисертаційної роботи С.В. Пристинського науково-технічний комітет ТОВ «Костал Україна» у складі: начальника дільниці виробництва виробів з пластмас О. Юрківа, інженера-технолога з лиття пластмаси під тиском на термопластах Р. Шуляка, техника з підготовки виробництва А. Аврамича констатує, що технологія переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів методом лиття під тиском готова до впровадження на підприємстві ТОВ «Костал Україна».

Розроблена технологія передбачає використання суміші багатокомпонентних відходів пластмаси PA6GF30/PC та ABS/PC в якості добавки до оригінальної сировини від 20 до 80% мас.

Механічні властивості отриманих виробів з багатокомпонентних відходів ABS/PC визначалися за силою зламу, яка вимірювалася на універсальній машині для випробування матеріалів ZWIK Roell BTI-FR2.5TH.140. Морфологію екструдатів з вторинної суміші PA6GF30/PC визначали методом оптичної поляризованої мікроскопії на електронному мікроскопі Mitutoyo QS250Z. Реологічні властивості досліджувалися відповідно до ISO1133 на обладнанні для вимірювання показників текучості розплаву MFI-1322 виробництва AMSE.

Стабільність процесу лиття під тиском суміші відходів PA6GF30/PC (10/90% мас) та литтєвої машини досліджувалася за методикою 6SIGMA відповідно до вимог міжнародного стандарту в галузі автомобілебудування IATF16949. Статистичні процесні дані отримувалися з програмного забезпечення литтєвої машини «Engel CC300» з програмного модулю «Q Table».

Габаритні розміри деталей для оцінки експлуатаційних характеристик PA12 вимірювали за допомогою цифрового мікрометра Mitutoyo 293-821 із подальшою обробкою отриманих результатів та оцінкою стабільності технологічного процесу (C_{pk}) та стабільності литтєвої машини (C_{mk}) і відхилень від номінального значення. Зразки отримували на литтєвій машині ARBURG Allrounder 270S-350-60.

Сила зламу кліпс полімерної деталі, отриманої з суміші подрібнених відходів ABS/PC складає 104 Н, з оригінальної сировини – 106 Н. Різниця є не значною (2,3%), що вказує на можливість використання вторинної сировини без втрат якості виробів.

Переробка суміші відходів PA6GF30/PC 90/10% мас. не потребувала суттєвої корекції параметрів технологічного процесу лиття під тиском завдяки достатній однорідності багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів PA6GF30/PC у співвідношення 90/10% мас.

Використання вторинної суміші PA6GF30/PC (90/10 % мас.) потребує збільшення часу (на 12,5%) та температури (на 37,5%) сушки, параметра подушки розплаву (на 22,2%) в порівнянні з первинним PA6GF30. При цьому інші параметри процесу не зазнали суттєвих змін. Стабільність процесу лиття при використанні вторинної композиції PA6GF30/PC знаходиться в межах допустимих обмежень.

В результаті збільшення швидкості впорскування на 31,4% та температури охолодження прес форми в обох контурах в середньому на 10,6% покращені експлуатаційні характеристики виробів з PA12. Ефект був досягнений без втрат продуктивності технологічного процесу, що в свою чергу має позитивний вплив на економічні показники виробництва.

Розроблений системний підхід до валідації процесу повторної переробки багатокомпонентних відходів полімерних композитів забезпечує належну верифікацію відповідності технології та продукції вимогам.

Члени науково-технічного комітету:

Начальник дільниці виробництва
виробів з пластмас



О. Юрків

Інженер-технолог з лиття
пластмаси під тиском на термопластах



Р. Шуляк

Технік з підготовки виробництва



А. Аврамич

Здобувач

С. Пристинський

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Prystynskyi S. Adjusting the Performance Properties of Products Obtained by Injection Molding from Polyamide. *Chemistry & Chemical Technology*. 2023. № 17 (4). P. 836–845. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht17.04.836>. **Scopus**
2. Пристинський, С.; Будащ, Ю.; Плаван, В.; Шуляк, В. Вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском мультикомпонентних відходів полімерних композицій. *Технічні науки та технології*. 2022, № 4(30), 148-157, DOI : [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-148-157](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-148-157)
3. Резанова Н. М., Будащ Ю. О., Плаван В. П., Коршун А. В., Пристинський С. В. Регулювання стійкості рідких мікроструменів поліпропілену в матриці співполіаміду за рахунок нанодобавок. *Технології та інжиніринг*. 2021. № 2. С. 60–69. DOI: <https://dx.doi.org/10.30857/2786-5371.2021.2.6> **фахове видання**
4. Пристинський С. В., Будащ Ю. О., Ступа В. І., Пустовойт І. О. Особливості переробки наповнених поліамідних композицій методом лиття під тиском. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 6 (140). С. 71–80. DOI: <https://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.7> **фахове видання**
5. Пристинський С. В., Будащ Ю. О., Резанова Н. М. Оптимізація процесу лиття під тиском склонаповнених полімерних композицій на основі поліаміду. *Сучасний рух науки: тези доп. XII міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (1-2 квітня 2021 р., м. Дніпро, Україна)*. 2021. Т. 2. С. 281–282.
6. Пристинський С. В., Будащ Ю. О., Плаван В. П. Перспективи вторинної переробки багатокомпонентних відходів полімерів методом лиття під тиском. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021): матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2021 р.): у 2 т. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. Т. 1. С. 207–208.*
7. Prystynskyi S., Budash Yu. Validation of the injection molding process for the recycling of multicomponent waste polymers. *Science and innovation of modern world* :

Processing of the 4th International scientific and practical conference. London : Cognum Publishing House, 2022. P. 173–176. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/12/SCIENCE-AND-INNOVATION-OF-MODERN-WORLD-21-23.12.22.pdf> (дата звернення: 16.06.2024).

8. Пристинський С. В., Плаван В. П., Шуляк Р. О. Дослідження реологічних властивостей та морфології сумішей мультикомпонентних полімерних відходів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023): тези доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.)* : у 2 т. Т. 1. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. С. 345–347. URL: <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28076> (дата звернення: 16.06.2024).

9. Пристинський С. В. Сучасні тенденції філософії бережливого виробництва (Lean) в світі та в Україні. *Дослідження проблем гуманітарних наук*. Київ : КНУТД, 2020. С. 95–99.

10. Prystynskyi S. V., Plavan V. P. Features of the processing the polymer mixture waste based on glass-filled polyamide. *Book of Abstract 21th Baltic Polymer Symposium (BPS 2023)*. Jelgava, Latvia, September 20-22, 2023. P. 73.

11. Спосіб одержання термопластичної композиції для формування ультратонких синтетичних волокон : патент на корисну модель № 148645 Україна : D01F8/00. № u202101076 ; заявл. 03.03.2021 ; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 35/2021. Резанова Н. М., Будащ Ю. В., Плаван В. П., Іщенко О. В., Пристинський С. В.

12. Prystynskyi S., Plavan V., Hrytsenko A. Total Productive Maintenance as an approach to enhance technological processes and systems. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024): матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.)* : у 2 т. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2024. Т. 2. С. 335–337.