

Сергій Пристинський¹, Юрій Будаш², Вікторія Плаван³, Роман Шуляк⁴

¹аспірант кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: s.prystynskyi@outlook.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1387-8352>

²доктор технічних наук, професор
професор кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: budash.yo@knutd.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>
ResearcherID: [H-6012-2018](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577) SCOPUS Author ID: [9134072100](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577)

³доктор технічних наук, професор
завідувач кафедри прикладної екології, технології полімерів і хімічних волокон
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>
Researcher ID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962) SCOPUS Author ID: [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

⁴інженер-технолог цеху лиття пластмас
ТОВ «Костал Україна» (Переяслав, Україна)
E-mail: r.shuliak@kostal.com

**ВПЛИВ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ
МУЛЬТИКОМПОНЕНТНИХ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ**

У роботі здійснено порівняльний аналіз основних технологічних параметрів, а також стабільності процесу лиття під тиском первинного склонаповненого (30 %) поліаміду 6 та вторинної композиції із суміші склонаповненої поліамід 6/полікарбонат. Показано, що використання вторинної композиції потребує збільшення часу та температури сушки, параметра подушки розплаву в порівнянні з первинним матеріалом. При цьому інші параметри процесу не зазнали суттєвих змін. Встановлено, що стабільність процесу лиття при використанні вторинної композиції не зазнала статистично значущих змін у порівнянні з первинним матеріалом та знаходиться в межах допустимих обмежень. Отримані результати доводять можливість повторної переробки мультикомпонентних відходів полімерних композицій методом лиття під тиском без їх сепарування із позитивними результатами валідації процесу.

Ключові слова: поліамід 6; полікарбонат; лиття під тиском; полімерна композиція; вторинна переробка; стабільність процесу; валідація.

Табл.: 2. Рис.: 5. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі дедалі набуває популярність використання полімерних композиційних матеріалів в різноманітних галузях від простих побутових засобів до аерокосмічного будівництва завдяки їхнім унікальним властивостям [1]. Це дає змогу також обрати методи переробки в тому числі й адитивний метод [2], який стає особливо популярним у наші часи, та завдяки можливості модифікацій полімерів для отримання компонентів, які задовольняють високим вимогам безпеки експлуатації [3]. Усе це обумовлює невідоме зростання споживання полімерних виробів у промисловості та побуті. Наслідком такого споживання є зростання об'єму відходів. За даними Timmy Thiounn та Rhett C. Smith [4], у США станом на 2015 рік успішно переробляється лише 9 % пластикових відходів. Необхідно зазначити, що автомобільна промисловість є основним споживачем полімерних матеріалів, переважна більшість з яких є композиціями. Це свідчить про те, що використання пластику, особливо за останні 30 років, стає глобальною екологічною проблемою [5]. Необхідно відзначити й глобальний вплив трансформаційних процесів, які відбуваються в автомобільній галузі стосовно розробок нових екологічних приводних систем із більш широким використанням полімерних композитів [6]. Проте можливість повторного використання отриманих сумішей із багатокомпонентних відходів залишаються недостатньо вивченими як в Україні, так і у світі.

Постановка проблеми. Нині активно досліджуються можливості переробки сумішей полімерів методом лиття під тиском шляхом проведення морфологічного аналізу та оцінки впливу температури переробки на суміш композицій і, як наслідок, на фізико-механічні властивості [7]. З іншого погляду, вважається, що під час повторної переробки

наповнених полімерних композицій відбувається погіршення їх фізико-механічних властивостей. Це зумовлює розробку шляхів збереження цих властивостей, незалежно від числа циклів переробки [8]. Одними із методів є модифікація вторинної полімерної сировини мінеральними наповнювачами [9], або деревиною [10], що дає можливість переробляти відходи не лише полімерів, але й деревообробної промисловості.

Крім можливостей технологічних процесів, також активно досліджується і вплив вторинної сировини на основні параметри процесу лиття під тиском, зокрема на стабільність та якість процесу й можливості вибору оптимальних параметрів [11], на екологічні та фінансові аспекти з використанням каскадного підходу [12]. Приділяють увагу й механічним методам переробки відходів, які утворилися під час основних процесів виготовлення компонентів із полімерних матеріалів [13], а також оптимізація процесів переробки [14].

В автомобілебудуванні популярними є багатокомпонентні пластикові вироби. Зокрема можна виділити наявність таких компонентів в одній деталі, як склонаповнений поліамід 6 (PA6GF), який має також характерний вплив на параметри технологічного процесу [15] та полікарбонат (PC), полікарбонат плюс акрилонітрилбутадієнстирол (PC+ABS) та модифікований ABS+PC-X15. Подрібнюючи відходи чи некондиційну продукцію, зазвичай отримують суміш із цих полімерних композицій, яка не використовується повторно через відсутність практичного досвіду та складних і вартісних процесів сепарування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У технологічному процесі лиття під тиском важливо отримувати компоненти належного рівня якості з мінімальними втратами. Саме тому стабільність процесу (C_{PK}) та обладнання (в нашому випадку литтєвої машини) (C_{MK}) відіграють ключову роль у сучасному виробництві. Адже стабільність процесу й машин забезпечують отримання продукції, яка на 100 % відповідає вимогам клієнта й, зокрема, стандарту в галузі автомобілебудування *IATF 16949* [16].

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 [17]; профілів швидкості та тиску впрскування, що забезпечує певний рівень свободи для оптимізації і управління процесом [18]. Прийнятний рівень стабільності обладнання (C_{MK}), зокрема для литтєвої машини у світовому автомобілебудуванні має бути більшим за 1,67 або можна записати, як $C_{MK} \geq 1,67$ [19; 20; 21]. 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 $C_{PK} = 1,33$. У галузі автомобілебудування рекомендовано досягати $C_{PK} > 2,0$, що гарантує виготовлення якісної продукції [22; 23]. У литті пластмас під тиском, особливо компонентів із високим рівнем вимог стосовно розмірів, показник стабільності процесу відіграє ключову роль не лише при запуску серійного виробництва, а й впродовж усього циклу життя продукту. Ефективність застосування таких методів доводить свою практичну значущість і в наші часи, покращуючи рівень якості отриманих компонентів [22], а також оцінці стану та спроможності процесу [24]. Варто зазначити, що використання методики *6SIGMA* для управління та оптимізації виробничого процесу може суттєво покращити рівень його якості [25].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Необхідно зауважити, що вплив використання вторинних полімерних композиційних матеріалів на параметри й показники процесу, а особливо з багатокомпонентних відходів, досліджений недостатньо. Це зумовлює необхідність проведення комплексних досліджень процесу лиття під тиском та аналізу впливових факторів при переробці відходів мультикомпонентних полімерних матеріалів.

Мета дослідження – аналіз впливу основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском при повторному використанні нерозділених мультикомпонентних відходів полімерних композицій PA6GF30/PC.

Виклад основного матеріалу. Як вихідний матеріал у роботі були використані некондиційні мультикомпонентні деталі автомобілів, отримані на гібридній литтєвій машині «*ENGEL e-victory 200H/80V/120*». Чорний елемент деталі відливається зі склонаповненого поліаміду (PA6GF30) марки «Durethan BG30X», білий елемент із полікарбонату (PC) марки «Makrolon 2407». Подрібнення деталей здійснювали механічним методом на подрібнювачі «*Rapid 200*».

Зовнішній вигляд деталі та подрібненого грануляту, наведені на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд полімерного мультикомпонентного виробу та подрібненого матеріалу, отриманого з нього

Згідно зі співвідношенням компонентів у початковому зразку (90/10 мас.%), після механічної переробки отримували суміш частинок з нерозділених компонентів PA6GF30/PC. Отриманий гранулят висушували на сушарці «*Farragtech SCARD 35*» при температурі 110°C впродовж 4,5 год. Далі, гранулят використовували для лиття чорного компоненту деталі без додавання оригінальної полімерної композиції PA6GF30 на тій же самій литтєвій машині «*ENGEL*». Статистичні дані для визначення стабільності процесу та литтєвої машини отримували з програмного модуля «*Q Table*», який входить у програмне забезпечення системи керування «*Engel CC300*». Дані досліджень були оброблені методом *6SIGMA* з отриманням відповідних результатів стабільності процесу.

Порівнюючи основні властивості окремих компонентів суміші матеріалів, 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.% скловолокнистого наповнювача. Водночас PA6GF30 має порівняно широкий 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.

Відливання деталей з отриманої суміші багатокомпонентних відходів полімерних композиційних матеріалів здійснювали на стандартних серійних параметрах технологічного процесу лиття 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 із подрібнених полімерних відходів відповідає основним критеріям якості та специфікаціям замовника: візуальним (без пошкоджень та із відповідною структурою, наповненою, без додаткових елементів чи облоїв), тактильним (вмонтовано в готовий виріб та перевірено відчуття перемикування) та геометричним (відповідність до креслення). Це свідчить про те, що незначне коригування процесу в повному обсязі задовольняє всім вимогам до якості компонентів.

У процесі дослідження встановлено статистично значущі зміни за середнім значенням двох показників процесу лиття під тиском, а саме тиску впорскування (P) та подушки розплаву (C) для вторинної суміші PA6GF30/PC у порівнянні з використанням первинного PA6GF30 (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз змін показників технологічного процесу в розрізі циклів

№ циклу	Тиск впорскування, бар (РА6GF30)	Тиск впорскування, бар (РА6GF30/PC)	Різниця, %	Подушка розплаву, см ³ (РА6GF30)	Подушка розплаву, см ³ (РА6GF30/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
Х_{ср}	891,5	985,3	10,52	4,76	5,79	21,66
С_{мк}	2,68	2,38	-11,19	1,67	1,62	-2,99
С_{рк}	2,17	2,11	-2,77	2,02	2,01	-0,50

Із результатів, представлених у табл. 1, видно, що середнє значення тиску впорскування для суміші РА6GF30/PC склало 985,3 бар, а подушки розплаву становило 5,79 см³, що на 10,5 та 21,7 % відповідно більше в порівнянні з первинним РА6GF30.

Відмінності, що продемонстровані на рис. 2 можна пояснити тим, що при температурних умовах процесу лиття (280-290⁰С), PC має більшу в'язкість за РА6GF30, що обумовлює зростання тиску впорскування та подушки розплаву (об'єму розплаву, який має залишатись до кінця фази підживлення перед головкою шнека) для суміші РА6GF30/PC.

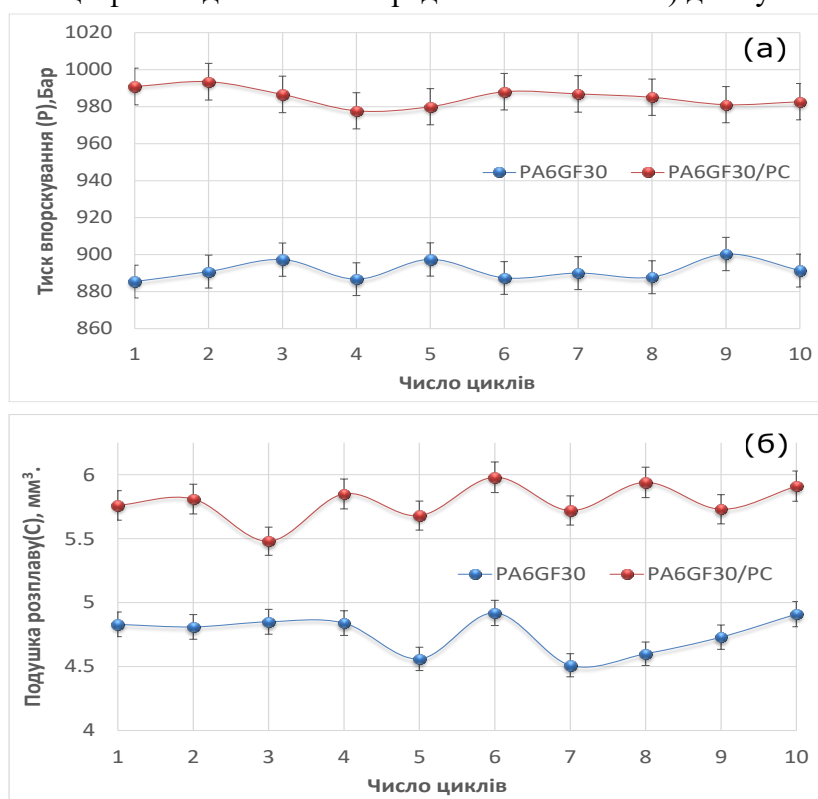


Рис. 2. Динаміка зміни тиску впорскування (а) та подушки розплаву (б) у розрізі циклів при переробці композицій РА6GF30 та РА6GF30/PC

У табл. 2 наведені відмінності параметрів процесу лиття під тиском композицій РА6GF30 та РА6GF30/PC.

Було з'ясовано, що вторинна суміш РА6GF30/PC потребує більшого часу (на 12,5 %) та температури (на 37,5 %) сушки в порівнянні з РА6GF30 (табл. 2). Такі зміни, ймовірно, пов'язані з кумулятивним гігроскопічним ефектом, який проявляється в суміші.

Таблиця 2 – Основні та відкориговані параметри процесу лиття під тиском композицій PA6GF30 та PA6GF30/PC

Параметри процесу	PA6GF30	PA6GF30/PC	Різниця, %
Мінімальний час сушки, год	4,0	4,5	+12,5
Температура сушки, °C	80,0	110,0	+37,5
I зона нагріву циліндру, °C	290,0	290,0	0,0
II зона нагріву циліндру, °C	290,0	290,0	0,0
III зона нагріву циліндру, °C	280,0	280,0	0,0
IV зона нагріву циліндру, °C	275,0	275,0	0,0
Час впорскування, с	0,67	0,67	0,0
Час дозування, с	4,0	4,0	0,0
Час дії тиску підживлення, с	2,5	2,5	0,0
Час охолодження, с	9,0	9,0	0,0
Час циклу, с	24,5	24,5	0,0
Макс. тиск впорскування, бар	1250	1250	0,0
Протитиск, бар	70	70	0,0
Швидкість впорскування, мм/с	41,0	41,0	0,0
Швидкість підживлення, мм/с	33,0	33,0	0,0
Хід дозування, мм	28,0	28,0	0,0
Об'єм подушки розплаву, мм ³	4,5	5,5	22,2
Швидкість декомпресії, мм/с	5,0	5,0	0,0

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

У ході дослідження, було зафіксовано зміни у стабільності роботи машини та процесу. На рис. 3 наведені результати вимірювань зміни тиску впорскування при переробці первинної та вторинної сировини залежно від числа циклів роботи литтєвої машини.

Попри встановлені зміни тиску впорскування, стабільність машини S_{MK} відповідає стандартам галузі ($S_{MK} \geq 1,67$). Для обох композицій (незважаючи на більший розкид при використанні вторинної суміші PA6GF30/PC) значення S_{MK} зазнало статистично значущих змін у сторону зменшення на 11,9 % (табл. 1) та стабілізації впродовж подальших серійних виробничих циклів лиття під тиском.

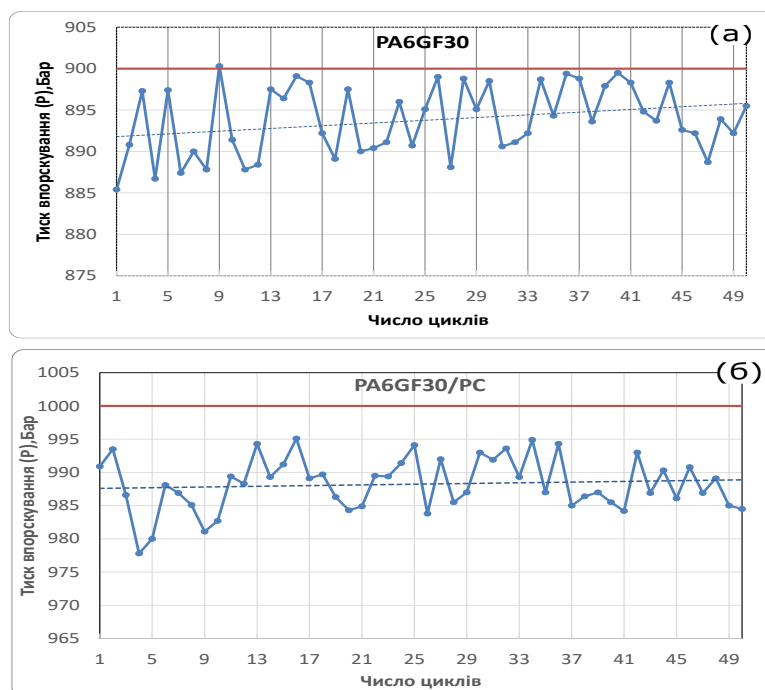


Рис. 3. Стабільність тиску впорскування при переробці первинної (а) та вторинної (б) сировини

На рис. 4 наведені результати вимірювань зміни об'єму подушки розплаву при переробці первинної та вторинної сировини залежно від числа циклів роботи литевої машини. Як можна бачити, стабільність подушки розплаву зазнала незначних змін у процесі для PA6GF30/PC (рис. 4, б) у порівнянні з первинним PA6GF30 (рис. 4, а).

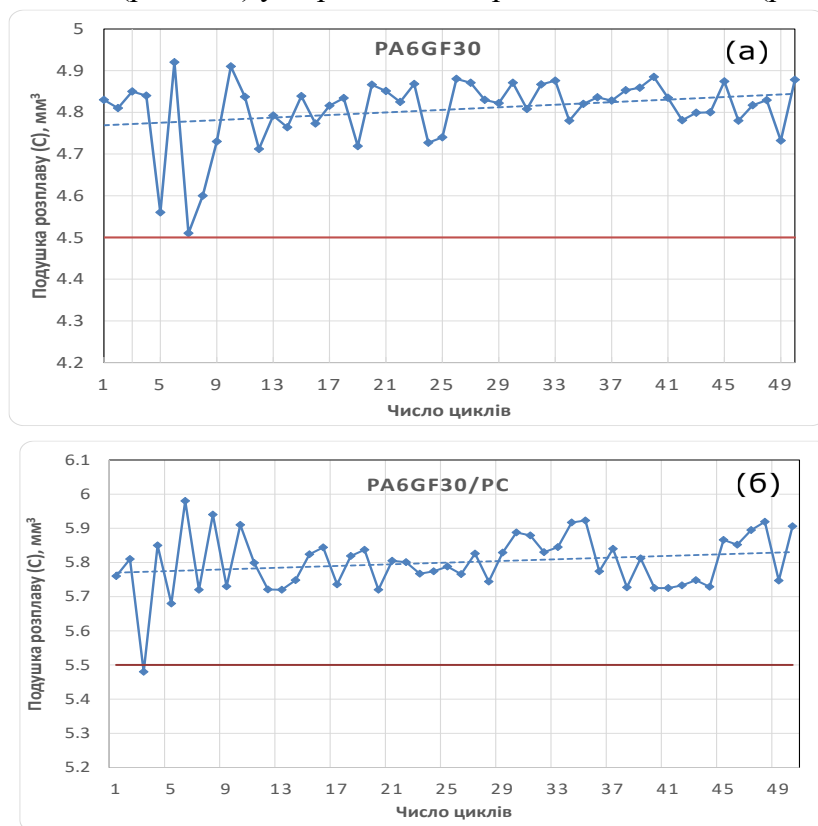


Рис. 4. Стабільність подушки розплаву при переробці первинної (а) та вторинної (б) сировини

На рис. 5 наведені результати статистичного аналізу стабільності процесу лиття по відхиленню розміру деталей при використанні вторинної композиції PA6GF30/PC.

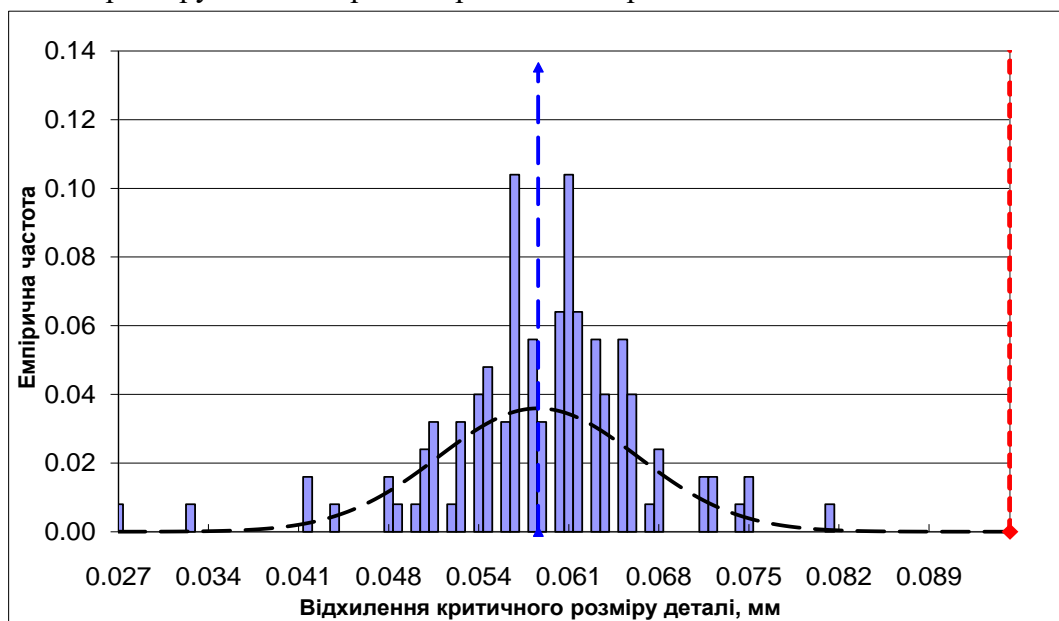


Рис. 5. Гістограма розподілу відхилення критичного розміру деталі при переробці композиції PA6GF30/PC

Вони 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. Визначено вплив основних технологічних параметрів на стабільність процесу лиття під тиском при повторному використанні нерозділених мультикомпонентних відходів полімерних композицій PA6GF30/PC.

Показано, що використання суміші PA6GF30/PC потребує збільшення часу (на 12,5 %) та температури (на 37,5%) сушки, параметра подушки розплаву (на 22,2 %) у 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 мультикомпонентних відходів полімерних композицій методом лиття під тиском. Це може знизити собівартість продукції за рахунок зменшення витрат на сировину, зменшити частку неперероблених полімерних відходів, що своєю чергою позитивно вплине на екологічні аспекти навколишнього середовища.

Список використаних джерел

1. Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review / Amir Muhammad, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 105.5. Pp. 2289-2308.
2. Froes Francis, Boyer Rodney, Dutta B. Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing. *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier. 2019. Pp. 1-6.
3. Polymer composite for antistatic application in aerospace / Yadav Ramdayal, et al. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16.1. Pp. 107-118.
4. Thiounn Timmy, Smith Rhet C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58.10. Pp. 1347-1364.
5. Bergqvist Tobias, Lannö Jonathan. Managing Sustainability Transformations: barriers for implementing recycled plastics in the automotive industry. 2020. 56 p.
6. Krause, Michael. Technologies and Innovations for the Plastics Industry: Polymer 2030. *Innovative Technologies for Market Leadership*. Springer, Cham. 2020. Pp. 233-243.
7. Kuzmanović Maja, et al. The effect of injection molding temperature on the morphology and mechanical properties of PP/PET blends and microfibrillar composites. *Polymers*. 2016. Vol. 8.10. Pp. 355.
8. 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. Vol. 8. Pp. 624–631.
9. Sliptsova I., Savchenko B., Sova N., Sliptsov A. Polymer sand composites based on the mixed and heavily contaminated thermoplastic waste. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 111, No. 1. Pp. 012027.
10. Pogrebnyak I. L., Sova N. V., Savchenko B. M., Pakharenko V. A., Moisyuk V. S. A wood-filled composite based on recycled polyethylene terephthalate. Production and properties. *International Polymer Science and Technology*. 2015. Vol. 42(1). Pp. 41-44.
11. Huang M. S., Nian S. C. Robust parameter search for IC tray injection molding using regrind resin. *Journal of Polymer Engineering*. 2020. Vol. 40. Pp. 876–885.
12. Bozzelli J. Injection Molding: Another way to deal with regrind. *Plastics Technology*. 2015. Vol. 61. Pp. 38–41.
13. Datta Janusz, Głowińska Ewa, Włoch Marcin. Mechanical Recycling via Regrinding, Rebonding, Adhesive Pressing, and Molding. *Recycling of Polyurethane Foams*. William Andrew Publishing. 2018. Pp. 57-65.

14. Woo Wan Nee. Optimization Of Injection Molding Parameters For 80: 20 Virgin-Regrind Blended ABS Plastic Material. 2018. 24 p.
15. 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. С. 71-80.
16. IATF16949:2016 Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. 1st Edition.
17. Chou S., Chen J. Six Sigma-Based Optimization of Shrinkage Accuracy in Injection Molding Processes. *Int. J. Ind. Manuf. Eng.* 2018. Vol. 5, № 3.
18. 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. Vol.129. Pp. 802–809.
19. Prístavka Miroslav, Bujna Marián. Monitoring the capability of production equipment in organization. *Acta technologica agriculturae*. 2014. Vol. 17.2. Pp. 39-43.
20. Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors / Kampker Achim, et al. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). IEEE*. 2017. Pp. 1-8.
21. Statistical process control in automotive industry / Korenko Maroš, et al. *Acta technologica agriculturae*. 2013. Vol. 16.2. Pp. 39-42.
22. Ambarwati Dewi. 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.
23. De Siqueira, Sílvio Sérgio Silveira. 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. Pp. 367-379.
24. Dobránsky Jozef, Pollák Martin, Doboš Zigmund. Assessment of production process capability in the serial production of components for the automotive industry. *Management systems in production engineering*. 2019. Vol. 27.4. Pp. 255-258.
25. A Study on Dimension Optimization of Injection-molded Automotive Bumper by Six Sigma / Kim Joo-Kwon, et al. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*. 2017. Vol. 16.6. Pp. 109-116.

References

1. Aamir, Muhammad, et al. (2019). Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 105.5, 2289-2308.
2. Froes, Francis, Boyer, Rodney, Dutta, B. (2019). Introduction to aerospace materials requirements and the role of additive manufacturing. *Additive manufacturing for the aerospace industry. Elsevier* (pp. 1-6).
3. Yadav, Ramdayal, et al. (2020). Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*, 16.1, 107-118.
4. Thiounn, Timmy, Smith, Rhett C. (2020). Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*, 58.10, 1347-1364.
5. Bergqvist, Tobias, Lannö, Jonathan. (2020). Managing Sustainability Transformations: barriers for implementing recycled plastics in the automotive industry.
6. Krause, Michael. (2020). Technologies and Innovations for the Plastics Industry: Polymer 2030. In: *Innovative Technologies for Market Leadership. Springer, Cham* (pp. 233-243).
7. Kuzmanović, Maja, et al. (2016). The effect of injection molding temperature on the morphology and mechanical properties of PP/PET blends and microfibrillar composites. *Polymers*, 8.10, 355.
8. De Kort, G. W., Bouvrie, L. H. C., Rastogi, S., Wilsens, C. H. R. M. (2020). Thermoplastic PLA-LCP Composites: A Route toward Sustainable, Reprocessable, and Recyclable Reinforced Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8, 624–631.

9. Sliptsova, I., Savchenko, B., Sova, N., & Sliptsov, A. (2016). Polymer sand composites based on the mixed and heavily contaminated thermoplastic waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 111, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.
10. Pogrebnyak, I.L., Sova, N.V., Savchenko, B.M., Pakharenko, V.A., & Moisyuk, V.S. (2015). A wood-filled composite based on recycled polyethylene terephthalate. Production and properties. *International Polymer Science and Technology*, 42(1), 41-44.
11. Huang, M. S., Nian, S. C. (2020). Robust parameter search for IC tray injection molding using regrind resin. *Journal of Polymer Engineering*. 40, 876–885.
12. Bozzelli J. (2015). Injection Molding: Another way to deal with regrind. *Plastics Technology*. 61, 38–41.
13. Datta, Janusz, Głowińska, Ewa, Włoch, Marcin. (2018). Mechanical Recycling via Regrinding, Rebonding, Adhesive Pressing, and Molding. *Recycling of Polyurethane Foams*. William Andrew Publishing (pp. 57-65).
14. Woo, Wan Nee. (2018). Optimization Of Injection Molding Parameters For 80: 20 Virgin-Regrind Blended ABS Plastic Material.
15. Prystynskyi, S.V., Budash, Yu.O., Stupa, V.I., Pustovoi, I.O. (2019). Osoblyvosti pererobky napovnenyh poliamidnyh kompozytsii metodom lyttia pid tyskom [Features of processing filled polyamide compositions by injection molding method]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnologii ta dyzainu. Seriya Tekhnichni nauky – Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series Technical sciences*, (6(140)), 71-80.
16. IATF16949:2016 Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. 1st Edition.
17. Chou S., Chen J. (2018). Six Sigma-Based Optimization of Shrinkage Accuracy in Injection Molding Processes. *Int. J. Ind. Manuf. Eng.*, 5(3).
18. Dong, S., Chunsheng, E., Fan, B., Danai, K., Kazmer, D.O. (2007). Process-driven input profiling for plastics processing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 129, 802–809.
19. Prístavka, Miroslav, Bujna, Marián. (2014). Monitoring the capability of production equipment in organization. *Acta technologica agriculturae*, 17.2, 39-43.
20. Kampker, Achim, et al. (2017). Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. IEEE (pp. 1-8).
21. Korenko, Maroš, et al. (2013). Statistical process control in automotive industry. *Acta technologica agriculturae*, 16.2, 39-42.
22. Ambarwati, Dewi. (2020). *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.
23. De Siqueira, Sílvia Sérgio Silveira. (2020). 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 (pp. 367-379).
24. Dobránsky Jozef, Pollák Martin, Doboš Zigmund. (2019). Assessment of production process capability in the serial production of components for the automotive industry. *Management systems in production engineering*, 27.4, 255-258.
25. Kim, Joo-Kwon, et al. (2017). A Study on Dimension Optimization of Injection-molded Automotive Bumper by Six Sigma. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 16.6, 109-116.

Отримано 17.11.2022

Serhii Prystynskiy¹, Yurii Budash², Viktoriia Plavan³, Roman Shuliak⁴

¹Postgraduate of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: s.prystynskiy@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1387-8352>

²Doctor of technical sciences, professor

Professor of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

Email: budash.yo@knutd.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1577>

ResearcherID: [H-6012-2018](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577). SCOPUS Author ID: [9134072100](https://orcid.org/0000-0001-8718-1577)

³Doctor of Technical Sciences, Professor

Head of the Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers
Kyiv National University of Technology and Design (Kyiv, Ukraine)

Email: plavan.vp@knutd.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: [I-5852-2015](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962). SCOPUS Author ID: [6603130130](https://orcid.org/0000-0001-9559-8962)

⁴Process engineer in the injection molding department

Kostal Ukraine Ltd (Pereiaslav, Ukraine)

E-mail: r.shuliak@kostal.com

THE INFLUENCE OF THE MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE STABILITY OF INJECTION MOLDING PROCESS OF MULTICOMPONENT WASTE POLYMER COMPOSITIONS

In the work, a comparative analysis of the main technological parameters, as well as the stability of the injection molding process of the primary glass-filled (30 %) polyamide 6 and the secondary composition of the mixture of glass-filled polyamide 6/polycarbonate was carried out.

Non-standard multi-component car parts obtained on the hybrid casting machine "ENGEL" were used as the starting material. The black element of the part is cast from glass-filled polyamide (PA6GF30), the white element - from polycarbonate (PC). Grinding of parts was carried out by a mechanical method on a "Rapid 200" shredder. After mechanical processing, a mixture of particles was obtained from unseparated PA6GF30/RS components in the ratio of 90/10 wt.%. The granulate was used to cast the black component of the part without adding the original polymer composition on the "ENGEL" casting machine. Statistical data for determining the stability of the process and the machine were obtained using the Q Table software module. The results of the research were processed by the 6SIGMA method to obtain the appropriate indicators of process stability.

It is shown that the use of the secondary mixture requires an increase in the drying time and temperature, the parameter of the melt cushion in comparison with the primary material. At the same time, other parameters of the process did not undergo significant changes. At the same time, the stability of the casting process when using the secondary composition did not undergo statistically significant changes compared to the primary material and is within the permissible limits. The obtained results prove the possibility of reprocessing multicomponent waste polymer compositions by injection molding. This can reduce the cost of production by reducing the cost of raw materials, reduce the share of unprocessed polymer waste, and have a positive impact on the ecological aspects of the environment.

Keywords: polyamide 6; polycarbonate; injection molding; polymer composition; secondary processing; process stability, validation.

Table: 2. Fig.: 5. References: 25.