

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.3.8>

Received: 05.05.2026
Revised: 22.05.2026
Accepted: 29.05.2026
Published: 29.05.2026

Кирило АРТЕМЕНКО¹, Вікторія ПЛАВАН¹,
Світлана САЙТАРЛИ²

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

²Національний університет «Одеська політехніка», Україна

УДК 678.7:519.8

**МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ
НАПОВНЕНИХ ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ КОМПОЗИЦІЙ
ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ RSM–GRA АНАЛІЗУ**

Мета. Метою роботи є встановлення можливості застосування методології поєднання поверхні відгуку (Response Surface Methodology, RSM) та сірого реляційного аналізу (Grey Relational Analysis, GRA) для математичного обґрунтування складу наповнених поліпропіленових композицій для виготовлення деталей автомобілів, які можуть бути відібрані для подальшої експериментальної перевірки з урахуванням різних інженерних пріоритетів.

Методика. Математичне моделювання виконано ретроспективно на основі експериментальних даних, отриманих у попередніх дослідженнях авторів. Як незалежні фактори використано вміст концентрату кальциту та вміст поліолефінового еластомеру. Як залежні відгуки розглянуті межа міцності при розтягуванні, показник течії розплаву та ударна в'язкість. На основі експериментального масиву методом найменших квадратів побудовано регресійні моделі другого порядку. На основі побудованих RSM-моделей сформовано серію розрахункових варіантів складу полімерних композицій, для яких виконано GRA-ранжування за різними сценаріями.

Результати. Побудовані RSM-моделі дозволили кількісно описати вплив вмісту концентрату кальциту та поліолефінового еластомеру на міцність, ПТР і ударну в'язкість композицій. Використання GRA дало змогу перевести різнорозмірні відгуки до єдиної безрозмірної шкали й порівняти однаковий набір розрахункових варіантів складу за різних вагових сценаріїв. GRA виконано за різними сценаріями відповідно до інженерних пріоритетів. Отримано структурований ранжований перелік конкурентних варіантів складу полімерних композицій, що дає можливість відбирати рецептури із збалансованими властивостями.

Наукова новизна. Запропоновано схему поєднання методів RSM та GRA для багатокритеріального аналізу складу наповнених поліпропіленових композицій на основі ретроспективного масиву експериментальних даних.

Практична значимість. Запропонований підхід може бути використаний для попереднього відбору складів наповнених поліпропіленових композицій для виготовлення деталей автомобілів без проведення додаткових експериментів. Сценарне GRA-ранжування дає можливість скоротити кількість складів полімерних композицій, що потребують перевірки, та оцінити компроміс між межею міцності при розтягуванні, ПТР та ударною в'язкістю.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація; ранжування; поліпропілен; концентрат кальциту; карбонат кальцію; поліолефіновий еластомер; RSM; GRA; ударна в'язкість; ПТР.

Вступ. Композиційні матеріали на основі поліпропілену широко застосовуються в автомобільній промисловості завдяки поєднанню низької щільності, хімічної стійкості, технологічності переробки та порівняно низької собівартості [1]. Оскільки поліпропілен (ПП) вважається найлегшим термопластиком завдяки низькій щільності, 0,9 г/мл, більшість пластикових деталей в нових автомобілях виготовлено саме з ПП, оскільки автомобільні виробники прагнуть зменшити загальну вагу своїх автомобілів, щоб заощадити на витратах на паливо для покупців [2].

Для автомобільних деталей, зокрема бамперних систем, важливим є не один окремих показник, а баланс між різними експлуатаційними характеристиками матеріалу. Відомо [3], що покращений баланс ударної в'язкості та модуля пружності можливий шляхом змішування ПП з різними еластомерами, такими як етилен-пропіленовий співполімер, стирол-бутадієновий блок-співполімер (SBS), етилен-пропілен-дієновий терполімер (EPDM) чи

ізопрен-стирольний блок-співполімер (ISR-A). Однак, ПП та більшість інших чисто синтетичних полімерів мають досить низьку стійкість до високих температур і часто нижчу міцність, ніж потрібно для довговічних промислових застосувань. Існує кілька методів покращення властивостей ПП з використанням різного роду наповнювачів [4–7]. Відомі результати [8] про застосування тальку, як наповнювача для виготовлення полімерного композиту, який можна використовувати в автомобільній галузі.

У попередніх дослідженнях авторів встановлено, що введення поліолефінового еластомеру в поєднанні з концентратом кальциту дозволяє регулювати міцність, ударну в'язкість, морозостійкість і текучість розплаву композицій, причому для досліджуваного наповнювача спостерігається нетиповий вплив на реологічну поведінку, пов'язаний з особливостями поверхневої обробки частинок наповнювача [9].

Традиційний емпіричний підхід до підбору рецептур не дозволяє повноцінно врахувати нелінійність впливу факторів та взаємодію між ними і вимагає безлічі складних трудомістких експериментів [10]. Для формалізації залежностей між факторами та властивостями композицій доцільно застосовувати методологію поверхні відгуку (Response Surface Methodology, RSM), яка дозволяє перейти від дискретних експериментальних точок до безперервної математичної моделі факторного простору [11]. Проте сама по собі RSM не розв'язує задачу вибору рецептури за наявності кількох суперечливих критеріїв. Для ранжування результатів використовується сірий реляційний аналіз Grey Relational Analysis, GRA [12].

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення можливості застосування методології поєднання поверхні відгуку (Response Surface Methodology, RSM) та сірого реляційного аналізу (Grey Relational Analysis, GRA) для математичного обґрунтування складу наповнених поліпропіленових композицій для виготовлення деталей автомобілів, які можуть бути відібрані для подальшої експериментальної перевірки з урахуванням різних інженерних пріоритетів.

Матеріали та методи дослідження. Математичне моделювання виконано ретроспективно на основі попередніх експериментальних даних авторів щодо поліпропіленових композицій, наповнених концентратом кальциту та модифікованих поліолефіновим еластомером. Як полімерну матрицю використовували поліпропілен марки ПП 21030, як мінеральний наповнювач – концентрат кальциту марки ІТК (ТОВ «Техноком», Україна) з розміром частинок 2,5 мкм (max 20 мкм – 1,5%), а як еластомерний модифікатор – поліолефіновий еластомер «Vistamaxx 6202» («ExxonMobil», США). Для дослідження відібрано ті показники, для яких наявний систематизований масив експериментальних даних у координатах вмісту концентрату кальциту та поліолефінового еластомеру.

Межу міцності при розтягуванні визначали на зразках, одержаних методом лиття під тиском, з використанням розривної машини Р-50 за ДСТУ EN ISO 527-1:2017. Випробування проводили за температури 23 ± 2 °С і відносної вологості 50 ± 5 % зі швидкістю деформування 50 мм/хв. Показник течії розплаву визначали за ДСТУ EN ISO 1133-1 «Пластмаси. Визначення масової та об'ємної швидкості течії розплаву термoplastів (MFR та MVR). Частина 1. Стандартний метод» на приладі «ПРТ-АМ» як масу полімеру, що проходить крізь стандартний капіляр діаметром 2,06 мм за 10 хв, за температури 230 °С і навантаження 2,16 кг. Ударну в'язкість зразків без надрізу визначали за ДСТУ EN ISO 179-2:2017 на маятниковому копрі.

Які незалежні фактори розглядали:

1. X_1 – вміст концентрату кальциту, % мас.;
2. X_2 – вміст поліолефінового еластомеру «Vistamaxx 6202», % мас.

Які залежні відгуки використовували:

1. Y_1 – межа міцності при розтягуванні, МПа;
2. Y_2 – показник течії розплаву (ПТР), г/10 хв;

3. Y_3 – ударна в'язкість, кДж/м²;

Для апроксимації експериментальних даних використано метод найменших квадратів у матричній формі. Для показників міцності при розтягуванні та ПТР застосовано повну квадратичну модель другого порядку, яка описується рівнянням (1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2. \quad (1)$$

Для ударної в'язкості побудовано неповну квадратичну модель, яка описується рівнянням (2):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_1 X_2. \quad (2)$$

Виключення члена X_2^2 у (2) є методично обґрунтованим. У вихідному масиві даних для ударної в'язкості фактор X_2 набуває лише двох значень: 0 та 5% мас. У такому випадку стовпець X_2^2 містить лише значення 0 та 25 і є строго пропорційним стовпцю X_2 . Це створює мультиколінеарність, тобто лінійну залежність стовпців інформаційної матриці. За включення X_2^2 визначник матриці нормальних рівнянь дорівнював би нулю, а метод найменших квадратів не міг би коректно знайти обернену матрицю. Тому для Y_3 використано редуковані квадратичні моделі без члена X_2^2 .

Для оцінювання якості регресійних моделей використовувались коефіцієнт детермінації R^2 , скоригований коефіцієнт детермінації R_{adj}^2 для оцінювання пояснювальної здатності моделей з урахуванням кількості предикторів, стандартна похибка оцінки, а також F-критерій Фішера. Статистична значущість регресій оцінювалась шляхом порівняння розрахованого значення F_{exp} з критичним значенням F_{crit} за рівня значущості $\alpha = 0,05$.

Результати досліджень. На основі отриманих RSM-моделей сформовано серію розрахункових варіантів складу композицій $(X_1, X_2)_k$ із кроком 5% мас. за обома факторами. Для X_1 використано діапазон 0–50% мас., для X_2 – діапазон 0–30% мас.

Для ударної в'язкості значення за X_2 більше 5% мас. є екстрапольованими оцінками, оскільки вихідні експериментальні дані для Y_3 містили лише два рівні еластомерного модифікатора. Тому рецептури з високим вмістом еластомеру, які з'являються у верхніх позиціях GRA-ранжування, не слід трактувати як експериментально доведені оптимуми. Їх треба розглядати як кандидати для подальшої експериментальної перевірки.

Для багатокритеріального ранжування варіантів складу композицій застосовано GRA. Кожний із варіантів складу композицій відповідав певній парі значень факторів $(X_1, X_2)_k$. У межах цієї роботи вищі значення межі міцності при розтягуванні та ударної в'язкості розглядалися як бажані з погляду механічних властивостей матеріалу. Для показника течії розплаву Y_2 вищі значення інтерпретували як ознаку кращої текучості та потенційно полегшеної переробки. Тому для всіх критеріїв використано нормалізацію типу «чим більше, тим краще», що описується формулою (3):

$$Y_{ik}^* = \frac{Y_{ik} - \min Y_i}{\max Y_i - \min Y_i}, \quad (3)$$

де Y_{ik}^* – нормалізоване значення i -го відгуку, k -го варіанта складу композиції X_1 та X_2 .

Після нормалізації всі критерії переводилися у безрозмірний інтервал $[0; 1]$, де значення 1 відповідало найкращому значенню відповідного відгуку в межах розрахункової сітки. Еталонне значення для кожного критерію після нормалізації прийнято рівним 1.

Відхилення нормалізованого значення від еталонного визначається за формулою (4):

$$\Delta_{ik} = |1 - Y_{ik}^*|, \quad (4)$$

де Δ_{ik} – відхилення i -го відгуку, k -го варіанта складу композиції від еталонного значення.

Сірий реляційний коефіцієнт розраховували за формулою (5):

$$GRC_{ik} = \frac{0.5}{(1-Y_{ik}^*)+0.5}, \quad (5)$$

де GRC_{ik} – сірий реляційний коефіцієнт i -го відгуку, k -го варіанта складу композиції.

Значення 0,5 відповідає розрізняльському коефіцієнту GRA. Оскільки еталонне нормалізоване значення для кожного критерію дорівнює 1, величина $(1 - Y_{ik}^*)$ характеризує відхилення відповідного варіанта складу композиції від найкращого значення за цим критерієм.

Інтегральна оцінка GRG_k для кожного варіанта складу композиції визначали за формулою (6), як зважену суму сірих реляційних коефіцієнтів:

$$GRG_k = \sum_i w_i GRC_{ik}, \quad (6)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт i -го відгуку. Найвищі значення GRG_k відповідали варіантам складу композицій із найкращим інтегральним поєднанням властивостей у межах заданого вагового сценарію.

GRA виконано за трьома критеріями для системи відгуків Y_1, Y_2, Y_3 . Такий підхід дозволяє порівняти однаковий набір розрахункових варіантів складу композиції за різних вагових сценаріїв і визначити, як зміна інженерних пріоритетів впливає на порядок ранжування рецептур.

Для кожного варіанта розрахунку застосовано чотири сценарії вагових коефіцієнтів відповідно до інженерних пріоритетів (табл. 1).

Таблиця 1

Сценарії вагових коефіцієнтів

Сценарій	Ваги $Y_1; Y_2; Y_3$	Інженерний зміст
А	[0.2; 0.2; 0.6]	Пріоритет ударної в'язкості
Б	[0.33; 0.33; 0.33]	Рівнозначний баланс критеріїв
В	[0.3; 0.4; 0.3]	Пріоритет технологічності переробки через ПТР
Г	[0.6; 0.1; 0.3]	Пріоритет межі міцності при розтягуванні

На основі наявних експериментальних даних отримано рівняння регресії (7), (8), (9).
Для межі міцності при розтягуванні:

$$Y_1 = 29.1868 - 0.0694 * X_1 - 0.4811 * X_2 - 0.0009 * X_1^2 + 0.0028 * X_2^2 - 0.000018 * X_1 * X_2. \quad (7)$$

Для показника течії розплаву:

$$Y_2 = 3.7260 + 0.0380 * X_1 - 0.0058 * X_2 - 0.00067 * X_1^2 + 0.00029 * X_2^2 - 0.0020 * X_1 * X_2. \quad (8)$$

Для ударної в'язкості:

$$Y_3 = 59.466 - 0.285 * X_1 + 1.467 * X_2 - 0.0009 * X_1^2 - 0.0198 * X_1 * X_2. \quad (9)$$

Результати обчислення отриманих моделей на основі повного набору варіантів складів композиції графічно представлені у вигляді контурних карт на рис. 1 і в табл. 2.

Отримані значення F_{exp} перевищують відповідні F_{crit} , що свідчить про статистичну значущість регресійних моделей на рівні $\alpha = 0,05$. Водночас модель ПТР має лише помірну пояснювальну здатність ($R^2 = 0.708$, $R^2_{adj} = 0.623$), тому її результати слід інтерпретувати обережно, особливо за межами густо представленої експериментальної області.

Модель міцності при розтягуванні показує загальну тенденцію до зниження Y_1 зі збільшенням вмісту еластомерного модифікатора. Це узгоджується з очікуваним впливом

м'якої еластомерної фази, яка підвищує здатність матеріалу до розсіювання енергії, але може знижувати статичну міцність поліпропіленового каркасу.

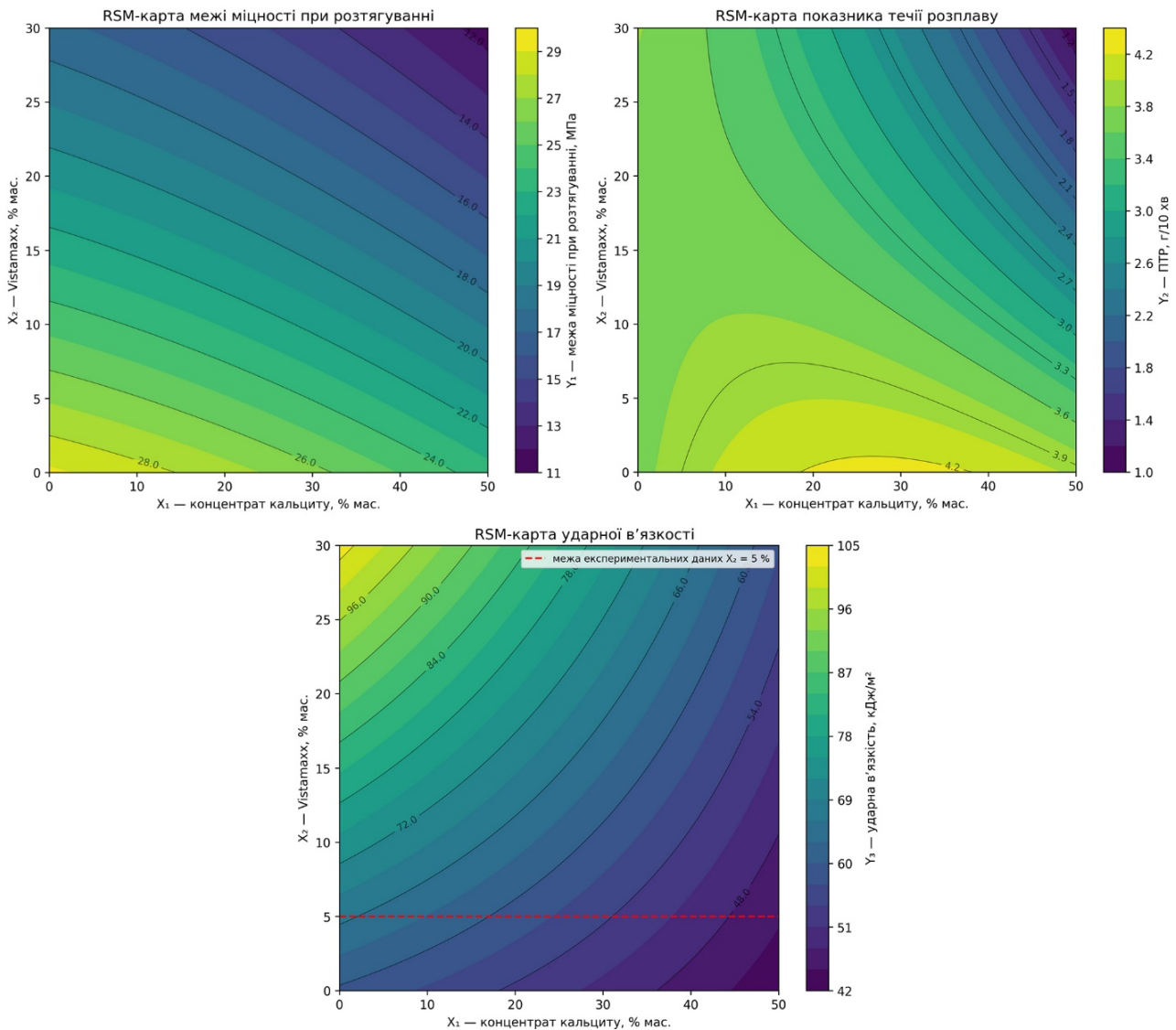


Рис.1. Суміщені контурні карти поверхонь відгуків Y_1, Y_2, Y_3

Таблиця 2

Статистичні характеристики отриманих моделей

Відгук	Тип моделі	R ²	R ² adj	RMSE	F _{exp}	F _{crit}
Y ₁ , міцність	повна квадратична	0.861	0.830	3.045	27.33	2.66
Y ₂ , ПТР	повна квадратична	0.708	0.623	0.793	8.26	2.81
Y ₃ , ударна в'язкість	неповна квадратична	0.914	0.876	2.719	23.93	3.63

Модель ПТР відображає нетипову поведінку досліджуваної системи. Позитивний лінійний коефіцієнт при X_1 свідчить про те, що збільшення вмісту концентрату кальциту у певному діапазоні може супроводжуватися підвищенням текучості розплаву. Це узгоджується з інтерпретацією щодо впливу стеаринового шару на поверхні частинок CaCO₃ [13]. Водночас від'ємний коефіцієнт при X_1^2 вказує на наявність нелінійного обмеження цього ефекту, а

від'ємний коефіцієнт при взаємодії $X_1 * X_2$ свідчить про погіршення текучості при одночасному підвищенні вмісту наповнювача та еластомеру.

У моделях ударної в'язкості позитивний коефіцієнт при X_2 відображає внесок еластомерного модифікатора у зростання здатності матеріалу поглинати енергію удару. Має місце важливе обмеження: вихідні дані ударної в'язкості містять лише два рівні еластомеру (0 та 5% мас.). Тому прогнозування для $X_2 > 5\% \text{ мас.}$ є екстраполяцією і потребує експериментальної перевірки.

У сценарії А найбільшу вагу має ударна в'язкість ($w = 0.6$). Тому у верхні позиції потрапляють рецептури з високим розрахунковим вмістом еластомеру (табл. 3).

Таблиця 3

Результати ранжування варіантів складу композиції для сценарію А

Ранг	X_1 , % мас.	X_2 , % мас.	Y_1 , МПа	Y_2 , г/10 хв	Y_3 , кДж/м ²	GRG
1	0	30	17.2738	3.8130	103.4760	0.841501
2	5	30	16.9016	3.6863	99.0585	0.754503
3	0	25	18.9093	3.7623	96.1410	0.727954
4	10	30	16.4844	3.5260	94.5960	0.683135
5	5	25	18.5376	3.6855	92.2185	0.675211

Результати $X_2 = 30\% \text{ мас.}$ не трактується як оптимальний вміст еластомеру. Оскільки модель ударної в'язкості екстраполюється за межі експериментального інтервалу $X_2 [0;5]\% \text{ мас.}$ Рецептури з $X_2 = 25\text{--}30\% \text{ мас.}$ є передусім кандидатами для подальшої експериментальної перевірки. Водночас сама поява таких складів у верхній частині рейтингу наочно показує, що за пріоритету ударної в'язкості модельна система очікувано зміщується в еластомер-збагачену область.

У сценарії Б усі три критерії мають однакову вагу. Це дозволяє оцінити, які рецептури є конкурентними без явно заданого пріоритету на одну властивість (табл. 4).

Таблиця 4

Результати ранжування варіантів складу композиції для сценарію Б

Ранг	X_1 , % мас.	X_2 , % мас.	Y_1 , МПа	Y_2 , г/10 хв	Y_3 , кДж/м ²	GRG
1	0	30	17.2738	3.8130	103.4760	0.728476
2	15	0	27.9433	4.1453	54.9885	0.723601
3	10	0	28.4028	4.0390	56.5260	0.722159
4	20	0	27.4388	4.2180	53.4060	0.720806
5	5	0	28.8173	3.8993	58.0185	0.717875

Рівнозначний сценарій показує, що система має не один безумовний оптимум, а групу близьких за GRG варіантів складу композиції. Частина з них належить до області без мінерального наповнювача, а частина – до області помірному вмісту концентрату кальциту без еластомеру. Це демонструє, що в умовах конкурентних властивостей GRA вимагає чіткої постановки задачі і відповідного розподілення вагових коефіцієнтів та не може бути інтерпретований як універсальна рецептура для всіх умов експлуатації.

У сценарії В найбільшу вагу має ПТР ($w = 0.4$), тому рейтинг очікувано зміщується до рецептур із підвищеною текучістю розплаву (табл. 5).

Сценарій В демонструє, що за підвищеної ваги ПТР рейтинг зміщується до композицій із помірним вмістом концентрату кальциту та без поліолефінового еластомеру. Перші три позиції займають варіанти $X_1 = 15\text{--}25\% \text{ мас.}$, $X_2 = 0\% \text{ мас.}$, а склад $X_1 = 10\% \text{ мас.}$, $X_2 = 0\% \text{ мас.}$ залишається близьким конкурентом. Це дозволяє розглядати область $X_1 = 10\text{--}25\% \text{ мас.}$, $X_2 = 0\% \text{ мас.}$ як основну зону технологічно привабливих рецептур за даного вагового сценарію.

Таблиця 5

Результати ранжування варіантів складу композиції для сценарію В

Ранг	X ₁ , % мас.	X ₂ , % мас.	Y ₁ , МПа	Y ₂ , г/10 хв	Y ₃ , кДж/м ²	GRG
1	20	0	27.4388	4.2180	53.4060	0.752563
2	15	0	27.9433	4.1453	54.9885	0.751014
3	25	0	26.8893	4.2573	51.7785	0.747391
4	10	0	28.4028	4.0390	56.5260	0.744311
5	0	30	17.2738	3.8130	103.4760	0.740433

Водночас рецептура X₁ = 0% мас., X₂ = 30% мас. потрапляє до топ-5 не завдяки максимальному ПТР, а через високу прогнозу ударну в'язкість, отриману в зоні екстраполяції за вмістом еластомеру. Тому її доцільно розглядати не як частину основної технологічної зони, а як окремих кандидат для експериментальної перевірки. Загалом сценарій В добре демонструє перевагу GRA: метод не зводить аналіз до одного формального максимуму, а показує групу близьких за інтегральним рангом варіантів складу композиції, серед яких можна здійснювати подальший експертний відбір.

У сценарії Г (табл. 6) найбільшу вагу має межа міцності при розтягуванні (w = 0.4). Верхні позиції закономірно займають склади без еластомеру, оскільки еластомерна фаза знижує межу міцності при розтягуванні. Водночас перші позиції також містять склади з невеликим або помірним вмістом концентрату кальциту, що може бути важливим для подальшого врахування вартості виробу, стабільності розмірів або екологічних показників.

Таблиця 6

Результати ранжування варіантів складу композиції для сценарію Г

Ранг	X ₁ , % мас.	X ₂ , % мас.	Y ₁ , МПа	Y ₂ , г/10 хв	Y ₃ , кДж/м ²	GRG
1	0	0	29.1868	3.7260	59.4660	0.797235
2	5	0	28.8173	3.8993	58.0185	0.777376
3	10	0	28.4028	4.0390	56.5260	0.756438
4	15	0	27.9433	4.1453	54.9885	0.734397
5	20	0	27.4388	4.2180	53.4060	0.711133

Узагальнення результатів GRA показує, що рейтинг рецептур істотно залежить від постановки інженерної задачі та вибору вагових коефіцієнтів. Зміна пріоритетів зміщує область перспективних складів: за пріоритету ударної в'язкості система тяжіє до еластомер-збагачених рецептур, за пріоритету ПТР – до композицій з помірним вмістом концентрату кальциту, а за пріоритету міцності – до складів з мінімальним вмістом модифікатора.

Поява у верхній частині рейтингу складів без мінерального наповнювача не суперечить попереднім експериментальним результатам авторів, у яких практично доцільна область наповнених композицій була пов'язана з помірним вмістом концентрату кальциту та введенням поліолефінового еластомеру. У цьому дослідженні GRA враховує лише механічні та реологічні критерії, але не враховує вартість, екологічність або обмеження на мінімальний вміст наповнювача. Тому склади з X₁ = 0% слід розглядати не як спростування доцільності наповнення, а як наслідок обраної математичної постановки задачі.

Практична цінність GRA полягає не у визначенні одного остаточного оптимуму, а у формуванні групи близьких за інтегральним рангом рецептурних кандидатів. Це дозволяє поєднати формальний розрахунок із подальшим експертним відбором: відкидати екстраполяційні або технологічно недоцільні склади, виділяти реалістичні рецептурні зони та планувати наступні експериментальні перевірки.

У подальших дослідженнях доцільно розширити GRA-модель за рахунок додаткових критеріїв, зокрема собівартості, екологічності та мінімально допустимого вмісту концентрату кальциту.

Висновки. У роботі доведено можливість поєднання методів RSM та GRA для ретроспективного аналізу експериментальних даних щодо системи «поліпропілен – концентрат кальциту – поліолефіновий еластомер». Побудовані RSM-моделі дозволили кількісно описати вплив вмісту концентрату кальциту та поліолефінового еластомеру на міцність, ПТР і ударну в'язкість композицій. Використання GRA дало змогу перевести різнорозмірні відгуки до єдиної безрозмірної шкали й порівняти однаковий набір розрахункових варіантів складу за різних вагових сценаріїв. Основним результатом є не стільки визначення єдиного оптимального складу, скільки формування набору параметрів для подальшої експериментальної перевірки.

RSM виявився корисним для кількісного опису нелінійних залежностей між складом і властивостями композицій, а GRA – для порівняння варіантів складу за кількома суперечливими критеріями. Водночас результати GRA суттєво залежать від вагових коефіцієнтів, способу нормалізації та складу критеріїв.

Отримані результати узгоджуються з попередніми експериментальними висновками авторів щодо вмісту концентрату кальциту і поліолефінового еластомеру у складі композиції, але також показують обмеженість оптимізації лише за механічними та реологічними критеріями. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку відібраних рецептурних діапазонів, розширення масиву даних за рівнями X_2 та включення до GRA додаткових критеріїв: собівартості, екологічності, мінімально допустимого вмісту наповнювача та стабільності лінійних розмірів виробів.

References

Література

1. Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*, 19(1), 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03952-z>.
2. Karian, H. G. (2005). *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites* (2nd ed., p. 76). New York: Marcel Dekker. URL: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780203911808_A23567367/preview-9780203911808_A23567367.pdf.
3. Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: a review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>.
4. Shirvanimoghaddam, K., Balaji, K. V., Yadav, R. et al. (2021). Balancing the toughness and strength in polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 223, 109121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109121>.
5. Singh, M. K., Tewari, R., Zafar, S. et al. (2023). A comprehensive review of various factors for application feasibility of natural fiber-reinforced polymer composite. *Results in Materials*, 17, 100355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100355>.
6. Mohan, K. A., Dimple, A. N., Ashokavel, S. et al. (2022). Numerical investigation of mechanical properties of hybrid fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2255–
1. Hossain M. T., Shahid M. A., Mahmud N., Habib A., Rana M. M., Khan S. A., Hossain M. D. Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*. 2024. Vol. 19, No. 1. Article 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03952-z>.
2. Karian H. G. *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2005. P. 76. URL: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780203911808_A23567367/preview-9780203911808_A23567367.pdf.
3. Maddah H. A. Polypropylene as a promising plastic: a review. *American Journal of Polymer Science*. 2016. Vol. 6, No. 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>.
4. Shirvanimoghaddam K., Balaji K. V., Yadav R. et al. Balancing the toughness and strength in polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 223. Article 109121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109121>.
5. Singh M. K., Tewari R., Zafar S. et al. A comprehensive review of various factors for application feasibility of natural fiber-reinforced polymer composite. *Results in Materials*. 2023. Vol. 17. Article 100355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100355>.
6. Mohan K. A., Dimple A. N., Ashokavel S. et al. Numerical investigation of mechanical properties of hybrid fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 52.

2263. DOI: P. 2255–2263. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.096>.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.096>.
7. Yu, T., Zhang, Z., Song, S. et al. (2019). Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 225, 111147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111147>.
7. Yu T., Zhang Z., Song S. et al. Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*. 2019. Vol. 225. Article 111147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111147>.
8. Timsina, S. (2019). Investigation into mechanical properties to use recycled polypropylene/talc composites for car bumper application. *Technical Journal*, 1(1), 54–64. DOI: <https://doi.org/10.3126/tj.v1i1.27592>.
8. Timsina S. Investigation into mechanical properties to use recycled Polypropylene/Talc composites for car bumper application. *Technical Journal*. 2019. Vol. 1, No. 1. P. 54–64. DOI: <https://doi.org/10.3126/tj.v1i1.27592>.
9. Saitarly, S. V. (2019). Rozrobka napovnenykh polimernykh kompozytsii z polipsheny my vlastyvo stiyamy na osnovi polipropilenu i olihobutadiieniv [Development of filled polymer compositions with improved properties based on polypropylene and oligobutadienes: extended abstract of Candidate's thesis in Technical Sciences, 05.17.06 – Technology of polymer and composite materials]. Kyiv: Kyiv National University of Technologies and Design [in Ukrainian].
9. Сайтарли С. В. Розробка наповнених полімерних композицій з поліпшеними властивостями на основі поліпропілену і олігобутадиєнів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 – технологія полімерних і композиційних матеріалів. Київ: Київський національний університет технологій та дизайну, 2019.
10. Vasnetsov, V., & Vasnetsov, C. (2023). Optimization techniques for multi-component materials. *Journal of Modern Polymer Chemistry and Materials*, 2, 2. DOI: <https://doi.org/10.53964/jmpcm.2023002>.
10. Vasnetsov V., Vasnetsov C. Optimization techniques for multi-component materials. *Journal of Modern Polymer Chemistry and Materials*. 2023. Vol. 2. Article 2. DOI: <https://doi.org/10.53964/jmpcm.2023002>.
11. Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escalera, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76, 965–977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>.
11. Bezerra M. A., Santelli R. E., Oliveira E. P., Villar L. S., Escalera L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*. 2008. Vol. 76. P. 965–977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>.
12. Deng, J. (1989). Introduction to Grey System Theory. *The Journal of Grey System*, 1(1), 1–24.
12. Deng J. Introduction to Grey System Theory. *The Journal of Grey System*. 1989. Vol. 1, No. 1. P. 1–24.
13. Dziubenko, L. S., Saitarly, S. V., Sapianenko, O. O., Horbyk, P. P., Plavan, V. P., & Budash, Yu. O. (2019). Vplyv vysokodispersnoho kaltsytu na reolohiiu, strukturu ta termostiikist kompozytiv na osnovi polipropilenu [Influence of highly dispersed calcite on rheology, structure and thermal stability of polypropylene-based composites]. *Surface*, 11(26), 403–413. DOI: <https://doi.org/10.15407/Surface.2019.11.403>.
13. Дзюбенко Л. С., Сайтарли С. В., Сап'яненко О. О., Горбик П. П., Плаван В. П., Будащ Ю. О. Вплив високодисперсного кальциту на реологію, структуру та термостійкість композитів на основі поліпропілену. *Поверхня*. 2019. № 11 (26). С. 403–413. DOI: <https://doi.org/10.15407/Surface.2019.11.403>.

ARTEMENKO KYRYLO

PhD Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0001-2714-0068>

E-mail: artemenko.kv@knutd.edu.ua

PLAVAN VIKTORIYA

Doctor of Sci., Professor, Head of Department of Chemical Technologies and Resource Saving,

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

Scopus Author ID: 6603130130
e-mail: plavan.vp@knutd.edu.ua

SAITARLY SVITLANA
PhD, Associate Professor,
Department of Chemical Technologies,
Odessa National Polytechnic University, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-1344-444X>
E-mail: svetlanasaitarly@gmail.com

Kyrylo ARTEMENKO¹, Viktoriia PLAVAN¹, Svitlana SAITARLY²

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² Odessa National Polytechnic University, Ukraine

MATHEMATICAL JUSTIFICATION OF FILLED POLYPROPYLENE COMPOSITE FORMULATIONS FOR AUTOMOTIVE PART MANUFACTURING USING RSM–GRA ANALYSIS

Purpose. The purpose of the study is to assess the applicability of a combined response surface methodology (RSM) and grey relational analysis (GRA) approach to the selection of filled polypropylene composite formulations for automotive part manufacturing, which can be selected for further experimental verification with regard to different engineering priorities.

Methodology. The mathematical modelling was performed retrospectively using experimental data obtained in previous studies by the authors. The contents of calcite concentrate and polyolefin elastomer were used as independent variables. Tensile strength, melt flow index and impact strength were selected as the responses. Second-order regression models were developed based on the experimental dataset using the least squares method. Based on the obtained RSM models a series of calculated composition variants of polymer composites was generated and GRA ranking was performed for these variants under different scenarios.

Findings. The use of GRA enabled responses with different dimensions to be transformed into a single dimensionless scale and allowed the same set of calculated composition variants to be compared under different weighting scenarios. GRA was performed under different scenarios corresponding to engineering priorities. As a result, a structured ranked list of competitive composition variants of polymer composites was obtained, which makes it possible to select formulations with balanced properties.

Originality. A scheme combining RSM and GRA methods for multi-criteria analysis of the composition of filled polypropylene composites based on a retrospective experimental dataset is proposed.

Practical value. The proposed approach can be used for the preliminary selection of filled polypropylene composite formulations for automotive part manufacturing prior to additional experimental verification. Scenario-based GRA ranking helps reduce the number of compositions requiring verification and supports the evaluation of compromise between tensile strength, melt flow index and impact strength.

Keywords: multi-criteria optimization; ranking; polypropylene; calcite concentrate; calcium carbonate; polyolefin elastomer; RSM; GRA; impact strength; melt flow index.