

УДК 669.71:658.5:620.92:504.06(477)
JEL M11, Q01, L61, D24, C61

ЕКОНОМІКО-АНАЛІТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ АЛЮМІНІЮ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ БРАКУ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Віктор Тригуба

*Національний університет водного господарства та природокористування,
33000, м. Рівне, вул. Соборна, 11
e-mail: v.y.tryhuba@nuwm.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2568-976X>*

Анотація. У статті розроблено економіко-аналітичний підхід до вдосконалення процесу екструзії алюмінію для малих і середніх підприємств (МСП), що забезпечує баланс між економічною ефективністю та мінімізацією екологічного впливу в умовах енергетичної волатильності. Для досягнення мети використано відкриті еталони International Aluminium Institute та European Aluminium, адаптовані до умов українського ринку, та синтетичний набір із 2500 виробничих партій з ключовими технологічними параметрами (температура білета/контейнера/матриці, швидкість пуансона, тиск, знос матриці, геометрія профілю), часткою вторинного алюмінію та показниками якості електропостачання. Базова модель - множинна лінійна регресія з квадратичними термами та взаємодіями між предикторами - досягає $R^2 \approx 0.88$, $RMSE \approx 1.15$ в.п. і є достатньою для оперативного моніторингу та сценарного аналізу. Встановлено, що геометрична складність профілю є провідним чинником рівня браку (від 8.9% для простих до 14.4% для складних порожнистих профілів), виявлено U-подібну залежність від температури білета (оптимум $\sim 465^\circ\text{C}$) та швидкості пуансона (оптимум ~ 6.2 мм/с).

Доведено, що контроль технологічних відхилень, обслуговування матриць за фактичним станом, підвищення частки вторинного алюмінію, впровадження енергоменеджменту ISO 50001 та диспетчеризація навантаження в позапікові години знижують рівень браку, питомі енерговитрати й викиди CO_2 , позитивно впливаючи на собівартість і маржинальність. Запропонований підхід формує відтворювану економіко-технологічну основу бізнес-моделі МСП, узгоджується з Цілями сталого розвитку ООН №7, 8, 9, 11, 12, 13 та демонструє практичний потенціал для алюмінієвої галузі в умовах повоєнної відбудови України.

Ключові слова: екструзія алюмінію, ефективність, керування якістю, енергоменеджмент ISO 50001, сталий розвиток, ESG.

Постановка проблеми. Український ринок алюмінієвих профілів, сформований переважно малими та середніми підприємствами, функціонує в умовах високої волатильності енергоресурсів і перебоїв у ланцюгах постачання, що у 2022–2024 роках проявлялося піковими тарифами, перервами та зниженням якості електропостачання. Такі шоки безпосередньо трансформуються в економічні втрати: зростання частки



браку, простої, підвищення собівартості через енергоємність і цінові ризики, а також ускладнення виконання контрактів. Водночас глобальний тренд до циркулярної економіки та декарбонізації підвищує вартість відповідності вимогам клієнтів і ринків збуту, стимулюючи інтеграцію вторинного алюмінію й енергоефективних практик. У цьому контексті розвиток української алюмінієвої галузі безпосередньо корелює з цілями сталого розвитку ООН: №7 (Доступна та чиста енергія) через системний енергоменеджмент і зниження питомого споживання; №9 (Індустріалізація, інновації та інфраструктура) через модернізацію виробничих потужностей і цифрову аналітику; №12 (Відповідальне споживання і виробництво) через підвищення частки вторинної сировини та зниження відходів; №13 (Боротьба зі зміною клімату) через скорочення вуглецевого сліду й управління Scope 2 – непрямі викиди парникових газів [1].

Ключовим завданням державної промислової політики та бізнес-стратегій малих і середніх підприємств (далі МСП) є відновлення критичних потужностей з виробництва первинного алюмінію та розбудова повного ланцюга створення вартості у виробках з нього, включно з екструзійними профілями. Це питання економічної безпеки та стратегічної автономії: імпортозалежність формує курсові й цінові ризики, погіршує торговельний баланс та знижує стійкість до зовнішніх шоків. Власна база первинного металу, що у поєднанні з високою часткою переробленого скрапу зменшує транзакційні витрати, стабілізує ціноутворення для МСП, підвищує локалізацію доданої вартості та зайнятість у суміжних галузях, таких як: логістика, інжиніринг, ремонт. Економічний ефект підсилюється в умовах повоєнної відбудови: очікуваний попит на будівельні конструкції, що містять алюміній, сприяє розвитку алюмінієвого виробництва.

З технологічної точки зору, фактори процесу екструзії (температурні режими, швидкість пуансона, тиск, стан і знос матриць, а також геометрична складність профілю) є передусім економічними чинниками, оскільки визначають рівень браку, енергоємність на тону продукції, тривалість простоїв і, як наслідок, собівартість та рентабельність. Тому актуальність дослідження полягає в удосконаленні виробничих процесів для забезпечення його ефективності з поєднанням: а) управління якістю для скорочення виробничих втрат; б) енергоменеджменту для зниження витрат і браку; в) розширення використання вторинного алюмінію; г) поетапного відновлення і модернізації потужностей первинного алюмінію як основи стійких ланцюгів вартості для відбудови країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До стратегічних напрямів підвищення конкурентоспроможності та економічної стійкості алюмінієвих виробництв належать:

- Зростання частки вторинного алюмінію в шихті як інструменту циркулярної економіки: це зменшує матеріальні витрати, валютну залежність від імпорту первинного металу та скорочує вуглецеву інтенсивність продукції, підвищуючи її експортну привабливість [2].
- Підвищення енергоефективності термічних агрегатів і пресового парку (енергоменеджмент, модернізація печей/пресів): знижує питомі енерговитрати, зменшує чутливість до волатильності тарифів і покращує маржинальність, особливо в умовах пікових цін [3, 4, 5].

- Обслуговування за фактичним станом і відновлення матриць: скорочує простої, зменшує брак і втрати металу, що прямо впливає на OPEX – операційні витрати компанії і оборотність капіталу [6].

Зазначені заходи узгоджуються з цілями сталого розвитку: №7 – доступна та чиста енергія), №8 – гідна праця та економічне зростання, №9 - індустріалізація, інновації та інфраструктура), №12 – відповідальне споживання та виробництво і №13 – боротьба зі зміною клімату, оскільки сприяють підвищенню енергоефективності, зниженню викидів і оптимізації використання ресурсів. Додатково, для секторів житлової та транспортної інфраструктури, що потребуватимуть масштабної реконструкції, релевантні №11 – сталий розвиток міст і громад, через внесок алюмінієвого профілю в енергоефективні будівлі, фасадні системи, віконні та світлопрозорі конструкції [7].

Тому запропонований в цій роботі підхід одночасно підвищує конкурентоспроможність МСП, зменшує вразливість до макроекономічних змін та забезпечує узгодження з глобальними цілями сталого розвитку.

Постановка завдання. Метою дослідження є пошук оптимальних рішень щодо удосконалення процесу виробництва алюмінію, що забезпечують баланс між досягненням економічних ефектів та мінімізацією негативного впливу на довкілля. Досягнення мети передбачає вирішення таких завдань, обумовлених особливостями технології алюмінієвих виробництв: 1) зменшення браку в процесі екструзії; 2) досягнення оптимального енергоспоживання; 3) мінімізацію вуглецевого сліду.

Виконання завдань ускладнюється обмеженістю детальних спостережень на рівні партій у МСП, у зв'язку з чим доцільним є застосування підходів даних з відкритих джерел [8,9] та синтетичного моделювання з калібруванням під локальну практику. Такий підхід дозволяє побудувати відтворювану базову аналітику щоденних рішень: прогноз рівня браку, чутливість до відхилень параметрів, оцінку компромісу між продуктивністю та якістю, а також інтегрувати метрики енергоефективності та зменшення викидів, що є важливим в контексті використання принципів ESG-сталості в алюмінієвому виробництві.

Виклад основного матеріалу дослідження. Еталонні параметри адаптовано до умов українських МСП на основі даних International Aluminium Institute (IAI) та European Aluminium Environmental Profile Report (EAE), доповнених інформацією групи компаній «Прушиньські», ТзОВ «Арсенал-Центр» та турецьких виробників ASAŞ, Saray, Sistem Alüminyum, Şişecam Aluminium. Одиницею аналізу є виробнича партія екструзії; сформовано синтетичний набір із 2500 партій. Ключовим економічним індикатором обрано частку брухту (scrap gate), яка безпосередньо визначає питомі витрати та викиди Scope 2. Перелік змінних моделі наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Змінні моделі прогнозування частки брухту в екструзії алюмінію

Змінна	Опис	Одиниця
Цільовий показник		
scrap_rate_pct	Частка брухту від маси партії	%
Технологічні параметри		
billet_temp_C	Температура білета перед екструзією	°C
container_temp_C	Температура контейнера преса	°C
die_temp_C	Температура матриці	°C
ram_speed_mm_s	Швидкість ходу пуансона	мм/с
pressure_MPa	Тиск екструзії	МПа
die_age_hours	Напрацювання матриці	год
since_maint_batches	Кількість партій від останнього обслуговування матриці	од.
Геометрія профілю		
geometry_class	Клас складності: 1 – простий, 2 – середній, 3 – складний	-
thin_sections	Наявність тонких перетинів	0/1
shape_complexity_idx	Індекс геометричної складності	-
Матеріал та операції		
alloy	Марка сплаву (6060, 6063, 6082, 6005A)	-
operator_experience_years	Стаж оператора	років
shift	Виробнича зміна	-
Показники сталості		
recycled_content_pct	Частка вторинного металу в партії	%
elec_quality_events	Кількість енергетичних перерв у межах партії	од.
energy_kWh_per_t	Питома електроенергія на тону продукції	кВт·год/т
scope2_kgCO2_per_kWh	Коефіцієнт викидів електроенергії (баз. 0.4)	кг CO ₂ /кВт·год

Джерело: складено автором на основі IAI/EAE.

Базова модель – множинна лінійна регресія з квадратичними термами відхилень від оптимумів і взаємодією «геометрична складність × швидкість» – доповнена задачею оптимізації керованих параметрів з м'якими енергетичними штрафами. Використання синтетичних даних обумовлено відсутністю детальної партійної телеметрії у відкритому доступі.

Першим етапом дослідження є визначення модельних припущень та генерація даних. Технологічні параметри моделі визначаються у межах, типових для тих, що наведені в звітах IAI/EAA, тому дані, описані в методологічній частині, придатні для економічно коректних міжсценарних порівнянь і подальшої оптимізації [8,9]. Характеристики вихідних даних: середні scrap rate: 5–7%, зростають до 10–15% для geometry_class=3; трохи вищі для складів сировини 6082/6005A, що прямо збільшує втрати матеріалу й переробки; U-подібні ефекти: відхилення температур, швидкості і тиску від «робочих оптимумів» підвищують scrap; вплив зносу матриці (die_age_hours) – позитивний; досвіду оператора – негативний; енергоякість: elec_quality_events збільшує відхилення температур/швидкості і, відповідно, scrap.

Таблиця 2 містить результати обчислень, отримані в Google Colab. Синтетичний набір даних сформовано зі фіксованим початковим значенням; процедури оцінювання та перевірки гіпотез виконано відповідно до детермінованого алгоритму, що гарантує відтворюваність оцінок і висновків.

Аналіз вихідних даних підтверджує відповідність синтетичного набору галузевим орієнтирам IAI/ЕАА: параметри процесу в межах 430–500°C, 3–9 мм/с та 25–55 МПа не виходять за типове технологічне вікно, що забезпечує коректність міжсценарних порівнянь і базової оптимізації. Рівень браку зростає з ускладненням геометрії профілю, що узгоджується з галузевими нормами: 10–15% і вище для складних тонкостінних конструкцій. Відхилення температури матриці від оптимального діапазону (440–480°C) – наприклад, значення ~402°C у партії 3 – асоціюється з різким зростанням частки браку, що підтверджує U-подібний характер залежності. Поєднання швидкості пуансона, значень температур і наявності тонких перетинів підвищує ризик браку навіть для профілів першого класу складності. Питома енергоємність партій коливається в діапазоні ~795–1079 кВт·год/т, що відповідає викидам Score 2 на рівні ~37–52 кг CO₂ на партію. Чутливість вуглецевого сліду до цього коефіцієнта є суттєвою: зміна від 0.35 до 0.50 кг CO₂/кВт·год збільшує викиди партії приблизно на 40–45% за незмінної енергоємності, що є критичним параметром при оцінці ефективності PPA-контрактів та інвестицій в енергоефективність.

Таблиця 2

Синтетичний набір даних для калібрування екструзії: параметри, брак, енергія, CO₂

batch id	billet temp C	container temp C	die temp C	ram speed mm s \
1	486.6	443.7	449.9	6.49
2	470.5	427.0	469.2	6.40
3	446.4	434.0	401.9	4.81
pressure_MPa	geometry_class	hollows	thin_sections	shape_complexity_idx \
25.6	1	0	1	0.6
49.4	1	0	0	0.0
41.5	2	0	1	1.6
...	pieces_per_batch	batch_mass_kg	recycled_content_pct \	
...	1	105.4	47.2	
...	1	98.2	56.0	
...	1	131.5	27.4	
elec_quality_events	energy_kWh_per_t	scope2_kgCO ₂ _per_kWh \		
0	907	0.40		
0	1079	0.35		
0	795	0.50		
scrap_rate_pct	scrap_mass_kg	good_mass_kg	scope2_kgCO ₂ _batch	
10.51	11.1	94.3	38.2	
10.34	10.1	88.0	37.1	
19.55	25.7	105.8	52.3	
[3 rows x 26 columns]				

Джерело: розраховано автором у Google Colab.

Після проведення специфікації моделей та валідації побудована модель прогнозування частки браку (*scrap_rate_pct*) демонструє $RMSE = 1.152$ відсотковий пункт (далі в.п.), $MAE = 0.93$ в.п. та $R^2 = 0.882$. Таким чином, модель пояснює близько 88% варіації браку, а середня прогнозна похибка становить близько 1.15 відсоткового пункту. Для типового рівня браку $\sim 10\%$ відносна похибка оцінок дорівнює орієнтовно 11–12%, що є достатнім для оперативного моніторингу і «what-if» сценаріїв у виробничих умовах МСП. Порівняння $RMSE$ і MAE свідчить, що поодинокі великі відхилення присутні, але не домінують, що підвищує надійність управлінських висновків.

Операційна значущість цих метрик визначає поріг «детектованих» змін: очікуваний ефект на рівні 0.5–0.8 в.п. може нівелюватися стохастичною похибкою, тоді як інтервенції зі зниженням браку на ≥ 1.5 –2.0 в.п. є статистично і економічно помітними. Модель узгоджується з орієнтирами IAI/EAA: середній скрап 6–7% із підвищенням для тонкостінних та складних профілів (*geometry_class* $\geq 2/3$), що підтверджує придатність підходу для міжсценарних порівнянь без виходу за галузеві діапазони параметрів процесу.

Таблиця 3

Описова статистика *scrap_rate_pct* за класами геометрії

<i>geometry_class</i>	N	mean	median	IQR
1	1280	9.3	8.9	7.3–10.9
2	815	11.0	10.6	8.9–12.7
3	405	14.8	14.4	12.7–16.5
ALL	2500	10.7	10.2	8.2–12.8

Пояснення: середнє, медіана, IQR і кількість партій на клас геометрії.

Підвищення *scrap* піднімає собівартість «придатного» кг у множник $1/(1 - s)$. Для класу 1 ($s \approx 0.089$) множник ≈ 1.098 ; класу 2 (0.106) ≈ 1.119 ; класу 3 (0.144) ≈ 1.168 . Тобто за однакових вхідних витрат клас 3 має $\approx 6.4\%$ вищу собівартість проти класу 1 лише через втрату виходу.

За часткового відновлення внутрішнього брухту ($r = 60$ –85% за вартістю) економічна втрата дорівнює $(1 - r)$ від його вартості. Кожне -1 в.п. *scrap* дає найбільший ефект за високої матеріаломісткості (AL 60-80%) і низького r .

Клас 1: медіана 8.9% (IQR 7.3-10.9) – нижчий рівень *scrap* і відносно вузький розкид. *Клас 2*: медіана 10.6% (IQR 8.9-12.7) – +1.7 в.п. до класу 1; помірне розширення варіабельності. *Клас 3*: медіана 14.4% (IQR 12.7-16.5) – +5.5 в.п. до класу 1 ($\sim +62\%$ відносно); найвищий і найбільш мінливий *scrap*.

Сукупно по вибірці: середнє 10.7%, медіана 10.2% (IQR 8.2-12.8), що узгоджується з бенчмарками IAI/EAA: прості профілі 3-8%, складні/порожнисті 8–15%+.

Варіативність результатів зростає з класом: ширший IQR у класу 3 свідчить, що складні/порожнисті профілі не лише мають вищий середній *scrap*, а й більш чутливі до налаштувань процесу. При цьому у розрахунках застосовано такі показники вибірки: $n=1280$ до класу 1, $n=815$ до класу 2, $n=405$ до класу 3. Частка складних профілів менша, але саме вони генерують непропорційно великий внесок у загальний *scrap*.

Тому важливо адаптувати практичні та економічні рекомендації для виробництва виробів з алюмінію: для виробництв виробів класу 3 оптимальним є запуск із консервативними швидкостями, вужчі допуски температур та тиску, частіший контроль, пріоритет досвідчених операторів; для класу 2 – локальна оптимізація параметрів, що дозволяє знизити scrap на 1–2 в.п.; для класу 1 – підтримка «вікна оптимуму» параметрів (дозволяє утримати scrap нижче 10%).

Для подальшої оптимізації проведено регресійний аналіз та удосконалено модель, ціллю якої є зниження scrap_rate_pct. Результати наведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Підсумок множинної лінійної регресії (MLR)

R2_test: 0.882	RMSE_test: 1.152
MAE_test: 0.93	CV_R2 mean±sd: 0.878 ± 0.006
Стандартизовані бета-коефіцієнти (топ-12 за модулем; знак/значущість)	
shape_complexity_idx: +0.58 (p < 0.001)	speed_x_complex: +0.16 (p < 0.001)
d_billet_temp2: +0.33 (p < 0.001)	elec_quality_events: +0.14 (p < 0.001)
d_speed2: +0.28 (p < 0.001)	d_pressure2: +0.12 (p < 0.001)
d_die_temp2: +0.21 (p < 0.001)	thin_sections=1: +0.11 (p < 0.001)
geometry_class=3 (vs 1): +0.19 (p < 0.001)	operator_experience_years: -0.10 (p < 0.001)
die_age_hours: +0.17 (p < 0.001)	alloy=6082 (vs 6060): +0.09 (p < 0.001)

Джерело: розраховано автором у Google Colab.

За результатами розрахунків видно ключові економічні важелі зниження собівартості: жорсткий контроль ключових параметрів температур, швидкості, тиску та енергостабільності, своєчасний ремонт матриць і розстановка досвідчених операторів зменшують брак, втрати матеріалу, енергії та простої. З метою оцінки мультиколінеарності розраховані індекси VIF для всіх ключових ознак. Вони мають значення в межах 1.00–1.0, що підтверджує відсутність мультиколінеарності, а отже інтерпретацію ефектів можна вважати надійною.

Аналізуючи розподіл брухту за класами геометрії, отримано такі візуалізації розподілу (рис. 1).

З рис. 1 видно, що розподіли монотонно зсуваються праворуч (клас 1 < 2 < 3); медіани \approx 8.9%, 10.6%, 14.4%. У класу 3 ширший IQR і більша дисперсія: складні й порожні профілі дають вищий рівень браку та більшу мінливість, і водночас роблять scrap «дорожчим», а процес менш стабільним.

Отже, геометрична складність алюмінієвих виробів є провідним фактором браку з суттєвим впливом на економічну стабільність виробництва. Для третього класу складності варто застосовувати консервативні налаштування, частіший контроль параметрів і залучати досвідченіших операторів.

Аналізуючи інші технологічні особливості, що впливають на економічні результати виробництва, отримано залежність рівня брухту у виробництві та швидкості руху пуансона (рис. 2), яка має яскраво виражену U-подібну залежність.

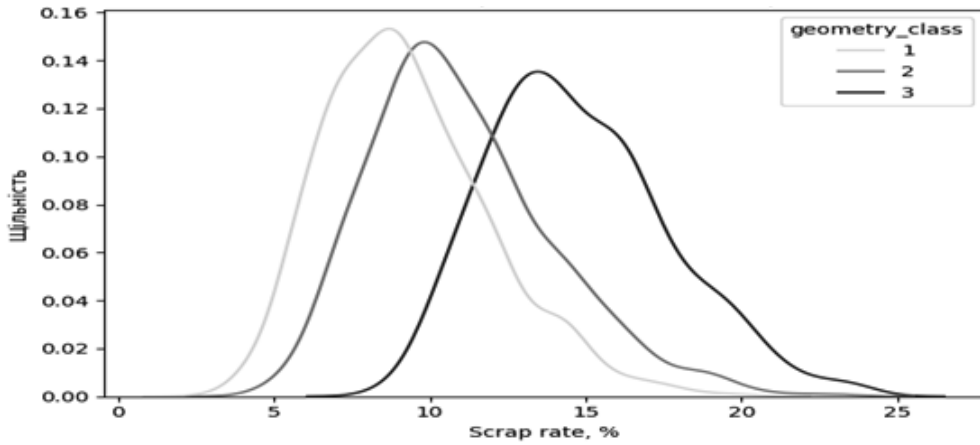


Рис. 1. Розподіл scrap_rate_pct за класами геометрії
Джерело: розраховано автором у Google Colab.

Результати розрахунків, наведені на рис. 2, означають, що мінімальний рівень брухту отримується при швидкості близько 6.2 мм/с. При цьому, і нижчі, і вищі швидкості підвищують брак. За високої складності (помаранчеві точки) рівень scrap вищий по всьому діапазону швидкостей, а приріст при збільшенні швидкості є інтенсивнішим.

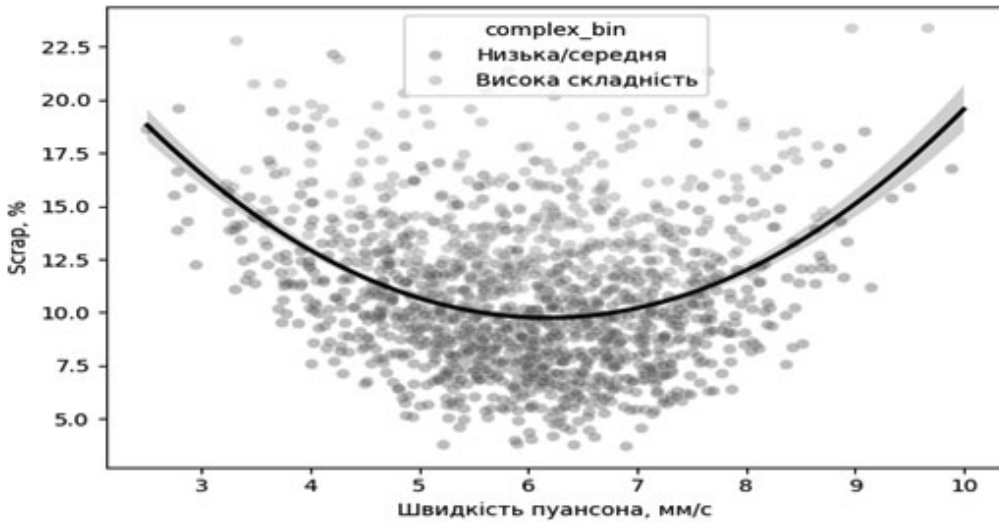


Рис. 2. Часткова залежність scrap від швидкості подачі (ram_speed) із поділом за складністю

Джерело: розраховано автором у Google Colab.

Моделювання технологічних процесів дає змогу встановити також оптимальні з точки зору економічної ефективності співвідношення температури білета та рівня

брухту (рис. 3). Спостерігається чіткий мінімум scrap при температурі близько 465°C. Відхилення нижче ~445°C або вище ~485–490°C призводять до зростання браку.

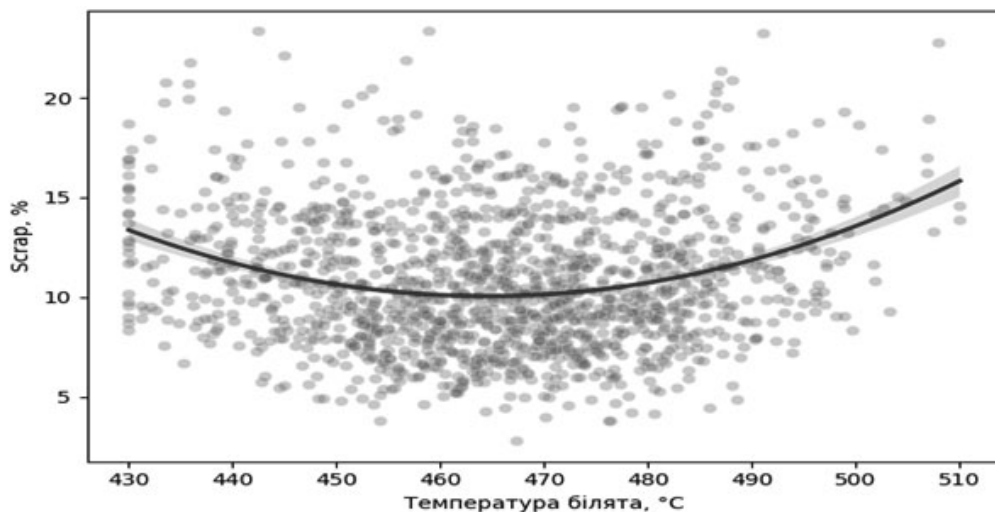


Рис. 3. Часткова залежність від температури білета (квадратичний ефект)

Джерело: розраховано автором у Google Colab.

Права частина розподілу (перегрів) ілюструє особливо швидке підвищення рівня брухту після ~495–500°C. Тому для забезпечення економічної ефективності виробництва (за рахунок зменшення брухту) необхідно утримувати температуру білета у вузькому діапазоні, синхронізувавши її з температурою матриці/контейнера.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Нестабільність енергопостачання, тарифні піки та перебої у 2022–2024 рр. перетворили управління якістю, енергоефективністю та вуглецевим слідом на критичні економічні змінні для МСП в екструзії алюмінію. Запропонований економіко-аналітичний підхід забезпечує відтворювану основу для щоденних виробничих рішень: прогнозування рівня браку, оцінку чутливості до відхилень параметрів і сценарний аналіз «what-if». Побудована модель множинної лінійної регресії може бути основою управління ключовими чинниками зниження браку (дотримання оптимальних діапазонів температур білета, контейнера та матриці, швидкості пуансона, своєчасне обслуговування матриць і стабільність електропостачання) та кількісно пов'язує їх із собівартістю та викидами.

Інтеграція енергоменеджменту ISO 50001, диспетчеризації навантаження в позапікові години та підвищення частки вторинного алюмінію дозволяє вдосконалювати бізнес-модель екструзії алюмінію, та одночасно знижує операційні витрати й вуглецевий слід. Такий підхід узгоджується з Цілями сталого розвитку та має практичний потенціал для алюмінієвої галузі в умовах повосенної відбудови України, зокрема, для локалізації доданої вартості, зменшення імпортозалежності та забезпечення попиту у будівництві, машинобудуванні й транспорті.

Перспективою подальших досліджень є валідація моделі на реальних партійних даних українських МСП, що дозволить уточнити еластичності витрат, підвищити зовнішню валідність управлінських висновків та розширити підхід до повного ланцюга створення вартості в алюмінієвому виробництві.

Список використаних джерел:

1. GHG Protocol. Scope 2 Guidance: An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard. Geneva : WRI/WBCSD, 2015. URL: <https://ghgprotocol.org/> .
2. European Aluminium. Circular Aluminium Action Plan. Brussels : European Aluminium, 2020. URL: <https://european-aluminium.eu/> .
3. U.S. Department of Energy (DOE). Energy and Environmental Profile of the U.S. Aluminum Industry. Washington, DC : DOE, 2003. URL: <https://www.energy.gov/> .
4. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
5. SMS group. Energy efficiency solutions for aluminium extrusion plants : technical brochure. Düsseldorf : SMS group. URL: <https://www.sms-group.com/> .
6. Aluminium Extruders Council (AEC). Technical papers and resources on aluminium extrusion. Arlington Heights, IL : AEC. URL: <https://www.aec.org/> .
7. United Nations. The Sustainable Development Goals: Goals and targets (офіційні сторінки SDGs 1-17, цілі та завдання). New York : United Nations, 2015–2025. URL: <https://sdgs.un.org/goals> .
8. International Aluminium Institute (IAI). Life Cycle Inventory (LCI) of the Global Aluminium Industry: 2022/2023 update. London : IAI, 2023. URL: <https://international-aluminium.org/> .
9. European Aluminium. Environmental Profile Report of the European Aluminium Industry. Brussels : European Aluminium, 2018. URL: <https://european-aluminium.eu/> .
10. Sheppard T. Extrusion of Aluminium Alloys. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1999.
11. Державна служба статистики України. Промислове виробництво : офіційна статистика. Київ : Держстат України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> .
12. Totten G. E., MacKenzie D. S. (eds.). Handbook of Aluminum. Vol. 1 : Physical Metallurgy and Processes. New York : Marcel Dekker, 2003.
13. ASM International. ASM Handbook. Vol. 2 : Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Materials Park, OH : ASM International, 1990.
14. European Committee for Standardization (CEN). EN 573 (серія). Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products. Brussels : CEN. URL: <https://standards.cencenelec.eu/>.

References:

1. GHG Protocol. (2015). *Scope 2 guidance: An amendment to the GHG Protocol corporate standard*. WRI/WBCSD. <https://ghgprotocol.org/>
2. International Aluminium Institute (IAI). (2023). *Life cycle inventory (LCI) of the global aluminium industry: 2022/2023 update*. <https://international-aluminium.org/>
3. European Aluminium. (2018). *Environmental profile report of the European aluminium industry*. <https://european-aluminium.eu/>

4. Sheppard, T. (1999). *Extrusion of aluminium alloys*. Kluwer Academic Publishers.
5. European Aluminium. (2020). *Circular aluminium action plan*. <https://european-aluminium.eu/>
6. U.S. Department of Energy. (2003). *Energy and environmental profile of the U.S. aluminum industry*. <https://www.energy.gov/>
7. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001:2018 energy management systems-Requirements with guidance for use*. ISO.
8. SMS group. (n.d.). *Energy efficiency solutions for aluminium extrusion plants: Technical brochure*. <https://www.sms-group.com/>
9. Aluminium Extruders Council. (n.d.). *Technical papers and resources on aluminium extrusion*. <https://www.aec.org/>
10. United Nations. (2015–2025). *The sustainable development goals: Goals and targets*. <https://sdgs.un.org/goals>
11. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). *Industrial production: Official statistics*. <http://www.ukrstat.gov.ua/>
12. Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum* (Vol. 1: Physical metallurgy and processes). Marcel Dekker.
13. ASM International. (1990). *ASM handbook* (Vol. 2: Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials). ASM International.
14. European Committee for Standardization. (n.d.). *EN 573 (series): Aluminium and aluminium alloys-Chemical composition and form of wrought products*. <https://standards.cencenelec.eu/>

IMPROVEMENT OF THE ALUMINUM EXTRUSION PROCESS CONSIDERING ECONOMIC EFFECTIVENESS AND ESG-SUSTAINABILITY OF PRODUCTION

Viktor Tryhuba

*National University of Water and Environmental Engineering,
11 Soborna St., Rivne, 33000*

e-mail: v.y.tryhuba@nuwm.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2568-976X>

Abstract. The study aims to identify optimal solutions for improving the aluminum extrusion process for small and medium-sized enterprises (SMEs) that balance economic efficiency with minimizing environmental impact under conditions of energy volatility.

The study applies an economic-analytical approach combining open industry benchmarks from the International Aluminium Institute (IAI) and European Aluminium (EAA), calibrated to Ukrainian and international market conditions. A synthetic dataset of 2,500 production batches was used, incorporating core technological parameters (billet, container, and die temperatures; ram speed; pressure; die wear; profile geometry), the share of secondary aluminum, and power supply quality indicators. The baseline interpretable model was constructed as a multiple linear regression with quadratic terms and interaction effects. Model diagnostics included variance inflation factor (VIF) analysis, the Breusch-Pagan test, 5-fold cross-validation, and comparison with Ridge/LASSO methods. Metrics for specific electricity consumption, Scope 2 emissions, and regional carbon intensity were integrated, and a quadratic optimization problem for controllable parameters with soft energy penalties was formulated.

The scrap rate prediction model achieved $R^2 \approx 0.88$ and $RMSE \approx 1.15$ p.p., sufficient for operational monitoring and scenario analysis. Profile geometric complexity was identified as the primary driver of scrap rate: the median scrap rate for simple solid profiles is 8.9%, rising to 14.4% for complex hollow profiles,

directly affecting unit costs. A U-shaped relationship between scrap rate and billet temperature (optimum $\sim 465 \pm 10 - 12^\circ\text{C}$) and ram speed (optimum ~ 6.2 mm/s) was established. Die wear and energy disturbances were shown to have a significant adverse effect on quality indicators. Controlling process deviations, condition-based die maintenance, increasing the share of secondary aluminum, implementing ISO 50001 energy management, and shifting loads to off-peak hours were demonstrated to jointly reduce scrap rates, specific energy consumption, and CO₂ emissions, with a positive effect on unit costs and margin.

The proposed approach provides a reproducible economic-technological foundation for an extrusion business model that balances financial performance and environmental objectives. The integration of quality management, energy efficiency, raw material circularity, and flexible production planning aligns with UN Sustainable Development Goals 7, 8, 9, 11, 12, and 13, and demonstrates practical potential for SMEs in the aluminum industry in the context of Ukraine's post-war reconstruction. Limitations associated with the use of synthetic data are offset by the reproducibility of the methodology and a plan for validation on real production batch series.

Keywords: aluminum extrusion, efficiency, quality management, ISO 50001 energy management, sustainable development, ESG.

Стаття: надійшла до редакції 20.10.2025

прийнята до друку 23.12.2025

опублікована (оприлюднена) 09.01.2026