

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.11

УДК 621.778

Я.В. Фролов, О.С. Бобух, В.В. Бояркін, Д.В. Коноводов, О.М. Кузьміна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПРОКАТКА-З'ЄДНАННЯ КІРІГАМІ-КОМПОЗИТИВ

Анотація. В роботі досліджено застосування техніки кірігами в інженерії для створення багатошарових композиційних матеріалів з прогнаними механічними властивостями. Основною метою є розробка та перевірка адекватності математичної моделі процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованої сталеву просічно-витяжною сіткою. Модель побудована в середовищі QForm UK з використанням методу скінчених елементів та врахуванням відповідних реологічних характеристик матеріалів і граничних умов. Експериментальні дослідження прокатки-з'єднання проводились на лабораторних станах типу дуо та кварто при температурах до 500 °C та різних ступенях деформації (20–50 %). Результати чисельного моделювання узгоджуються з експериментальними даними щодо зміни геометрії сітки та розподілу деформацій. Встановлено, що навіть при незначному ступені деформації (20 %) можливе формування ефективного з'єднання з проявом “*zircon-bonding*” ефекту, однак таке з'єднання є нестабільним. Тому в процесі прокатки-з'єднання доцільно застосовувати величину ступеня деформації, що перевищує 30 %. Результати дослідження можуть бути використані для подальшої розробки технологій виготовлення функціональних кірігами-структур на основі металевих композицій.

Ключові слова: прокатка-з'єднання, просічно-розтяжна сталеву сітка, алюмінієва матриця, моделювання на основі методу скінчених елементів

Вступ.

Кірігами – це традиційний японський вид мистецтва, який полягає у вирізанні та складанні паперу для створення складних і красивих виробів. В інженерії кірігами використовується для створення інноваційних конструкцій та матеріалів з унікальними механічними, морфологічними та функціональними властивостями [1]. Техніка включає в себе розкрій

© Фролов Я.В., Бобух О.С., Бояркін В.В., Коноводов Д.В., Кузьміна О.М.

та згинання матеріалів з контрольованою деформацією, яка може призвести до отримання необхідних механічних властивостей, а також до бажаної взаємодії з різними хвилями та полями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Застосування таких структур для проектування шаруватих композиційних матеріалів, які можуть бути виготовлені за допомогою прокатки-з'єднання, може усунути ризик надмірної деформації та руйнування одного з шарів. У цьому випадку форма кірігамі, наприклад розширена сталева сітка, що використовується як компонент шаруватого композиту, забезпечує контрольовані проміжки між зонами деформації [2] під час подальшого з'єднання. За схемою розкрою тонкий лист можна розділити на дві зони: зону з великим ступенем деформації та зону з малим ступенем деформації. Кінематичні властивості отриманої структури можуть бути запрограмовані вибором схеми розкрою [1]. Таким чином, техніка кірігамі відкриває шлях до програмованої зміни форми під впливом заданого навантаження [3, 4], набуття нових механічних властивостей, аж до ауксетичної поведінки [5]. Наразі найпопулярнішим ефектом, що досягається за допомогою техніки кірігамі, є суперпружність. Це здатність до тривалої пружної деформації з поверненням до початкової форми після зняття навантаження. Зазвичай наделастичність забезпечують еластомірні компоненти. Більшість металевих матеріалів, зокрема композити, не піддаються значному розтягуванню, що може надати очевидні переваги готовим продуктам або пристроям. Наприклад, традиційні батареї є жорсткими, проте додавання їм еластичності може надати нові можливості в робототехніці [6] та носимих електронних пристроях [7]. Застосування техніки кірігамі для збільшення ефекту пам'яті форми сплаву Ni-Ti було описано в роботі [8]. Автори роботи [9] повідомили про новий клас електромеханічних метаматеріалів, створення яких було надихано трансформованими візерунками кірігамі, що були розроблені для застосування в електромагнітних пристроях. Використання кірігамі-структури – простий у реалізації підхід до надання еластичності, що виходить за межі можливості металевих матеріалів, з яких вони складаються, з можливістю масштабування.

Існує багато успішних реалізацій таких структур на основі жорстких складових матеріалів, таких як графен [10], композитні плівки SiN [11], металеве скло [12] тощо.

Для дослідження процесів прокатки часто використовують математичне моделювання з використанням методу скінчених елементів. Сучасний розвиток програмних продуктів для математичного моделювання пластичної деформації, зокрема QForm UK [13], дозволяє створювати моделі складних процесів пластичної деформації. Вказаний продукт відрізняється швидкістю розрахунків, зручним інтерфейсом і широко використовується саме для моделювання процесів пластичної деформації композитів. Дослідження, проведені авторами роботи [14], вказують на можливість моделювання деформування композиту мідь–сталь–мідь. Побудована авторами роботи математична модель витяжки показала якісні результати щодо розподілу товщини слоїв та розподілу напружень відповідно до проведених експериментальних досліджень. В дослідженні [15] було проведено моделювання холодного осадження гібридних алюмінієвих заготовок з метою аналізу меж формоутворення. Модель дозволила точно оцінити розподіл напружень та потенційні зони розшарування. Результати чисельного аналізу також якісно узгоджувались з експериментальними спостереженнями. В роботі [16] представлено моделювання процесу багатоступеневого диференційного згинання композитних фотогальванічних модулів. Автори проаналізували зони деформації та розподіл напружень, що дозволило оптимізувати параметри процесу для збереження сонячних елементів під час вилучення скла.

Авторами в попередніх роботах використано математичне моделювання процесу прокатки композитних матеріалів з метою аналізу деформаційних процесів і впливу параметрів прокатки на з'єднання алюмінієвих шарів зі звичайною сталеву сіткою [17], також створена модель процесу прокатки тришарової штаби, яка дозволила дослідити вплив температури та ступеня деформації на формозміну та енергосилові параметри процесу [18].

Мета дослідження.

Метою роботи є створення математичної моделі процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевую просічно-витяжною сіткою на основі методу скінчених елементів та перевірка її адекватності для подальшого створення технології отримання багатошарових кірігамі-структур.

Основні матеріали дослідження.

В програмному середовищі QForm UK була створена тривимірна модель процесу поздовжньої прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевую просічно-витяжною сіткою між алюмінієвими штабами. Товщина алюмінієвої штаби – 3 мм, сталева просічно-витяжна сітчаста вставка з розміром вічка ґратки 2×4 мм. Діаметр прокатних валків зі сталі 40X – 180 мм. Реологічні характеристики сплаву EN AW 6082 матриці, сталі C10 (1.0301 за EN 10277-2) та матеріалу валків бралися з бази QForm UK.

Використання програмного продукту QForm UK [13] відбувається в рамках угоди про між Micas Simulations Limited (м. Оксфорд, Велика Британія) та кафедрою обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова (Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро) – Угода № 1005/23-1 від 10.05.2023 р.

Для моделювання було використано наступні граничні умови:

- фактор тертя на контактних поверхнях «валки-композит» визначається моделлю Леванова та дорівнює 0,8;
- коефіцієнт теплопередачі від металу до валків: 100000 Вт/м³·К
- швидкість обертання валків: 30 об/хв.
- температура валків: 20 °С;
- початкова температура композиту перед прокаткою: 500 °С;
- температура навколишнього середовища: 20 °С.

Геометрична модель просічно-витяжної сітки, яка для скорочення часу розрахунків складалася з послідовності елементів сітки шириною одне вічко, наведена на рисунку 1.

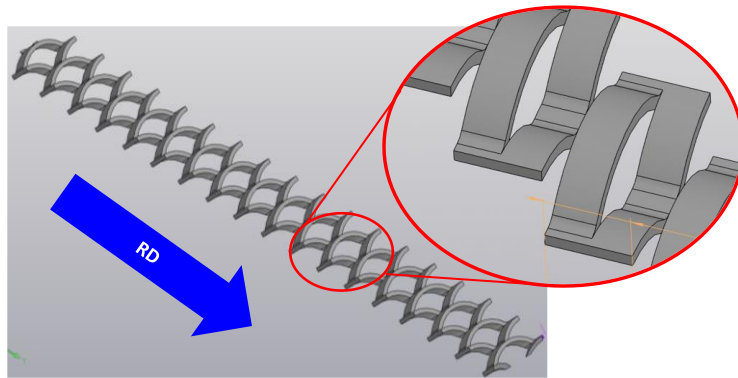


Рисунок 1 – Модель просічно-витяжної сітки (RD – напрямок прокатки)

Під час моделювання було застосовано додаткові інструменти – віртуальні штовхачі, які синхронно задавали всі три шари заготовки в зону деформації. Під час реального процесу прокатки всі шари заготовки також заходять в валки одночасно. Це забезпечується попереднім скріпленням шарів заготовки за допомогою заклепок. Загальний вигляд композиту перед прокаткою наведено на рисунку 2.

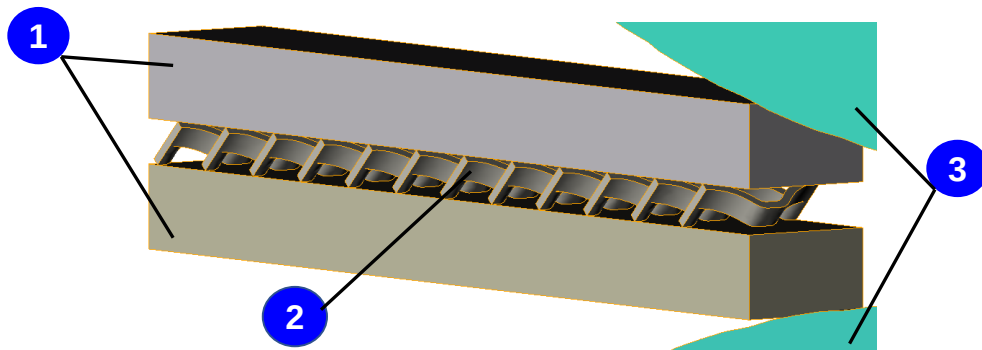


Рисунок 2 – Візуалізація композиту перед моделюванням прокатки-з'єднання
1 – алюмінієва матриця; 2 – просічно-витяжна сітка; 3 – прокатні валки.

Загальний вигляд трансформації сітки в зоні деформації після проведення моделювання наведено на рисунку 3. Видно, що на вході в зону деформації відбувається закриття (скорочення довжини) вічок сітки у напрямку дії нормальної сили прокатки (вісь Z) з їх подальшим витягуванням у напрямку прокатки (Y). Якщо припустити, що при стисканні просічно-витяжної сітки між двома бойками з мінімальним тертям, вона майже повністю закритється, то можна зробити висновок, що скорочення довжини вічка є маркером

вертикальної компоненти сили, що діє на сітку всередині композиту. Це твердження є справедливим за умови відсутності заднього підпору.

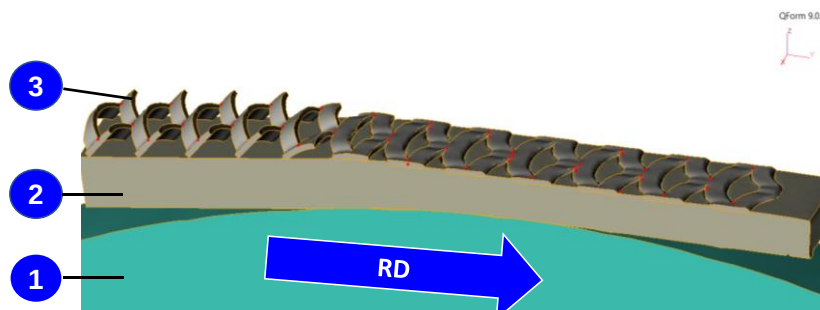


Рисунок 3 – Візуалізація зміни форми нижньої матриці та просічно-витяжної сітки під час прокатки при температурі 500°C (верхні матриця та валок на рисунку відсутні)
1 – валок; 2 – алюмінієва матриця; 3 – просічно-витяжна сітка.

Проекція просічно-витяжної сітки в зоні деформації при прокатці на площину XY (рисунок 3) показує, що довжина вічка у цій проекції спочатку зменшується, а потім збільшується.

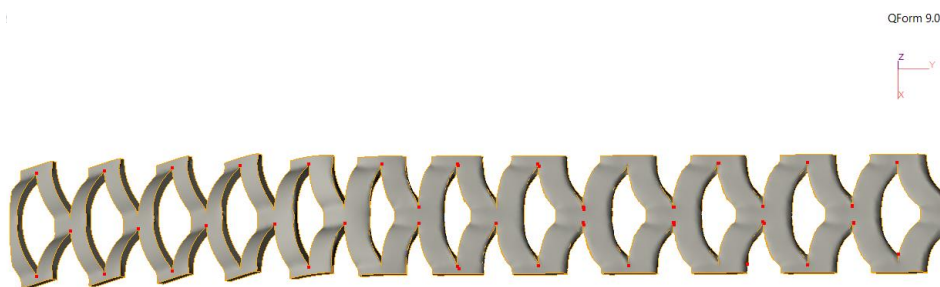


Рисунок 4 – Візуалізація проекції просічно-витяжної сітки під час прокатки при температурі 500°C

Для перевірки адекватності розробленої моделі була проведена серія експериментальних прокаток. Експериментальні прокатки-з'єднання армованих композитів проводились на двох прокатних станах лабораторії кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова: стан дуо з діаметром валків 180 мм і стан кварто з діаметром робочих валків 135 мм. Швидкість обертання валків складала 30 об/хв. Перед прокаткою композити підігрівали в камерній електричній печі опору з цифровим регулюванням температури до температури 500 °C. Потужність печі – 15 кВт. Для точного

відстеження нагрівання композиту до 500° С у печі був розміщений «зразок-свідок» з термопарою всередині. Піч виходила на режим в 500 °С, приблизно за 3 години, композит в печі нагрівався до заданої температури за 20...25 хв.

Під час прокатки за допомогою ноутбука записувались температура і сила прокатки. Температура фіксувалася за допомогою термопари, яка знаходилася в середині зразка. Сила прокатки записувалася по даним месдозі, розташованій під опорним гвинтом верхнього валка.

Для запобігання втраті температури композиту в момент задавання в валки вхідний стіл стану був теплоізолюваний, а для того, щоб зразок не зміщався під час прокатки, застосовували направляючі рейки.

Для прокатки-з'єднання були приготовлені композити, які складалися з трьох шарів: алюмінієва матриця: гарячепресована штаба розмірами ($h \times b \times l$) 3×70×200 мм зі сплаву EN AW 6082. В якості вкладеного матеріалу використовувалась просічно-витяжна сітчаста вставка розміром ($t \times b \times l$) 0,5×70×200 мм зі сталі C10 (1.0301 за EN 10277-2) з розміром вічка ґратки 2×4 мм. Перед прокаткою композити скріплювали алюмінієвими заклепками (рисунок 4) на відстані 10 мм від кутів. Перед прокаткою сітку піддавали рекристалізаційному відпалу при температурі 720 °С. Будь-якої спеціальної підготовки поверхонь матриці і сітки не проводилося. Груба окалина з поверхні сітки видалялася механічно.



Рисунок 5 – Загальний вигляд композиту перед прокаткою

Прокатку проводили з номінальними ступенями висотної деформації 20, 30 і 40 %. На стані кварто також прокатували армовані композити зі ступенем деформації 50 %. Ступені деформації розраховувалися відносно алюмінієвої матриці без врахування товщини армуючої фази. Тобто початкова товщина композиту для всіх випадків складала 6 мм. Окрім армованих композитів прокатували також й композити без армування з такими точно ступенями деформації.

Зображення прокатаного зі ступенем деформації 40% зразка наведено на рисунку 5, маркером позначені місця замірів товщини та ширини.



Рисунок 6 – Загальний вигляд композиту після прокатки

Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 1. Наведено значення номінальної товщини, що відповідає вказаному ступеню деформації ($h_{1н}$), фактичної товщини композиту (h_1), фактичної ширини композиту (b_1) та довжини композиту після прокатки (l_1). Маркування типу композиту в таблиці, наприклад 1 – К - 20 означає: 1 – номер прокатки; К – стан кварто (Д – стан дуо); 20 – номінальний ступень деформації. Кожне зі значень, наведених в таблиці 1 отримане як середнє арифметичне наступної кількості замірів: товщина – 6; ширина – 3; довжина – 3.

Таблиця 1

Результати замірів розмірів композитів, отриманих прокаткою-з'єднанням

Тип композиту	h _{1н} мм	h ₁ мм	b ₁ мм	l ₁ мм
Стан кварто				
1– К - 20	4,8	5,03	70,8	250
2– К - 20	4,8	4,92	71,0	255
3– К - 20 без сітки	4,8	4,84	70,81	Сильний вигін
4– К - 20	4,8	4,89	71,2	Сильний вигін
5– К - 20	4,8	4,955	70,83	230
7– К - 20	4,8	4,93	70,76	235
8– К - 30	4,2	4,315	71,17	283
9– К - 30	4,2	4,34	71,074	285
10– К - 30	4,2	4,325	71,16	275
11– К - 30	4,2	4,31	72,01	287
12– К - 40	3,6	3,68	71,63	330
13– К - 40	3,6	3,8	71,6	325
14– К - 50	3	3,36	72,01	367
15– К - 50	3	3,295	72,43	360
Стан дуо				
1– Д - 20	4,8	4,77	71,88	240
2– Д - 20	4,8	4,65	71,45	275
3– Д - 20	4,8	4,82	71,40	260
4– Д - 30	4,2	4,60	71,40	275
5– Д - 30	4,2	4,44	71,52	280
6– Д - 30 без сітки	4,2	4,48	71,02	255
7– Д - 40	3,6	4,11	72,71	300
8– Д - 40	3,6	3,90	71,86	315
9– Д - 40 без сітки	3,6	3,82	72,45	300
10– Д - 20	4,8	4,46	71,55	276
11– Д - 20 без сітки	4,8	4,40	71,60	260

* – середнє значення сили прокатки по довжині зразка.

Розшарування композитів одразу після прокатки не спостерігалось, що свідчить про прояву “zipbonding” ефекту навіть при 20 % деформації. Однак

цей ефект у випадку армування просічно-витяжною сіткою виражений менш явно, ніж при армування дротяною сіткою. Слід зазначити, що з'єднання композитів, прокатаних при 20 % деформації показало себе як нестабільне. Композити розшаровувалися під час вирізання зразків, або навіть мінімального гнуття. При чому слід зазначити, що один шар матриці мав більш сильне зчеплення з армуючою сіткою, ніж інший. На рисунку 5 наведено фото зразка, який розшарувався під час вирізання зразків для подальших випробувань.

Наявність слідів окалини на поверхні контакту двох шарів матриці свідчить про те, що окалина, яка відірвалася від сітки під час її вирівнювання вздовж вісі прокатки на початку процесу послаблює взаємодію двох шарів матриці між собою, а також зменшує прояву “zip-bonding” ефекту.

Порівняння результатів моделювання і експериментальної прокатки-з'єднання армованих композитів проводилось для перевірки адекватності моделі. Порівняння відбувалося за параметрами зміни геометричних розмірів елементів сітки після прокатки. На рисунку 6, як приклад, наведено фото розшарованого композиту після прокатки-з'єднання (збільшення з рисунку 5), на яке накладено зображення двох вічок сітки, отриманих в результаті моделювання (рисунок 3).

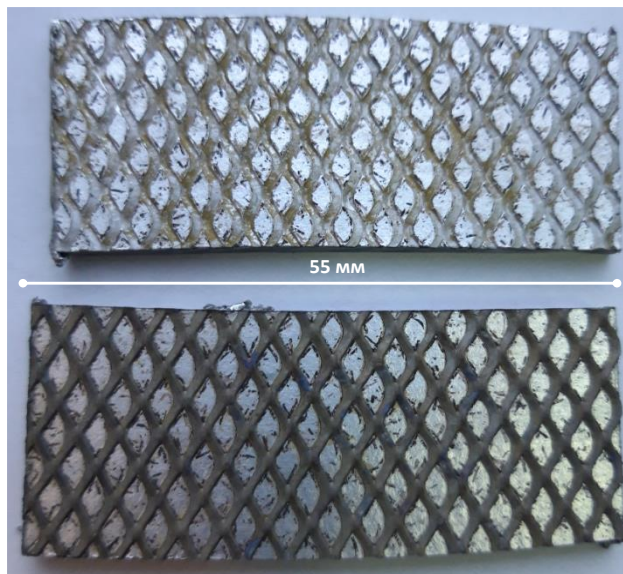


Рисунок 6 – Розшарований зразок після прокатки-з'єднання зі ступенем деформації 20 % при температурі 500 °C

Також на цьому рисунку наведено нумерацію геометричних параметрів сітки, за якими здійснювалося порівняння результатів моделювання і експериментальної прокатки-з'єднання.

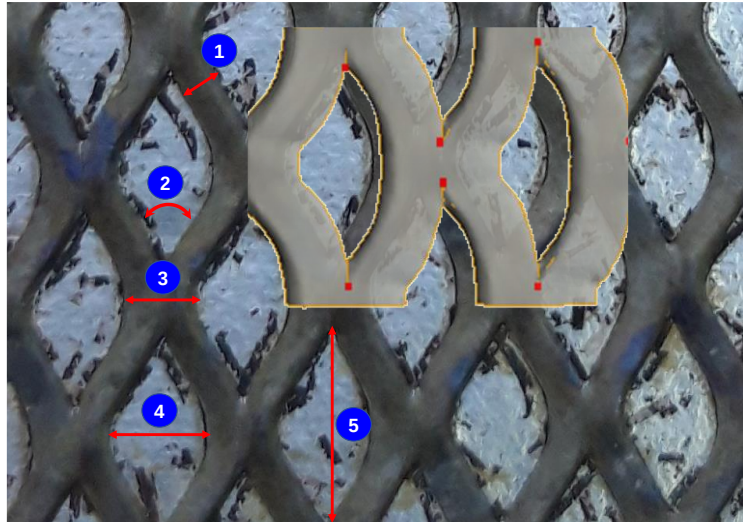


Рисунок 7 – Розширений композит з накладеним зображенням сітки, отриманим в результаті моделювання. 1 – товщина нитки; 2 – величина кута сітки; 3 – довжина перехрестя; 4 – довжина вічка; 5 – ширина вічка

Кількісні результати порівняння геометричних параметрів сітки до і після прокатки між двома алюмінієвими матрицями наведені у таблиці 2.

Отримані результати показують, що у цілому скінчено-елементна модель процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевую просічно-витяжною сіткою, адекватно відтворює реальний процес. Відхилення, які візуально помітні на рисунку, та мають кількісні значення, наведені у таблиці, показують, що для подальшого моделювання потрібно готувати вихідну геометрію у відповідності до реальної геометрії сітки.

Таблиця 2

Розміри сітки після експериментальної прокатки-з'єднання та моделювання

Номер параметру (рисунок 6)	До прокатки		Після прокатки		Відносна зміна параметру під час прокатки, %	
	Експеримент	Моделювання	Експеримент	Моделювання	Експеримент	Моделювання
1, мм	0,75	1	0,8	1,2	6,67	20,00
2, град	56	57	67	65	19,64	14,04
3, мм	1,4	2	1,45	2,1	3,57	5,00
4, мм	1,5	1,3	2	1,68	33,33	29,29
5, мм	4	4	4	4	0,00	0,00

Процес формозміни, який відбувся у сітці, якісно промодельовано вірно, а саме:

– Товщина нитки. Зміни площі поперечного перерізу нитки за такої степені деформації зазвичай взагалі не відбувається. Зміна, яка зафіксована як при експерименті, так і при моделюванні вочевидь пов'язана з округленням форми поперечного перерізу нитки.

– Величина кута сітки. Кут сітки під час прокатки збільшується за даними попередніх досліджень таким чином: в інтервалі 20...30 % деформації кут зростає на один градус за кожний відсоток деформації, в інтервалі 30...40 % - кожний відсоток деформації дає ~ 1,5 градуса, а в інтервалі 40...50 % ~ 0,5 градуса зміни кута сітки. Щоправда це для аустенітної нержавіючої сталі. У цьому дослідженні 20 % деформації призвело до збільшення кута сітки на у середньому на 10 градусів. Це в два рази менше за відомі дані. Причина такої зміни можливо у тому, що феритна сталь, для якої проводилися експерименти є менш пластичною за умов експерименту.

– Довжина перехрестя. Зміна довжини перехрестя є незначною (3,57 та 5 %). Це показали і експерименти і моделювання. Це пов'язане з округленням форми перехрестя в умовах високого гідростатичного тиску в зоні деформації.

– Ширина вічка сітки, як за результатами експериментальної прокатки, так і результатами моделювання не змінилася.

– Зміна довжини вічка сітки дорівнює 1,33 (1,3 при моделюванні). Це корелюється зі зміною кута сітки. Менший кут сітки дає меншу діагональ. З огляду на майже повне співпадіння результатів та моделювання за цим параметром, можна зробити висновок, що зміна довжини вічка сітки під час прокатки залежить не тільки від параметрів деформації, а також і від властивостей матеріалу при температурі обробки.

Наведені вище результати порівнянь у цілому відповідають даним, отриманим під час попередніх досліджень [17].

Висновки

Створено математичну модель процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевією просічно-витяжною сіткою. Якісну адекватність моделі підтверджено експериментальними прокатками. Модель може бути використана для подальших досліджень трансформації кірігамі-структури, розробки моделей багатошарових кірігамі-структур та розробки технології прокатки-з'єднання композитів.

Фінансова підтримка. Дослідження виконуються в рамках проєкту «Розробка технології застосування кірігамі-структур у деформаційно-термічній обробці штаб з композитного матеріалу», який фінансується Національним фондом досліджень України за кошти державного бюджету (реєстраційний номер 2023.04/0156).

ЛІТЕРАТУРА

1. Engineering by Cuts: How Kirigami Principle Enables Unique Mechanical Properties and Functionalities / J. Tao et al. Advanced Science. 2022. P. 2204733. URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202204733> (date of access: 14.01.2025).
2. Transformation of the kirigami-type deformable inlay during roll bonding / Y. Frolov et al. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2025. No. 1. P. 34–39. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/034> (date of access: 14.01.2025).
3. Kirigami-Inspired Inflatables with Programmable Shapes / L. Jin et al. Advanced Materials. 2020. Vol. 32, no. 33. P. 2001863. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202001863> (date of access: 14.01.2025).

4. Hwang D.-G., Bartlett M. D. Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami Structures. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21479-7> (date of access: 14.01.2025).
5. Neville R. M., Scarpa F., Pirrera A. Shape morphing Kirigami mechanical metamaterials. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep31067> (date of access: 14.01.2025).
6. Murali Babu S. P., Parvaresh A., Rafsanjani A. Tailoring materials into kirigami robots. *Device*. 2024. Vol. 2, no. 9. P. 100469. URL: <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100469> (date of access: 23.01.2025).
7. Recent Progress in Stretchable Batteries for Wearable Electronics / W. Song et al. *Batteries & Supercaps*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 181–199. URL: <https://doi.org/10.1002/batt.201800140> (date of access: 23.01.2025).
8. Soft composite hinge actuator and application to compliant robotic gripper / W. Wang et al. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 397–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.030> (date of access: 23.01.2025).
9. A new class of transformable kirigami metamaterials for reconfigurable electromagnetic systems / Y. Yang et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27291-8> (date of access: 11.02.2025).
10. Large deformation behavior and mechanism of graphene kirigami under shear and combined shear-tension loads / P. Shi et al. *Computational Materials Science*. 2025. Vol. 251. P. 113746. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.113746> (date of access: 11.02.2025).
11. Tsutsui T., Taguchi Y., Hashimoto M. Quadrant kirigami-type electrothermal MEMS actuator with multi-degree-of-freedom morphing capability. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ada164> (date of access: 11.02.2025).
12. Architected hierarchical kirigami metallic glass with programmable stretchability / D. X. Han et al. *AIP Advances*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 035305. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0084906> (date of access: 11.02.2025).
13. QForm UK. Version 10.2.4. Oxford, UK: Micas Simulations Limited. URL: <https://www.qform3d.com>.
14. Analysis of the deep drawing process of three-layered explosive welded composite / K. Marcin et al. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.029> (date of access: 14.02.2025).
15. Analysis of Forming Limits During Cold Forging of Aluminum Hybrid Billets / K. C. Grötzinger et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2024. P. 371–382. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-58006-2_29 (date of access: 14.02.2025).
16. Simulation modeling of the multistage differential bending process of photovoltaic module composite materials / V. Kamburov et al. 13TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE TECHSYS 2024 – ENGINEERING, TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, Plovdiv, Bulgaria. 2025. P. 070005. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0260188> (date of access: 14.04.2025).
17. Deformation of expanded steel mesh inlay inside aluminum matrix during the roll bonding / Y. Frolov et al. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 58. P. 857–867. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.049> (date of access: 14.02.2025).
18. Коноводов Д. В., Сиваш В. І. Моделювання процесу гарячої прокатки тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію. *Обробка матеріалів тиском*. 2020. № 1(50). С. 259–265. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1\(50\)259](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)259) (дата звернення: 14.02.2025).

REFERENCES

1. Engineering by Cuts: How Kirigami Principle Enables Unique Mechanical Properties and Functionalities / J. Tao et al. *Advanced Science*. 2022. P. 2204733. URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202204733> (date of access: 14.01.2025).
2. Transformation of the kirigami-type deformable inlay during roll bonding / Y. Frolov et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 1. P. 34–39. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/034> (date of access: 14.01.2025).
3. Kirigami-Inspired Inflatables with Programmable Shapes / L. Jin et al. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32, no. 33. P. 2001863. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202001863> (date of access: 14.01.2025).
4. Hwang D.-G., Bartlett M. D. Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami Structures. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21479-7> (date of access: 14.01.2025).
5. Neville R. M., Scarpa F., Pirrera A. Shape morphing Kirigami mechanical metamaterials. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep31067> (date of access: 14.01.2025).
6. Murali Babu S. P., Parvaresh A., Rafsanjani A. Tailoring materials into kirigami robots. *Device*. 2024. Vol. 2, no. 9. P. 100469. URL: <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100469> (date of access: 23.01.2025).
7. Recent Progress in Stretchable Batteries for Wearable Electronics / W. Song et al. *Batteries & Supercaps*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 181–199. URL: <https://doi.org/10.1002/batt.201800140> (date of access: 23.01.2025).
8. Soft composite hinge actuator and application to compliant robotic gripper / W. Wang et al. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 397–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.030> (date of access: 23.01.2025).
9. A new class of transformable kirigami metamaterials for reconfigurable electromagnetic systems / Y. Yang et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27291-8> (date of access: 11.02.2025).
10. Large deformation behavior and mechanism of graphene kirigami under shear and combined shear-tension loads / P. Shi et al. *Computational Materials Science*. 2025. Vol. 251. P. 113746. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.113746> (date of access: 11.02.2025).
11. Tsutsui T., Taguchi Y., Hashimoto M. Quadrant kirigami-type electrothermal MEMS actuator with multi-degree-of-freedom morphing capability. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ada164> (date of access: 11.02.2025).
12. Architected hierarchical kirigami metallic glass with programmable stretchability / D. X. Han et al. *AIP Advances*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 035305. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0084906> (date of access: 11.02.2025).
13. QForm UK. Version 10.2.4. Oxford, UK: Micas Simulations Limited. URL: <https://www.qform3d.com>.
14. Analysis of the deep drawing process of three-layered explosive welded composite / K. Marcin et al. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.029> (date of access: 14.02.2025).
15. Analysis of Forming Limits During Cold Forging of Aluminum Hybrid Billets / K. C. Grötzinger et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2024. P. 371–382. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-58006-2_29 (date of access: 14.02.2025).

16. Simulation modeling of the multistage differential bending process of photovoltaic module composite materials / V. Kamburov et al. 13TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE TECHSYS 2024 – ENGINEERING, TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, Plovdiv, Bulgaria. 2025. P. 070005. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0260188> (date of access: 14.04.2025).
17. Deformation of expanded steel mesh inlay inside aluminum matrix during the roll bonding / Y. Frolov et al. Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 58. P. 857–867. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.049> (date of access: 14.02.2025).
18. Konovodov D. V., Syvash V. I. Modelyuvannya protsesu haryachoyi prokatky trysharovykh shtab zi splaviv alyuminiyu ta mahniyu. Obrobka materialiv tyskom. 2020. № 1(50). S. 259–265. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1\(50\)259](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)259) (data zvernennya: 14.02.2025).

Received 15.04.2025.

Accepted 18.05.2025.

UDC 621.778

Yaroslav Frolov, Oleksandr Bobukh, Viacheslav Boiarkin,
Dmytro Konovodov, Olga Kuzmina

FEM SIMULATION AND EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR ROLL BONDING OF KIRIGAMI-TYPE COMPOSITES

Abstract. *The study investigates the application of kirigami techniques in engineering to produce multilayer composite materials with programmable mechanical properties. The primary objective is to develop and validate a mathematical model for the roll-bonding process of an aluminum matrix reinforced with a steel expanded metal mesh. The model has been developed in the QForm UK environment using the finite element method, taking into account the relevant rheological properties of the materials and boundary conditions. Experimental roll-bonding studies were carried out on laboratory duo and quarto rolling mills at temperatures up to 500 °C and various degrees of deformation (20–50 %). The results of the numerical simulations are in agreement with the experimental data regarding changes in mesh geometry and strain distribution. It was found that even at a small degree of deformation (20 %), it is possible to form an effective bond with a “zip-bonding” effect; but that such a bond is unstable. It is therefore advisable to apply a degree of deformation greater than 30% in the roll-bonding process. The results of the study can be used for the further development of manufacturing technologies for functional kirigami structures based on metal composites.*

Keywords: roll bonding, expanded steel mesh, aluminum matrix, FEM simulation.

Фролов Ярослав Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут,

Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: ya.v.frolov@ust.edu.ua.

Бобух Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, завідувач кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0001-7254-3854. E-mail: o.s.bobukh@ust.edu.ua.

Бояркін Вячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Коноводов Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0001-8282-4991. E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua.

Кузьміна Ольга Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-0794-0583. E-mail: o.m.kuzmina@ust.edu.ua.

Frolov Yaroslav, doctor of technical science, professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: ya.v.frolov@ust.edu.ua.

Bobukh Oleksandr, candidate of technical science, Head of Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: o.s.bobukh@ust.edu.ua.

Boiarkin Viacheslav, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Konovodov Dmytro, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0001-8282-4991. E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua.

Kuzmina Olga, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0003-0794-0583. E-mail: o.m.kuzmina@ust.edu.ua.