

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Макеєва Ганна Сергіївна

УДК 621.77

РОЗРОБКА ОСНОВ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОКАТКИ АЛЮМІНІЄВИХ ШТАБ  
З АРМУВАННЯМ СТАЛЕВОЮ СІТКОЮ  
ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ ВИРОБІВ З ПРОГНОЗОВАНИМИ  
МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Спеціальність 05.03.05

«Процеси та машини обробки тиском»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національній металургійній академії України Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор **Фролов Ярослав Вікторович**, завідувач кафедри обробки металів тиском Національної металургійної академії України, м. Дніпро.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Приходько Ігор Юрійович**, завідувач відділу процесів та машин обробки металів тиском Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро;
- кандидат технічних наук **Присяжний Андрій Григорович**, доцент кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь.

Захист відбудеться «27» грудня 2018 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.084.02 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «24» листопада 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д08.084.02,  
д.т.н., професор

Т.М.Миронова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з ефективних напрямків вдосконалення конструкційних матеріалів для реалізації інноваційних проектів в інженерії є розробка композиційних матеріалів, які характеризуються підвищеною здатністю до поглинання енергії удару та зменшенням питомої маси у порівнянні з масою найбільш міцного компонента. Існують роботи, присвячені дослідженню виготовлення алюмінієвих композитів з використанням сталевих дротів. Недоліком такого матеріалу є нерівномірність механічних властивостей по ширині та довжині композиту, що зумовлено розташуванням дротів вздовж напрямку прокатки.

Альтернативним способом виготовлення композитів зі здатністю до поглинання енергії удару є сумісна прокатка двох алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою. Армований сталеву сіткою алюмінієвий композит можна використовувати в машинобудуванні та будівництві, зокрема, для виробництва ролетів, дверей, вікон, підбою бойових відсіків броньованих машин тощо.

Розвитку технологій виробництва композитів, що отримуються прокаткою, із застосуванням сітки в якості армуючої складової в композитах, наразі перешкоджає брак відомостей про параметри деформації як сітки в цілому, так і дротів, з яких вона складається. Окрім цього майже не вивчено вплив ступеня деформації при прокатці композиту на його механічні властивості, зокрема здатність до поглинання енергії удару. Додаткові складнощі викликають питання щодо порівняння енергії удару при випробуваннях зразків, прокатаних при різних ступенях деформації, оскільки вони мають різну товщину. Відомий метод випробувань потребує пристосування до умов експерименту. На сьогодні також залишилися недослідженими питання щодо: моделювання процесу прокатки армованих алюмінієвих штаб в скінченно-елементному середовищі QForm для перевірки адекватності моделі прокатки армованих композитів та розширення можливостей розрахунку параметрів процесу; впливу орієнтації сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки та властивості композиту; досягнення розрахункових меж міцності та плинності композиту та особливостей механізму руйнування композиту під час випробувань на розтягування; анізотропії армованого композиту; впливу термічної обробки після процесів деформації на механічні властивості композиту та ін. Всі вказані недоліки перешкоджають розробці раціональної технології прокатки алюмінієвих штаб, що армовані сталевими сітками, для конструкційних виробів.

Тому робота, яка спрямована на розробку основ технології виробництва алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою, способом гарячої прокатки, що базується на визначенні параметрів деформації ґратки сітки, витяжки та овалізації її дротів, а також впливі цих параметрів на механічні властивості отриманого композиту та здатності до поглинання енергії удару, з метою подальшого отримання конструкційних виробів з прогнозованими механічними властивостями, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконана дисертаційна робота пов'язана з тематичними планами наукових досліджень Національної металургійної академії України (НМетАУ). Дослідження виконані в рамках програм, що відповідають тематиці держбюджетних науково-дослідних

робіт кафедри обробки металів тиском НМетАУ, а саме: ДР № 0118U003280 «Розробка методів пластичної обробки та створення високопродуктивних технологічних процесів виробництва профілів зі сплавів на основі алюмінію з питомою міцністю більше  $120\text{M}^2/\text{c}^2$ » (2016 ... 2017 р.), ДР № 0117U002147 «Дослідження процесів пластичної деформації алюмінієвих штаб з використанням внутрішніх матеріалів за умов гарячої прокатки» (2017 ... 2018 р.) та в рамках проекту «Praxispartnerschaft Metallurgie» - «Партнерство з організації практики в металургії» (за підтримки Німецького товариства академічних обмінів DAAD (ID 57143391). Використання програмного продукту QForm при виконанні математичного моделювання забезпечене в рамках угоди про використання пробної навчальної ліцензії програми QForm 8 між Micas Simulations Limited (м. Оксфорд, Великобританія) та кафедрою Обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова НМетАУ (м. Дніпро, Україна) – agreement No. MSL2015\_10\_5 від 28.10.2015 р.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є вирішення науково-технічної задачі розробки основ технології отримання алюмінієвих штаб з їх армуванням сталеву сіткою способом гарячої прокатки для конструкційних виробів з прогнозованими механічними властивостями.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

- 1) проаналізувати відомі технології отримання армованих композитів на основі алюмінієвої матриці;
- 2) дослідити вплив орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки та властивості композиту;
- 3) розробити інженерну методику розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту та дослідити їх вплив на формозміну сітки у складі композиту та його механічні властивості;
- 4) дослідити вплив армування на властивості композиту, зокрема, на досягнення показників розрахункової міцності, а також на здатність композиту до поглинання енергії удару;
- 5) адаптувати метод випробувань на удар для зразків різної товщини з метою оцінки властивостей алюмінієвих штаб, армованих сіткою, прокатаних при різних ступенях деформації;
- 6) здійснити моделювання процесу прокатки армованих алюмінієвих штаб в скінченно-елементу середовищі QForm для перевірки адекватності моделі прокатки армованих композитів та розширення можливостей розрахунку параметрів процесу;
- 7) дослідити вплив термічної обробки та анізотропії властивостей прокатаного композиту шляхом порівняння результатів механічних випробувань в поздовжньому та поперечному напрямках з метою визначення діапазону ступенів деформації, при яких різниця механічних властивостей по довжині та ширині композиту є мінімальною;
- 8) дати оцінку стадіям руйнування композиту під час випробувань на розтягування для прогнозування механізму розриву прокатаних при різних ступенях деформації композитів;
- 9) на основі результатів дослідження розробити основи технології прокатки алюмінієвих штаб, що армовані сталевими сітками, для конструкційних

виробів з прогнозованими механічними властивостями та передати результати досліджень для використання у промисловість та навчальний процес.

**Об'єкт дослідження.** Процес гарячої прокатки алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою.

**Предмет дослідження.** Закономірності деформації ґратки сітки, витяжки та овалізації її дротів, а також вплив цих параметрів на механічні властивості та здатність до поглинання енергії удару прокатаного композиту.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження побудовані на фундаментальних положеннях теорії та технології обробки металів тиском, а також на математичному моделюванні з використанням сучасних програмних продуктів, оснований на методах скінчених елементів. Застосовувались аналіз та узагальнення експериментальних досліджень, що проводились в лабораторних умовах кафедри Обробки металів тиском Національної металургійної академії України та кафедри Матеріалознавства Університету Падерборн (ФРН), порівняння даних досліджень, що опубліковані в закордонних та вітчизняних виданнях, використання при отриманні та обробці експериментальних даних сучасної повіреної вимірювальної апаратура та пристроїв, а також комп'ютерної техніки, опрацювання експериментальних даних з використанням методів математичної обробки даних.

**Наукова новизна.** Наукову новизну мають перелічені нижче результати наукових і експериментальних досліджень.

**1. Вперше встановлені закономірності деформації сталеву армуючої сітки, розташованої між алюмінієвих штаб, а саме — трансформація (видовження) ґратки сітки, витяжка та овалізація дроту, від ступеня деформації при прокатці.**

До виконання цієї роботи даних закономірностей відомо не було. Це дозволило визначити діапазон ступенів деформації композиту, який забезпечує раціональне співвідношення між трансформацією (видовженням) ґратки сітки, витяжкою та овалізацією дроту і витяжкою всього композиту. Отримані залежності дозволили підвищити показники міцності та здатності до поглинання енергії удару композиту, а також розробити інженерну методику розрахунку параметрів деформації сталеву армуючої сітки між двох алюмінієвих штаб.

**2. Отримали подальшого розвитку відомості про закономірності анізотропії механічних властивостей армованого композиту в залежності від параметрів композиту та деформації його елементів: видовження ґратки сітки та овалізації її дротів.**

Розробка відрізняється урахуванням впливу деформації ґратки сітки та овалізації дротів на механічні властивості композиту. Це дає можливість їх прогнозувати та визначати раціональний діапазон ступенів деформації з точки зору мінімізації анізотропії його механічних властивостей в поздовжньому та поперечному напрямках.

**3. Вперше на підставі визначених закономірностей плинності металів, які формують алюмінієво-сталевий композит з внутрішнім армуванням дротяною сіткою, визначено механізми з'єднання складових композиту в залежності від геометрії його елементів та ступеня деформації.**

Раніше такі дані для алюмінієвого композиту, армованого сталеву сіткою, були невідомі. Це дало можливість обирати раціональний ступінь деформації й заповнити порожнини між дротами армуючої сталеву сітки і алюмінієву матриці та збільшити внаслідок цього рівень механічних властивостей, а також визначити раціональну геометрію складових композиту.

#### **4. Вперше встановлені характерні особливості руйнування при розтягуванні армованих сталеву сіткою алюмінієвих композитів, отриманих сумісною прокаткою при різних ступенях деформації.**

Раніше таких даних для алюмінієвого композиту, армованого сталеву сіткою були невідомі. Це дозволяє прогнозувати механізм руйнування прокатаного композиту при навантаженнях на розтягування по одному з трьох встановлених механізмів, що переходять один в другий при збільшенні ступеня деформації при прокатці.

**Практична цінність отриманих результатів.** Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволили:

- встановити, що діагонально орієнтована відносно напрямку прокатки сітка сприяє плинності металу в матричному шарі композиту;
- розробити інженерну методику розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту;
- адоптувати до порівняння композитів різної товщини за умови відсутності руйнування зразків під час випробувань на удар;
- встановити за результатами випробувань на розтягування, що композити, армовані діагонально орієнтованою сіткою, порівняно з двома прокатаними штабами без армування, мають більші значення межі міцності на 3...10 % та межі плинності 12...25%;
- встановити адекватність моделі прокатки алюмінієвих композитів, армованих сталеву сіткою, що розроблено в програмному комплексі QForm. Моделювання видовження ґратки та витяжки дротів сітки з експериментальними даними показало відхилення результатів розрахунків 5,6 % та 2%, відповідно;
- встановити вплив термічної обробки після деформації на властивості композиту, а саме: термічна обробка призвела до зменшення міцності композиту (на 7...15 % в поздовжньому та на 4...23 % в поперечному напрямках) та межі плинності (на 7...18 % в поздовжньому та на 27...81 % в поперечному напрямках) при одночасному збільшенні залишкового подовження при розриві (на 19...50 % в поздовжньому та на 27...68 % в поперечному напрямку);
- визначити здатність композиту до поглинання енергії удару; встановити, що армовані сталеву сіткою прокатані алюмінієві штаби у порівнянні з двома сумісно прокатаними штабами без армування мають вищі характеристики поглинання енергії удару (вищий радіус згинання на 3...11 %, більший залишковий кут згинання на 2...18 % та вищу питому енергію удару на 17...22 %);
- встановити, що після термічної обробки питома енергія удару та залишковий кут згинання зменшуються на 2...16 % та 2...12 % відповідно, тоді як радіус згинання збільшується на 25...49 %. У той же час енергія удару, що поглинається, монотонно підвищується зі збільшенням ступеня деформації.

Встановлено, що діапазон ступеня деформації в межах 35...45 % може бути рекомендований для отримання компромісу між міцністю і пластичністю композитів у поздовжньому та поперечному напрямках;

- розробити основи технології прокатки алюмінієвих штаб армованими сталевими сітками для одержання суцільного композиту, що відображено в патенті на спосіб отримання композиційних виробів з внутрішніми каналами (Патент № 126811).

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи передані для використання в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» (акт про передачу для використання наукових результатів дисертаційної роботи від 19 червня 2018 р.).

Результати, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, використовуються в навчальному процесі на кафедрі Обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова при викладанні дисциплін «Обробка металів тиском», «Процеси та машини обробки тиском» і «Зварювання тиском та процеси з'єднання» для бакалаврів та магістрів спеціальності «Металургія» (спеціалізація «Обробка металів тиском»), а також при виконанні студентами курсових проектів і випускних кваліфікаційних робіт (довідка від 12 червня 2018 р.). Також дані, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, використовуються на кафедрі матеріалознавства в Університеті Падерборн, ФРН (рекомендаційний лист від 21.06. 2018 р.).

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації не використані ідеї співавторів публікацій. Всі принципові теоретичні й експериментальні результати, які були отримані в дисертації, засновані на дослідженнях, виконаних автором. Особистий внесок у спільних публікаціях (згідно з переліком опублікованих робіт): [2, 3, 6, 7] – аналіз відомих технологій отримання армованих композитів на основі алюмінієвої матриці; [11] – дослідження впливу орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки та властивості композиту; [4] – розробка методу розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту; [9, 10, 12] – дослідження впливу параметрів деформації на формозміну сітки у складі композиту та механічні властивості; [5] – проведення експериментів та аналіз впливу термічної обробки після процесів деформації на властивості композиту; [8] – дослідження анізотропії властивостей прокатаного композиту шляхом порівняння результатів вимірювання механічних властивостей в поздовжньому та поперечному напрямках; [1] – оцінка механізмів руйнування композиту під час випробувань на статичне розтягування.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та семінарах: Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів і молодих вчених «Молода наука. Технологія машинобудування» (м. Краматорськ, 2016 р.), XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення та проблеми розвитку технологій та машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2018), IX Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти, присвячена 120-річчю підготовки фахівців з обробки матеріалів тиском в КПІ ім. Ігоря Сікорського» (м. Херсон, 2018), 13-й Міжнародний симпозіум Хорватської металургійної спільноти «Матеріали і металургії» (Шибеник, Хорватія, 2018), II Всеукраїнська науково-технічна

конференція молодих вчених «Наука і металургія» (м. Дніпро, 2018), Придніпровський науковий семінар «Обробка металів тиском» (м. Дніпро, 2015...2018 р.р.).

**Публікації.** Матеріали дисертації викладено в 12 публікаціях, серед яких 6 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав, зокрема 2 статті, що входять до наукометричної бази SCOPUS та мають імпаکت фактор SNIP 0,859 та 1,378; 1 патент на корисну модель, 2 статті у спеціалізованих виданнях, що додатково відображають матеріали дисертації та 3 тези доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, висновків по роботі та додатків. Загальний об'єм роботи 184 сторінки, з них 148 сторінок основний текст. Дисертація містить 78 рисунків, 30 таблиць, список використаних літературних джерел з 115 найменувань на 12 сторінках та 4 додатки на 7 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі представлена загальна характеристика роботи: обґрунтовано актуальність теми, наведено мету, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, висвітлено наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено перелік публікацій за темою роботи та дані про апробацію отриманих результатів.

### СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ З'ЄДНАННЯ АРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Для створення матеріалу, що має витримувати ударні навантаження та, водночас, бути легким і міцним, існує необхідність розробки технології виготовлення композитних матеріалів, що отримують шляхом прокатки двох алюмінієвих штаб з армуванням сталеву сіткою. Ці композитні матеріали можуть бути застосовані при виробництві ролетів, алюмінієвих дверей, ліфтів, захисних елементів бойової техніки і таке інше.

Серед існуючих методів виробництва композитних матеріалів відомі такі, як метод порошкової металургії, зварювання вибухом, дифузійне зварювання під тиском, прокатка, прокатка у вакуумі, екструзія, волочіння, розлив-прокатка та інші. Слід відокремити метод прокатки (рис. 1) як найбільш ефективний, економічний і швидкий метод виготовлення армованих композитних матеріалів.

Проведено аналіз процесу прокатки алюмінієвих штаб та визначені параметри технологічного процесу, що впливають на з'єднання алюмінієвих штаб при прокатці, такі як температура прокатки, товщина штаб, ступінь деформації, підготовка поверхні.

Визначено, що оптимальний температурний діапазон для прокатки алюмінієвих штаб – 450...500°C, мінімальний ступінь деформації та температура, при яких відбувається з'єднання алюмінієвих штаб, 30% та 200°C відповідно.

Способи отримання армованих алюмінієвих композитів прокаткою із застосуванням сталеву дроту, розташованого вздовж напрямку прокатки, описані у патентах Cole D.Q. (Коул Д.К.), Davis L.R. (Девис Л.Р.), Gotoh K (Гото К.). Незначна кількість досліджень Нага Т. (Хага Т.), Takahashi K. (Такахаші К.) присвячена технологіям розливки, зокрема, двовалковому розливу-прокатці, для виготовлення



алюмінієвих матричних композитів, що армовані дротами, які розташовані вздовж напрямку прокатки.

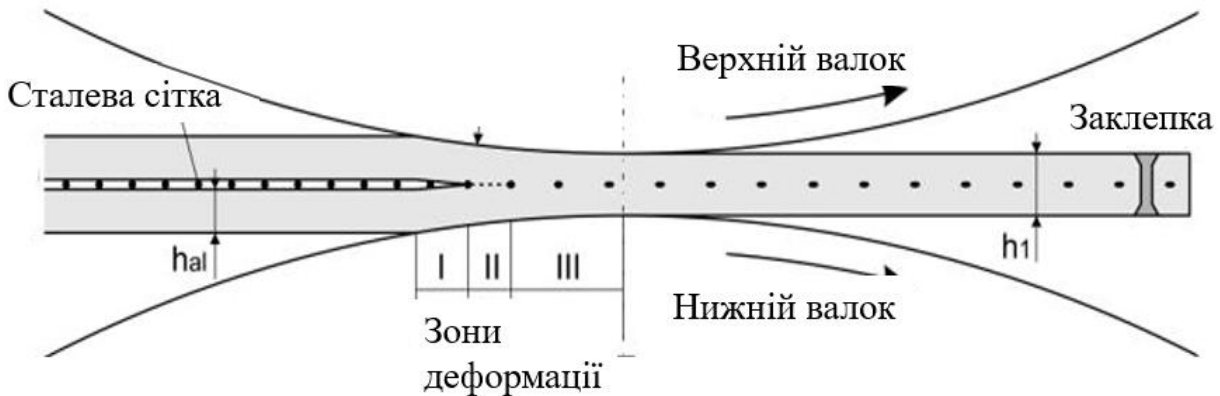


Рис. 1 – Схема процесу прокатки армованих сіткою композитів:  $h_{al}$  - товщина однієї алюмінієвої штаби,  $h_1$  - товщина композиту після прокатки. Зона I - стискання сітки та її наближення до штаб алюмінію; зона II – початок з'єднання складових композиту; зона III - деформація всього композиту

В даних роботах показано позитивний вплив використання сталевих дротів на механічні властивості композиту. Однак, при даному способі виробництва, не вдалося досягти рівномірного розташування армуючої складової в середині композиту. Тому застосування сітки в якості армуючої фази між двох алюмінієвих штаб дозволить визначити діапазон ступенів деформації, при якому композит отримує підвищені механічні властивості за здатність до поглинання енергії удару.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження з прокатки алюмінієвого матричного композиту, армованого сталевію сіткою, проводилися на базі лабораторії кафедри Обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова Національної металургійної академії України, на стані 180, та на кафедрі матеріалознавства Університету Падерборн, на стані 210.

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалися алюмінієві сплави EN AW-6063 (аналог сплаву АД31), який характеризується високими пластичними властивостями в температурно-швидкісних умовах обробки тиском і підвищеною корозійною стійкістю, EN AW-5056 та EN AW-5083 (аналогі сплавів АМг6 та АМг5 відповідно), які мають високий вміст магнію, що позитивним чином позначається на міцності і твердості композитів. В якості армуючої складової була обрана сітка зі сталі 1,4301 (аналог сплаву Х18Н9), зі здатністю до деформування та аустенітної структурою, що дозволяє здійснювати глибоку витяжку без проміжного відпалу. Діаметр дроту та розмір квадратної ґратки сітки становили відповідно: 1) «А» - 0,5 мм; 3 × 3 мм; 2) «В» - 0,25 мм; 1 × 1 мм; 3) «С» - 0,5 мм; 1 × 1 мм.

В якості заготовки використовували дві алюмінієві штаби та сітку, з'єднані між собою алюмінієвими заклепками. Експерименти проводились у два етапи: перший – з алюмінієвими штабами з мірними довжинами висоти, ширини та

довжини відповідно:  $3 \times 36 \times 120$  мм та  $4 \times 36 \times 120$  мм; другий – з розмірами:  $3,1 \times 120 \times 240$  мм.

Для першого етапу експериментів розроблено план, згідно з яким при армуванні дроти сітки при сумісній прокатці між двох алюмінієвих штаб було розташовано під кутом  $45^\circ$  до напрямку прокатки («Тип 45») та паралельно і перпендикулярно до напрямку прокатки («Тип 90»). З метою дослідження нижньої межі з'єднання композиту та впливу на механічні властивості різної орієнтації армуючої сітки в композиті було здійснено три групи прокаток на гладкій бочці з наступними параметрами:

- стан 180, температура прокатки  $200^\circ\text{C}$ , ступінь деформації 30% за один прохід, сітка типу «А» та «В», алюмінієвий сплав EN AW-6063;
- стан 180, температура прокатки  $500^\circ\text{C}$ , ступінь деформації 30% за один прохід, сітка типу «А» та «В», алюмінієвий сплав EN AW-5056;
- стан 210, температура прокатки  $500^\circ\text{C}$ , ступінь деформації 60%, за два проходи та проміжне попереднє нагрівання, сітка типу «А» та «В», алюмінієвий сплав EN AW-6063.

З метою дослідження впливу армуючої сітки на механічні властивості композиту розроблено інженерну методику розрахунку параметрів деформації армуючої сітки між двох алюмінієвих штаб. Для оцінки витяжки та овалізації дротів сітки всередині прокатаних композитів «Тип 90» та «Тип 45» представлено схему розташування шарів матриці та дротів сітки всередині композиту до (рис. 2-а) та після (рис.2-б) прокатки відносно напрямку прокатки.

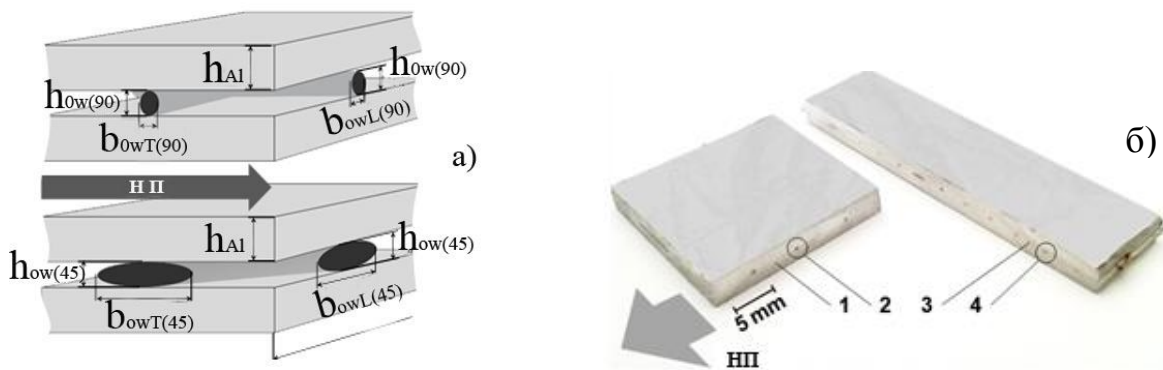


Рис. 2 – Схема до оцінки витяжки та овалізації сітки прокатаних композитів а) композити «Тип 90» і «Тип 45» перед прокаткою; б) композит «Тип 90» після прокатки; НП - напрямок прокатки; 1 - поздовжня площина поперечного перерізу композиту (L); 2 - проекція поперечного дроту на поздовжній площині; 3 - поперечна площина поперечного перерізу композиту (Т); 4 - проекція поздовжнього дроту на поперечній площині

Для розрахунку витяжки та овалізації дротів сітки (рис. 2-а) початкова висота композиту  $h_0$  інтерпретувалася як сума товщин двох штаб ( $2 \times h_{Al}$ ) алюмінієвої матриці без урахування товщини сітки (1):

$$h_{0\Sigma} = 2h_{Al}. \quad (1)$$

Коефіцієнт витяжки всього композиту  $\mu_\Sigma$  визначено як співвідношення (2) поперечного перерізу композиту до ( $h_{0\Sigma} \times b_{0\Sigma}$ ) та після прокатки ( $h_{1\Sigma} \times b_{1\Sigma}$ ):

$$\mu_{\Sigma} = (h_{0\Sigma} \times b_{0\Sigma}) / (h_{1\Sigma} \times b_{1\Sigma}). \quad (2)$$

Поздовжній  $\mu_{wL(90)}$  і поперечний  $\mu_{wT(90)}$  коефіцієнти витяжки дроту композитів «Тип 90» розраховано як співвідношення (3) між початковими  $F_{0wL(90)}$  та кінцевими  $F_{1wL(90)}$  ділянками проекції дроту на поперечну (Т) (по осі прокатки) і поздовжню (L) площину поперечного перерізу.

$$\mu_{wL(90)} = F_{0wL(90)} / F_{1wL(90)}, \quad (3)$$

де:

$$F_{0w} = \pi(h_{0w(90)} / 2)^2; \quad F_{1w} = \pi(h_{1w(90)} / 2) \times (b_{1w(90)} / 2).$$

Коефіцієнт витяжки дротів  $\mu_{w(45)}$  у складі композиту визначався як (4). Для розрахунків використовувались проекції середніх площин дротів ( $F_{0w(45)} / F_{1w(45)}$ ) на поперечну площину композиту, що прилягає до кута  $\varphi$  між дротом та вісями прокатки :

$$\mu_{w(45)} = F_{0w(45)} / F_{1w(45)}, \quad (4)$$

де відповідно :

$$F_{iw(45)} = (F_{iwL(45)} + F_{iwT(45)})/2; \quad F_{iwL(45)} = \pi (h_{iwL(45)} / 2 + (b_{iwL(45)} / 2) \sin\varphi;$$

$$F_{iwT(45)} = \pi (h_{iwT(45)} / 2 + (b_{iwT(45)} / 2) \sin(90 - \varphi).$$

Овалізацію  $O_{w(90)}$  поздовжніх та поперечних дротів у композиті «Тип 90» після прокатки розраховано окремо як співвідношення (5) між шириною ( $b_{1w(90)}$ ) і висотою дроту ( $h_{1w(90)}$ ) після прокатки:

$$O_{w(90)} = b_{1w(90)} / h_{1w(90)}. \quad (5)$$

Овалізація дротів у складі композиту «Тип 45» була визначена як середнє значення (6), прилеглого до кута  $\varphi$  відношення ( $b_{1w(45)} / h_{1w(45)}$ ):

$$O_{w(45)} = (O_{wL(45)} + O_{wT(45)})/2, \quad (6)$$

$$\text{де } O_{wL(45)} = (b_{wL(45)} / h_{wL(45)}) \sin\varphi; \quad O_{wT(45)} = (b_{wT(45)} / h_{wT(45)}) \sin(90 - \varphi).$$

Встановлено, що у складі композиту з діагонально розташованою сіткою коефіцієнт видовження ґратки не пропорційний коефіцієнту витяжки дроту. Вони пов'язані між собою через зміну кута ґратки сітки. Коефіцієнт подовження ґратки сітки  $\mu_c$  визначений відповідно до схеми (рис.3) і дорівнює  $\mu_{w(45)} = c_1 / c_0$ .

Довжину діагоналі  $d_1$  обчислювали, використовуючи довжину  $c_1$  та кут  $\alpha_1$ , який було виміряно після травління зразка. Видовження ґратки сітки  $\mu_c$  дорівнює відношенню  $d_1 / d_0$ . При цьому ступінь деформації  $\varepsilon$  визначено як  $\varepsilon = ((2h_{A1} - h_1) / 2h_{A1}) * 100\%$ . Отримана методика дозволяє кількісно визначити видовження ґратки сітки, витяжку та овалізацію дротів сітки у складі композиту при гарячій прокатці між двома алюмінієвими штабами, що дозволяє оцінити та спрогнозувати властивості композиту.

Для оцінки механічних властивостей композиту (межі міцності, плинності та залишкового видовження при розриві) та здатності до поглинання енергії удару, були проведені випробування на розтягування у відповідності до стандарту EN ISO 6892-1: 2017 та випробування на удар за допомогою маятникового копру за методом Шарпі, за стандартом ISO 179/2D (без надрізу). Для випробувань на удар були відібрані зразки з розмірами  $h_1 \times 10 \times 55$  мм, де  $h_1$  - висота композиту після прокатки.

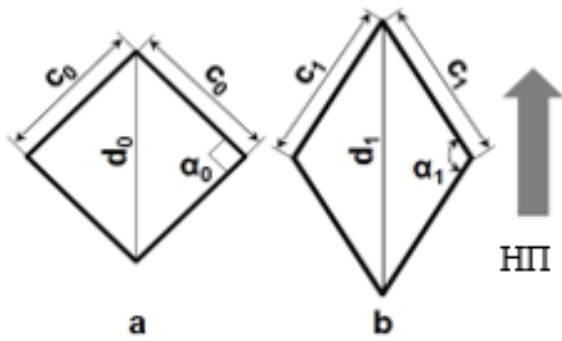


Рис. 3 – Схема для розрахунку коефіцієнту видовження ґратки сітки для композитів «Тип 45»: а) - ґратка сітки перед прокаткою; б) – ґратка сітки після прокатки;  $c_0$ ,  $d_0$  та  $\alpha_0$  - відповідно вихідна довжина краю, діагональна довжина і кут ґратки;  $c_1$ ,  $d_1$  та  $\alpha_1$  – відповідні показники після прокатки

Для того, щоб значення поглиненої композитом енергії можна було порівняти для зразків, прокатаних при різних ступенях деформації, розрахунок величини енергії удару було удосконалено. Удосконалення стосується того, що поглинену енергію ділили на момент інерції прямокутного перерізу композиту ( $h_1 \times 10$  мм). З урахуванням того, що зразки не були зруйновані після випробувань, для кожного з них були визначені залишковий кут та радіус згинання, що характеризує пружну деформацію композиту та рівномірність розподілення енергії удару в композиті, відповідно.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИПУ ТА ОРІЄНТАЦІЇ СІТКИ НА ЇЇ ФОРМОЗМІНУ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОТРИМАНОГО КОМПОЗИТУ

Перший етап експериментів був проведений для композитів «Тип 90» та «Тип 45» з застосуванням матеріалів, що описані вище. Для кожної з трьох груп прокаток були розраховані витяжка всього композиту, видовження ґратки сітки, витяжка та овалізація дротів сітки, зроблений аналіз результатів механічних випробувань на розтягування.

Аналіз результатів випробувань на розтягування показав, що всі армовані композити «Тип 45», порівняно з прокатаними штабами без армування, мають більші значення межі міцності на 3...10 % та межі плинності на 12...25%. Межа міцності композитів «Тип 90» на 3...30% менше, ніж межа міцності двох сумісно прокатаних алюмінієвих штаб без армування, а межа плинності – на 11...12 %. На основі отриманих даних стосовно впливу орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію композиту та його механічні властивості встановлено, що діагонально орієнтована до напрямку прокатки сітка сприяє плинності металу матриці та підвищенню показників механічних властивостей композитів.

Встановлено, що співвідношення між коефіцієнтами витяжки дротів сітки  $\mu_w$  і коефіцієнтами витяжки всього композиту  $\mu_\Sigma$ , а також частки дротів сітки в поперечному перерізі композиту є індикатором цілісності дротів сітки у складі композиту. Коефіцієнт витяжки дроту сітки повинен бути співвіднесений з коефіцієнтом витяжки композиту, щоб уникнути розриву дроту в композиті. Тому що у випадку, коли загальний коефіцієнт витяжки композиту  $\mu_\Sigma$  вищий, ніж коефіцієнт витяжки дроту сітки, то існує висока ймовірність розриву дротів в середині композиту під час прокатки.

За формулою Heinrich W. (Генріх В.) та Nixdorf J. (Ніксдорф Дж.), яка описує залежності меж міцності та плинності всього композиту від об'єму армуючої фази,

було розраховано теоретичні межі міцності та плинності для кожної з трьох груп прокаток та співставлені з експериментальними даними. Дослідження проведено в діапазоні частки армуючої фази в композиті до 5%, де згідно встановленої залежності, вважається, що не повинно бути покращення механічних властивостей. Загальним висновком щодо порівняння розрахункових та експериментальних значень межі міцності та плинності є те, що в проведеній серії експериментів з часткою армуючої фази в поперечному перерізі меншою ніж 5% встановлено, що максимальна розбіжність експериментальних та розрахункових значень не перевищує для межі плинності композитів «Тип 90» і «Тип 45» відповідно 39% та 33%, а для межі міцності для композитів «Тип 90» і «Тип 45» – відповідно 34% та 22%. Отже, кращу збіжність результатів експериментальних та теоретичних значень механічних властивостей встановлено для композитів «Тип 45».

З метою можливості подальшого дослідження розробленої технології виготовлення алюмінієвих композитів, армованих сталеву сіткою, з іншими розмірами складових, створена комп'ютерна модель у скінченно-елементному середовищі QForm. З метою перевірки адекватності моделі були проведені моделювання для зразків розміром  $3 \times 36 \times 120$  мм з алюмінієвого сплаву EN AW-5056. Ступінь деформації при прокатці становив 30%, а температура прокатки – 500 °С. В якості армуючої складової застосовувалась сталеву сітка зі сплаву 1,4301 з розміром ґратки сітки  $1 \times 1$  мм та діаметром 0,25 мм, що розташована діагонально до напрямку прокатки. Порівняння результатів моделювання з видовження ґратки та витяжки дротів сітки з експериментальними даними показало відхилення результатів розрахунків 5,6 % та 2%, відповідно. Моделювання дозволило отримати візуальну якісну збіжність поперечного перерізу композиту, отриману експериментально та за допомогою моделювання.

З метою здійснення прогнозування механізму руйнування прокатаних композитів «Тип 45» та «Тип 90» при навантаженнях на розтягування, проведена оцінка стадій руйнування композиту під час випробувань на статичне розтягування, встановлена закономірність розшарування композиту та виділено три механізми розриву композиту: 1) «розшарування → розрив шарів» (Р-Ш); 2) «відшарування першого шару → обмежене розшарування → розрив другого шару» (Ш1-Р-Ш2); 3) «розрив без розшарування» (Р).

Встановлено, що при руйнуванні зразків найбільші показники межі міцності та плинності, що становлять 335...377 МПа та 183...229 МПа, відповідно, спостерігаються у зразків, отриманих з композиту «Тип 45», з механізмом руйнування (Ш1-Р-Ш2). Це свідчить про те, що для композитів з діагональним відносно напрямку прокатки розташуванням армуючої сітки характерне більш міцне з'єднання його шарів.

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФОРМОЗМІНУ СІТКИ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АРМОВАНОГО КОМПОЗИТУ

При дослідженні впливу орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки встановлено, що оптимальним є розташування сітки в композиті під кутом 45° до напрямку прокатки («Тип 45»). З огляду на це, проведено другу серію прокаток композитів «Тип 45» при ступенях деформації 25, 30, 35, 45,

55% з армуючою сіткою типу «С» та алюмінієвими штабами зі сплаву EN AW-5083 з розмірами  $3,1 \times 120 \times 240$  мм при температурі прокатки  $500^\circ\text{C}$ .

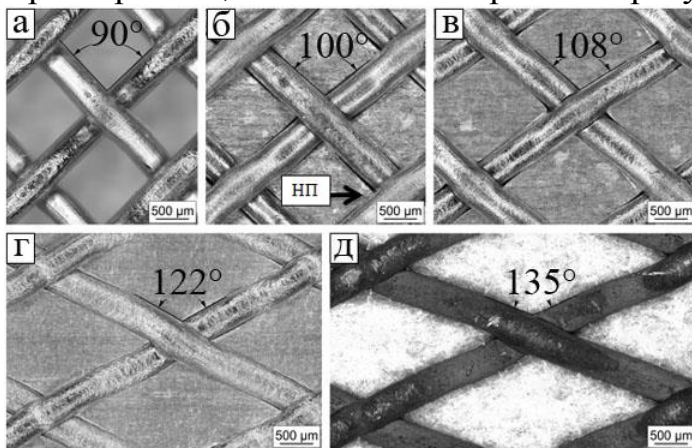


Рис. 4 – Мікрофотографії перетинів дротів сітки всередині прокатаного композиту «Тип 45» після прокатки:  
а - 0% (початкова ґратка сітки);  
б - 25%; в - 30%; г - 45%, д - 55%;  
НП - напрямок прокатки

під час прокатки та одночасним переміщенням цих перехресть в напрямку прокатки внаслідок подовження всього композиту.

Розширення композитів після прокатки становило 1...2%. За допомогою механічної та хімічної обробки було видалено один з матричних шарів, що дало змогу визначити зміну кута між дротами ґратки сітки після прокатки. На основі отриманих даних встановлено, що при збільшенні ступеня деформації композиту даний кут збільшується (рис.4).

Проведений аналіз області перетину дротів сітки композиту (рис. 4 і 5) показав, що в даній області спостерігаються зони локалізованої інтенсивної деформації. Їх поява обумовлена стисненням двох дротів

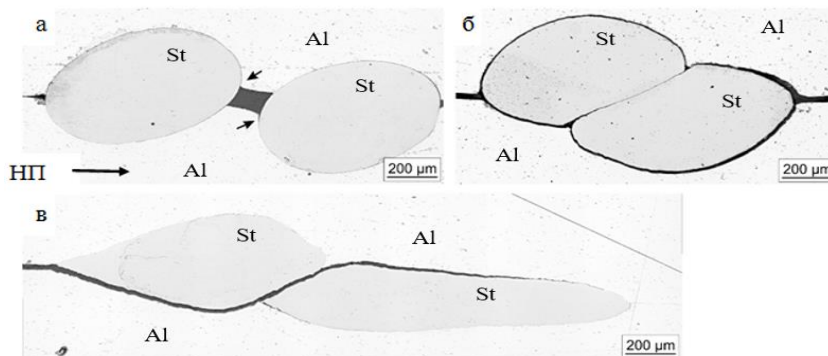


Рис. 5 – Приклад позиції дротів сітки між матрицями зі сплаву EN AW-5083 поблизу перехресть дротів при ступенях деформації: а - 25%; б - 35%; в - 55%. НП - напрямок прокатки. Al – шари алюмінію. St – сталевий дріт. Стрілки вказують на зайняті області, які забезпечують з'єднання за допомогою зв'язку «Zір-з'єднання».

З'єднання, яке спостерігається в армованому композиті при відносно низьких ступенях деформації (25%) під час прокатки, призводить до зміни форми ґратки сітки та повороту овалізованого дроту. Такий механізм з'єднання можна назвати «Zір-з'єднання». Границі матриці, що забезпечують таке з'єднання композиту, відмічені стрілками (Рис. 5-а).

Такий тип з'єднання спостерігається в усіх експериментах при значеннях ступеня деформації до 45% включно. Окрім цього при досягненні ступеня деформації значення 35% одночасно з «Zір-з'єднанням» з'являються численні області з'єднання як між шарами матриці, так і між ними та армуючою фазою.

Таким чином, «Zip-з'єднання» є важливим механізмом з'єднання шарів матриці між собою, тому що він працює при ступенях деформації, коли, як відомо з літературних джерел, з'єднання шарів матриці нестабільне чи навіть неможливе.

Подальше збільшення деформації при прокатці призводить до значного сплюснення дротів сітки, і, як наслідок, їх овалізації, що усувають «Zip-з'єднання». У таблиці 1 наведені дані про коефіцієнти витяжки композиту ( $\mu_{\Sigma}$ ) та дротів в ньому ( $\mu_{w(45)}$ ), видовження ґратки сітки ( $\mu_c$ ), а також овалізацію дротів сітки ( $O_{w(45)}$ ) всередині композиту залежно від ступеня деформації при прокатці за один прохід.

Таблиця 1 – Параметри деформації прокатаних композитів (сплав EN AW-5083) за один прохід з різними номінальними ступенями деформації при  $h_0 = 6,2\text{мм}$

Код експерименту*	$h_1$	$\mu_{\Sigma}$	$\mu_c$	$\mu_{w(45)}$	$O_{w(45)}$	$F_w$
5083-45-25	4,53	1,36	1,40	1,06	1,15	4,61
5083-45-30	4,23	1,44	1,63	1,11	1,21	4,73
5083-45-35	3,90	1,56	1,85	1,25	1,31	4,57
5083-45-45	3,25	1,86	1,94	1,27	1,75	5,39
5083-0-45	3,28	-	-	-	-	-
5083-45-55	2,74	2,21	2,28	1,46	2,27	5,55
5083-0-55	2,79	-	-	-	-	-

\* - Код експерименту: марка сплаву матриці (за стандартом DIN EN 573-3)  
 - тип композиту – номінальний ступінь деформації при прокатці;  
 $2h_{A1}$  - початкова товщина композиту, мм;  
 $h_1$ , - товщина композиту після прокатки, мм;  
 $\mu_{\Sigma}$  - коефіцієнт витяжки всього композиту;  
 $\mu_c$  - коефіцієнт видовження ґратки сітки;  
 $\mu_{w(45)}$  - коефіцієнт витяжки дроту і у композиті «Тип 45»;  
 $O_{w(45)}$  - овалізація дротів після прокатки в композит «Тип 45»;  
 $F_w$  - частина композитного поперечного перерізу, заповнена дротами, %.  
 Ступінь деформації  $\varepsilon$  визначено за формулою  $\varepsilon = ((2h_{A1} - h_1) / 2h_{A1}) * 100\%$

Згідно таблиці 1 визначено різні види переважної деформації дроту всередині композиту в залежності від ступеня деформації при прокатці:

– 25...30% деформації – переважний механізм деформації сітки є видовження ґраток. Завдяки наявності вигинів сітки в перехрестях дротів, видовження ґратки призводить до обертання дроту алюмінієм і забезпечує «Zip-з'єднання» (рис. 6-а);

– 30...35% – переважними механізмами деформації сітки є видовження ґратки та витяжка дроту.

– 35...45% – переважним механізмом деформації дроту є його овалізація та заповнення сформованих матрицею порожнин (рис. 6-б).

– 45...55% – овалізація дротів посилюється, інші параметри деформації дроту набувають відповідності до витяжки всього композиту (рис. 6-в).

На рис. 5 видно, що у зонах перехресть дротів утворюються пустоти, заповнення алюмінієм яких ускладнено. Проте, заповнення порожнин поблизу перехресть дротів покращується при збільшенні ступеня деформації. Після досягнення ступеня деформації 35%, дроти сітки повністю покриваються шарами алюмінію. Виключенням є прямий контакт з поверхнею двох перехресних дротів сітки (див. рис. 5-б).

За допомогою енергетично-дисперсійного рентгенівського спектроскопа - EDX-сканера було виміряно шар інтерметалічних фаз на межі між дротами та матрицею. Незважаючи на «огорнення» алюмінієм дротів під час прокатки, на поверхні контакту алюмінію та сталі не спостерігалось дифузійного шару для всього діапазону ступенів деформації.

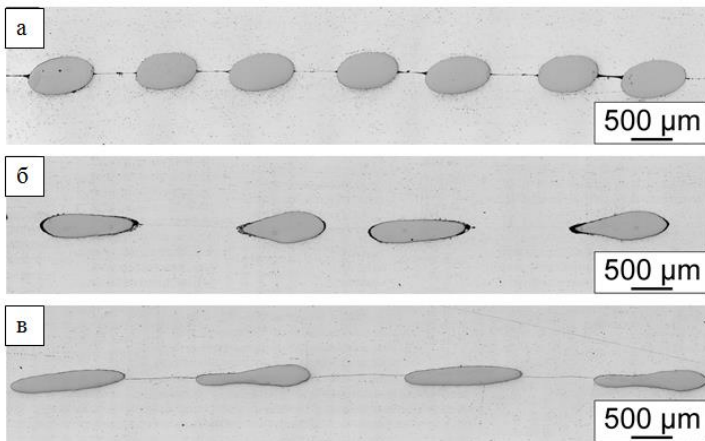


Рис. 6 – Поперечні ділянки композиту при різних ступенях деформації при прокатці: а - 25%, б - 45%, в - 55%

порожнини між дротами армуючої сталеві сітки та алюмінієвої матриці та збільшити, в наслідок цього, рівень механічних властивостей при динамічних навантаженнях.

Шляхом апроксимації отриманих даних були отримані емпіричні залежності для розрахунку витяжки всього армованого композиту ( $\mu_{\Sigma}$ ), витяжки ґратки сітки ( $\mu_c$ ), дротів сітки ( $\mu_{w(45)}$ ) та їх овалізації ( $O_{w(45)}$ ) від ступеня деформації ( $\varepsilon$ ) при прокатці:

$$\mu_{\Sigma} = 0,89 + 0,0215 \cdot \varepsilon, \text{ при величині коефіцієнту детермінації } R^2 = 0,971;$$

$$\mu_c = 0,997 + 0,0003 \cdot \varepsilon + 0,0002 \cdot \varepsilon^2, R^2 = 0,976;$$

$$\mu_{w(45)} = 0,946 + 0,0233 \cdot \varepsilon, R^2 = 0,983;$$

$$O_{w(45)} = 1,002 + 0,0016 \cdot \varepsilon + 0,0001 \cdot \varepsilon^2 + 0,00006 \cdot \varepsilon^3, R^2 = 0,976.$$

Отримані залежності дозволили визначити діапазон значень ступенів деформації, який забезпечує раціональне співвідношення між видовженням ґратки сітки, витяжкою та овалізацією дроту і витяжкою всього композиту. В цьому діапазоні композит має високі показники міцності та здатності до поглинання енергії удару, ніж у двох сумісно прокатаних штаб без армування.

З метою визначення раціонального діапазону ступенів деформації армованого алюмінієвого композиту при механічних випробуваннях досліджено його властивості як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках відносно осі

Водночас після термічної обробки на межі між дротами та матрицею було видно шар інтерметалічних фаз. Товщина цього шару залежить від ступеня деформації при прокатці. Встановлено, що термічна обробка (відпал) при 500 °C сприяла утворенню суцільного шару інтерметалічних фаз.

Отримані дані дали можливість обрати раціональний діапазон ступенів деформації композиту, який має становити 35...45%, що дозволяє заповнити



прокатки. Встановлено, що межі плинності та міцності композитів в поздовжньому напрямку вищі, ніж у поперечному (на 6...17 % межі плинності та 1...5 % межі міцності). Що свідчить про існування анізотропії властивостей армованих композитів. Поздовжній напрямок має вищі показники.

Проаналізовано вплив термічної обробки прокатаних композитів на їх властивості та встановлено, що вона призвела до зменшення міцності (на 7...15% в поздовжньому та на 4...23% в поперечному напрямку) та межі плинності (на 7...18 % в поздовжньому та на 27...81% в поперечному напрямку) при одночасному збільшенні залишкового подовження при розриві (на 19...50 % в поздовжньому та на 27...68 % в поперечному напрямку).

Після проведення випробувань на удар, проаналізовано здатність армованих композитів «Тип 45» (45), цих композитів після термічної обробки (45+ТО) та двох сумісно прокатаних алюмінієвих штаб без армування (0) до поглинання енергії удару, визначено залишковий кут та радіус згинання (рис .7).

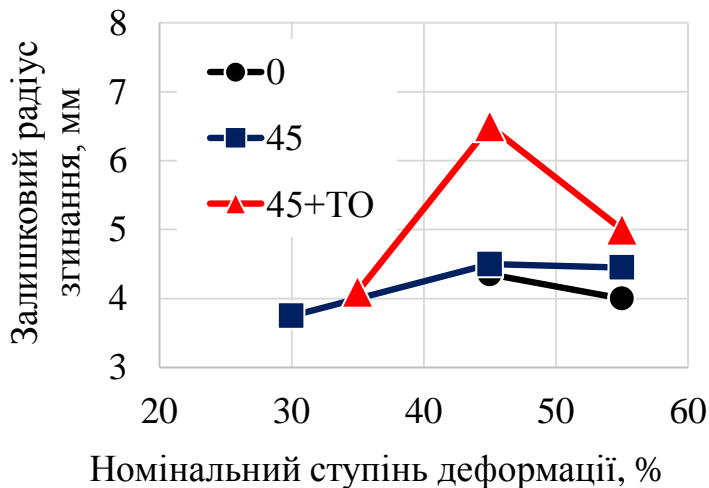


Рис. 7 – Залежність залишкового радіуса згинання після прокатки композитів «Тип 45»(45), композитів «Тип 45» з термічною обробкою (45+ТО) та двох сумісно прокатаних штаб без армування (0) від ступеня деформації при прокатці

деформації 45%: найвищий залишковий радіус згинання – 6,5 мм для термічно оброблених зразків та 4,5 мм для зразків без термічної обробки; найвищий залишковий кут згинання – 91° для зразків без термічної обробки та найнижчий – 78° для зразків з термічною обробкою. У той же час енергія удару, що поглинається, монотонно підвищується з збільшенням ступеня деформації.

На основі результатів тесту на розтягування встановлені три механізми руйнування армованих композитів, отриманих сумісною прокаткою при різних ступенях деформації. Ці механізми переходять один в другий при збільшенні ступеня деформації при прокатці.

1) «Розшарування → Розрив шарів» (рис. 8-а). Ця послідовність виникає, коли композит має низьку міцність з'єднання між шарами матриці, а також порівняно невелику частину дротів у поперечному перерізі композиту. Такий же механізм

Порівняння армованих композитів та двох сумісно прокатаних алюмінієвих штаб без армування показує, що перші мають вищий радіус згинання на 3...11 %, більший залишковий кут згинання на 2...18 % та вищу питому енергію удару на 17...22 %.

Після термічної обробки питома енергія удару та залишковий кут згинання зменшуються на 2...16 % та 2...12% відповідно, тоді як радіус згинання збільшується на 25...49%. Індикатори жорсткості (радіус згинання і залишковий кут) мають екстремальні показники при ступені

спостерігався як для композитів одразу після прокатки, так і для двох сумісно прокатаних штаб без армування після термічної обробки. Відсутність жорсткого з'єднання між шарами матриці та армуючих дротів призводить до інтенсивного відшарування внаслідок цього шари матриці окремо чинять опір навантаженню на розтягування.

2) «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару» (рис. 8-б). Ця послідовність характерна для прокатаного композиту, в якому частина поперечних дротів невелика, а міцність зв'язку між матрицею та армуючою фазою вища, ніж між шарами матриці. В цьому випадку плин металу призводить до руйнування першого шару, а армуюча фаза «розщеплює» шари композиту. Відшарування може бути обмежено всередині однієї чи кількох ґраток сітки і не поширюватися на всю довжину зразка.

3) «Розрив без розшарування» (рис. 8-в). Цей механізм є характерним для композиту з високою міцністю з'єднання як між шарами матриці, так і між ними і армуючою фазою, і для композитів з великою часткою дротів у поперечному перерізі.

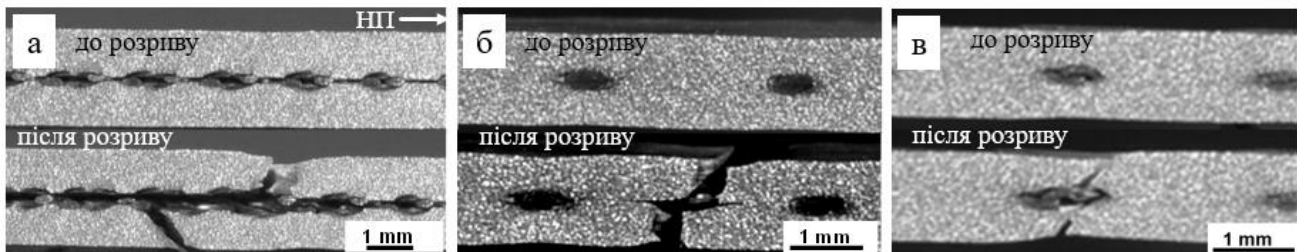


Рис. 8 – Розрив армованого композиту під час випробування на розтягування. Ступінь деформації: а - 25%, б - 45%, в - 55%. НП – напрям прокатки

Дані на рис 8 підтверджують, що при ступенях деформації 35...45%, має місце «Зір-з'єднання», що сприяє прояву механізму розшарування «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару»

Для визначення анізотропії властивостей композитів, що прокатані з різними ступнями деформації, проведено зіставлення їх механічних властивостей, отриманих у поздовжньому (до напрямку прокатки) та поперечному напрямках. Проаналізовані відношення меж міцності та плинності в поздовжньому напрямку ( $\sigma_{BL}$ ) відносно поперечного ( $\sigma_{BT}$ ) до зміни видовження ґратки сітки ( $\mu_c$ ) у складі композиту чи овалізації дроту сітки ( $O_{w(45)}$ ).

Співвідношення поздовжньої та поперечної межі міцності зростає з 1,07 при 35% до 1,13 при 45% ступенях деформації при прокатці. Це означає, що розвиток овалізації дротів погіршує опір пластичній деформації (відношення межі міцності до межі плинності). Порівняння значень подовжньої та поперечної межі плинності показує, що їх співвідношення (анізотропія) дорівнюють 1,03 і 1,07 і є найнижчими в діапазоні ступенів деформації 35 та 45%.

Анізотропія армованих композитів у поздовжньому та поперечному напрямках свідчить про те, що в діапазоні від 25 до 35% деформації відбувається рівномірна овалізація (1,22...1,25). Після 45% деформації овалізація дротів однакова як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках (рис.9). При дослідженні анізотропії армованих композитів при різних ступенях деформації в

залежності від зміни розміру ґратки сітки ( $\mu_c$ ) та відношення меж міцності композитів встановлено, що стрімке видовження ґратки сітки (1,95...2,27) відбувається при 35...45% деформації композиту. Аналогічно побудовано залежності видовження ґратки сітки та овалізації від відношення між плинністю композитів в поздовжньому до поперечного напрямку. Встановлено, що при 35...45% деформації різниця між показниками межі плинності композитів у поздовжньому та поперечному напрямку по відношенню до овалізації (1,22...1,25) та видовження ґратки сітки (1,78...1,95) є мінімальна. Це свідчить про те, що в діапазоні ступенів деформації 35...45 % є мінімальна різниця між властивостями композиту.

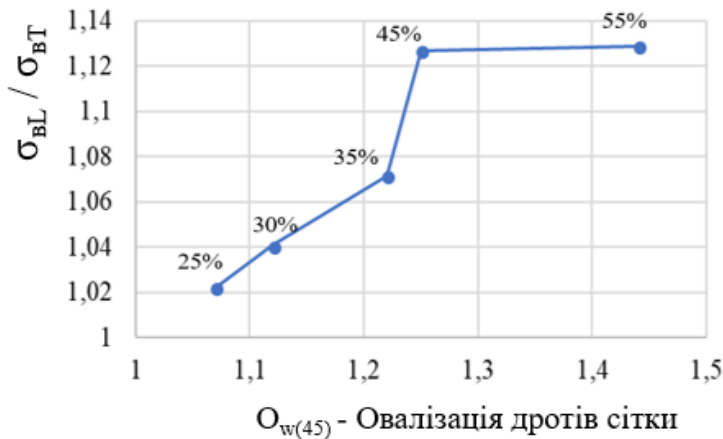


Рис. 9 – Анізотропія механічних властивостей армованих композитів при різних ступенях деформації (25, 30, 35, 45, 55%) в залежності від овалізації дротів сітки та відношення між міцності композитів в поздовжньому до поперечного напрямку

дотриманні наступної технології: різання алюмінієвих штаб на рівні довжини, підготовка отворів для заклепок; очищення поверхні алюмінієвих штаб та сталеві сітки; з'єднання композиту заклепками та підігрів в печі 500 °C (6 хв. на 1 мм висоти заготовки); гаряча прокатка при 35...45% деформації; термічна обробка готового композиту в печі 500 °C 2 години (відпал).

Для отримання алюмінієвого композиту, армованого сталеві сіткою, з прогнозованими механічними властивостями (межею міцності, плинності, поглинанням енергії удару, залишковим радіусом та кутом згинання), запропонована технологія може бути застосована для композитів, що мають такі відношення:

- довжини зони деформації до середньої висоти композиту в межах 2,49...4,3;
- довжини ґратки сітки до зони деформації в межах 0,07...0,29;
- висота композиту до висоти (діаметру) сітки знаходиться в межах 12...32;
- відсоток армуючої фази у поперечному перерізі композиту до 5%.

Рекомендовані до застосування алюмінієві сплави EN AW-5056 та EN AW-5083, сталеві сітка зі здатністю до деформування та з'єднання, а також аустенітної структурою, наприклад 1,4301 (аналог сплав X18H9).

Згідно патенту (Патент № 126811) розроблено спосіб отримання композиційних виробів, що відбувається в такій послідовності: складають тришаровий пакет з розміщенням між алюмінієвими пластинами прошарку, температуру і час нагрівання пакета визначають, виходячи із сортаменту металу, виду прошарку і товщини пакета; обробку пакета тиском здійснюють прокаткою між валками зі ступенем деформації, який залежить від виду прошарку.

Таким чином, можна отримати алюмінієвий композит, армований сталеві сіткою, при

Результати дисертаційної роботи передані для використання в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» (акт про передачу для використання наукових результатів дисертаційної роботи від 19 червня 2018 р.), та використовуються в навчальному процесі на кафедрі Обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова при викладанні дисциплін «Обробка металів тиском», «Процеси та машини обробки тиском» і «Зварювання тиском та процеси з'єднання» (довідка від 12 червня 2018 р.) та на кафедрі матеріалознавства в Університеті Падерборн, ФРН (рекомендаційний лист від 21.06. 2018 р.).

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою роботою в галузі обробки металів тиском, у якій отримано нове рішення актуальної науково-технічної задачі, що полягає в встановленні закономірностей деформації сталевих армуючої сітки, розташованої між алюмінієвих штаб, а саме трансформація (видовження) ґратки сітки, витяжка та овалізація дроту, від ступеня деформації при прокатці, визначенні механізму з'єднання складових композиту в залежності від геометрії його елементів та ступеня деформації, що дозволило розробити основи технології отримання алюмінієвих штаб з армуванням сталевих сіткою способом гарячої прокатки для отримання композиту з прогнозованими механічними властивостями.

**Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.**

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел обґрунтовано необхідність розробки основ технології для отримання нових композитних матеріалів, що поєднують в собі властивості міцності, легкості та придатності до поглинання енергії удару. Проведено огляд сучасних методів отримання композитних матеріалів, визначено їх сильні та слабкі сторони. Досліджено процес прокатки алюмінієвих штаб та визначено його параметри, що впливають на з'єднання алюмінієвих штаб. Проаналізовано інформацію про параметри прокатки алюмінієвих штаб та армування алюмінію; показано, що застосуванню сітки в якості армуючої фази в композитах, що виготовляють шляхом прокатки, наразі перешкоджає брак відомостей про параметри деформації як сітки в цілому, так і дротів, з яких вона складається, всередині композиту. Крім того, невідомим досі залишався зв'язок між ступенем деформації композита, деформацією ґратки сітки, витяжкою та овалізацією її дротів зі зміною механічних властивостей композиту, зокрема здатністю до поглинання енергії удару. Тому робота, спрямована на вирішення зазначеної науково-технічної задачі, є актуальною.

2. Розроблено загальну схему та план проведення експерименту з дослідження впливу розташування армуючої складової до напрямку прокатки на з'єднання шарів композиту та його механічні властивості. Розроблено інженерну методику розрахунку параметрів деформації сітки у складі композиту при сумісній прокатці між двох алюмінієвих штаб. Отримана методика дозволяє кількісно визначити видовження ґратки сітки, витяжку та овалізацію дротів діагонально розташованої сітки у складі композиту при гарячій прокатці між двох алюмінієвих штаб, що дозволяє оцінити та прогнозувати властивості композиту. Пристосовано метод випробувань на удар для зразків різної товщини для оцінки властивостей

алюмінієвих штаб, армованих сіткою, прокатаних при різних ступенях деформації. Це дало можливість визначити здатність композиту до поглинання енергії удару, а також залишковий кут та радіус згинання зразків.

3. Експериментально досліджено вплив орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію композиту та його механічні властивості та встановлено, що діагонально орієнтована сітка сприяє плинності металу. Проведені випробування на розтягування показали, що армовані діагонально розташованою сіткою композити, порівняно з прокатаними штабами без армування, мають більші значення межі міцності на 3...10 % та межі плинності 12...25%. Межа міцності композитів з сіткою, що розташована вдовж осі прокатки, на 3...30% менше, ніж межа міцності прокатаних алюмінієвих штаб без армування, а межа плинності – на 11...12 %. Це свідчить про те, що композити з діагонально орієнтованою сіткою мають кращі показники механічних властивостей. Встановлено, що розбіжність експериментальних та розрахункових значень для композитів «Тип 45» не перевищує 22% для межі плинності та 33% для межі міцності.

4. Створено комп'ютерну модель процесу гарячої прокатки алюмінієвих штаб, армованих сталеву сіткою під кутом  $45^{\circ}$  до напрямку прокатки, в скінченно-елементному середовищі QForm. При моделюванні використовувалась температура зразка  $500^{\circ}$  та ступінь деформації 30%. Теоретичне дослідження прокатки композитів в програмному середовищі QForm дозволило отримати візуальну якісну збіжність поперечного перерізу композитів, отриманих експериментально та за допомогою моделювання. До того ж порівняння результатів моделювання подовження ґратки та витяжки дротів сітки з експериментальними даними показало відхилення результатів розрахунків 5,6 % та 2%, відповідно. Отримані результати свідчать про досить високу збіжність розрахунків та адекватність побудованої моделі. Це дає можливість подальшого розвитку технології виготовлення композитів армованих сталеву сіткою для різних розмірів його складових.

5. За результатами експериментальних досліджень визначено механізми з'єднання складових композиту в залежності від геометрії його елементів та ступеня деформації, та встановлені закономірності показників деформації сталеву армуючої сітки, розташованої між алюмінієвих штаб, а саме витяжки всього композиту ( $\mu_{\Sigma}$ ), трансформації (видовження) ґратки сітки ( $\mu_c$ ), витяжки ( $\mu_{w(45)}$ ) та овалізації ( $O_{w(45)}$ ) дроту від ступеня деформації ( $\epsilon$ ) при прокатці. Це дозволило визначити діапазон ступенів деформації композиту, який забезпечує раціональне співвідношення між видовженням ґратки сітки, витяжкою та овалізацією дроту і витяжкою всього композиту. Отримані дані дозволили підвищити показники міцності та здатності до поглинання енергії удару композиту.

6. Проведені експериментальні дослідження впливу ступеня деформації на механічні властивості композиту показали, що розшарування після деформації відсутнє. Ці дані свідчать про можливість виробництва композитних матеріалів з алюмінієвою матрицею, посиленою сіткою, за допомогою гарячої прокатки зі ступенем деформації 25...55%. Армування алюмінієвих штаб сплаву EN AW-5083 сіткою з нержавіючої сталі призвело до зміни їх механічних властивостей: міцність армованих штаб у напрямку прокатки збільшилася на 3 ... 4 %, ніж у прокатаних штаб без сітки, тоді як міцність і пластичність армованих штаб в поперечному

напрямку збільшилася на 8...17% та 24...49 %, відповідно. Це свідчить про можливість підвищення показників механічних властивостей армованого композиту як в поздовжньому, так і в поперечному напрямку.

7. При дослідженні впливу термічної обробки (відпалу) прокатаних композитів на їх властивості встановлено, що вона призвела до зменшення міцності (на 7...15% в поздовжньому та на 4...23% в поперечному напрямку) та межі плинності (на 7...18 % в поздовжньому та на 27...81% в поперечному напрямку) при одночасному збільшенні залишкового подовження при розриві (на 19...50 % в поздовжньому та на 27...68 % в поперечному напрямку). Це призвело до усунення деформаційного зміцнення та залишкових напружень у композиті.

8. Після проведення випробувань на удар порівняно армовані композити та прокатані алюмінієві штаби без армування. Встановлено, що перші мають вищий радіус згинання на 3...11 %, більший залишковий кут згинання на 2...18 % та вищу питому енергію удару на 17...22 %. Після термічної обробки питома енергія удару та залишковий кут згинання зменшуються на 2...16 % та 2...12% відповідно, тоді як радіус згинання збільшується на 25...49%. Індикатори жорсткості (радіус згинання і залишковий кут) мають екстремальні показники при ступені деформації 45%: найвищий залишковий радіус згинання – 6,5 мм для термічно оброблених зразків та 4,5 мм для зразків без термічної обробки; найвищий залишковий кут згинання – 91° для зразків без термічної обробки та найнижчий – 78° для зразків з термічною обробкою. У той же час енергія удару, що поглинається, монотонно підвищується з збільшенням ступеня деформації.

9. Дістали подальшого розвитку наукові уявлення про анізотропію прокатаного композиту в залежності від параметрів деформації ґратки сітки та овалізації її дротів. Встановлено, що при 35...45% деформації різниця між показниками межі плинності композитів у поздовжньому та поперечному напрямку по відношенню до овалізації (1,22...1,25) та видовження ґратки сітки (1,78...1,95) є мінімальною. Це свідчить про те, що в діапазоні ступенів деформації 35...45 % має місце мінімальна анізотропія властивостей композиту.

10. На основі результатів тесту на розтягування встановлено три механізми руйнування армованих композитів, отриманих сумісною прокаткою при різних ступенях деформації. Ці механізми переходять один в другий при збільшенні ступеня деформації при прокатці. Встановлено, що при ступенях деформації 35...45%, має місце «Zір-з'єднання», що сприяє прояву механізму розшарування «Відшарування першого шару → Обмежене розшарування → Розрив другого шару».

11. Розроблено основи технології отримання алюмінієвого композиту, армованого сталеву сіткою способом гарячої прокатки на базі результатів дослідження параметрів деформації ґратки сітки, витяжки та овалізації її дротів, а також впливу цих параметрів на механічні властивості отриманого композиту та здатності до поглинання енергії удару. Результати досліджень передані для використання у в умовах ПрАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ» та у навчальному процесі в Університеті Падерборн (ФРН) та в Національній металургійній академії України.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПУБЛІКАЦІЯХ:

*Статті у фахових виданнях України та інших держав:*

1. **Makeeva, A. S.** Theoretical and experimental research of hot rolling of aluminum strips for solar collector / A.S. Makeeva, O.S. Kuzmenko, O.A. Remez [et al.] // *Geo-technical mechanics*. – 2016. – № 128. – P.150-159.

2. **Макеєва, Г.С.** Взаємозв'язок теоретичних та експериментальних результатів прокатки алюмінієвих полос / Г.С. Макеєва, Я.В. Фролов, М.Є. Панюшкін // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорськ: ДДМА, – 2017. - № 2 (45). – С. 43-47.

3. Investigation of the bimetal compound with aim the increase of reliability equipment for complex gas preparation / **H. S. Makeieva**, Ia.V. Frolov, M.Y. Stolbchenko, O.Y. Grydin, M. Schaper, S.Ju. Makeev // *Geo-Technical Mechanics: Journal of Collected Scientific Papers / The M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics*. – Dnipro, 2017. – Issue 135. – P.113-124.

4. Roll bonding of steel net-reinforced aluminium strips [Електронний ресурс] / M. Stolbchenko, **H. Makeieva**, O. Grydin, Ya. Frolov, M. Schaper // *Materials Research*. – 2018. – Vol. 21. – № 2. – Режим доступу до ресурсу: [www.scielo.br/pdf/mr/v21n2/1516-1439-mr-1980-5373-MR-2017-0941.pdf](http://www.scielo.br/pdf/mr/v21n2/1516-1439-mr-1980-5373-MR-2017-0941.pdf). – DOI:10.1590/1980-5373-MR-2017-0941. (Scopus)

5. Influence of strain parameters at rolling on the properties of wire-reinforced aluminium composites / Y. Frolov, M. Stolbchenko, O. Grydin, **H. Makeeva**, M. Tershakov, M. Schaper // *International Journal of Material Forming*. – 2018. – Vol. 11. – №50. – P. 1-14. DOI:10.1007/s12289-018-1431-6. (Scopus)

6. Исследование процесса пластической деформации совместной горячей прокатки двух алюминиевых полос с алюминиевой проволокой / **А. С. Макеєва**, О. А. Ремез, И. Уваров, А. С. Кузьменко // *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. – Częstochowa: Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej. - № 57. – 2017. – P. 175-180.

*Патент України:*

7. Пат. України 126811, МПК В23К 101/14, В23К 20/00. Спосіб отримання композиційних виробів з внутрішніми каналами / Я.В. Фролов, **Г.С. Макеєва**, С.Ю. Макеєв, О.С. Кузьменко; заявник і патентовласник Національна Металургійна Академія України. – № u201800144; Заявл. 03.01.2018; Опубл. 10.07.2018, Бюл. 13.

*Тези доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій:*

8. Макеєва, Г.С. Анізотропія гарячекатаних, армованих сталевую сіткою алюмінієвих матричних композитів / **Макеєва Г.С.**, Фролов Я.В. // *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції*. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 2018. - С. 145-147.

9. Makeieva, H. Rolling of aluminium stripes reinforced with steel netting / **H. Makeieva**, Ya. Frolov, D. Čurčija // *Materials and Metallurgy:13th International*

Symposium of Croatian Metallurgical Society, June 24-29, 2018, Croatia, Šibenik, 2018. – P. 204.

10. Макеєва, Г.С. Вплив параметрів деформації на формозміну сталеві сітки в складі армованого алюмінієвого матричного композиту / Г.С. Макеєва, Я.В. Фролов // Наука і металургія: II Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених. - Дніпро: ІЧМ НАН України. - 2018. – С.36.

*Інші публікації:*

11. Макеєва, Г. С. Исследование деформации алюминиевой полосы, армированной стальной сеткой / Г. С. Макеєва // Молода наука. Технологія машинобудування: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих вчених / За заг. ред. С. В. Ковалевського. – Краматорськ: ДДМА, – 2016. – С. 117–119.

12. Параметры деформации при прокатке алюминиевой полосы, армированной стальной сеткой / Я.В. Фролов, А.Ю. Гридин, М.Шапер, А.С. Макеєва, М.Ю. Столбченко, А.К. Андреев, В.Д. Коваленко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – №3. – С. 57-65.

#### АНОТАЦІЯ

**Макеєва Г.С. Розробка основ технології прокатки алюмінієвих штаб з армуванням сталевію сіткою для конструкційних виробів з прогнозованими механічними властивостями – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 - Процеси та машини обробки тиском. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2018.

Дисертація спрямована на вирішення науково-технічної задачі розробки основ технології отримання алюмінієвих штаб з армуванням сталевію сіткою способом гарячої прокатки за рахунок дослідження параметрів деформації ґратки сітки, витяжки та овалізації її дротів, а також впливу цих параметрів на механічні властивості та здатність до поглинання енергії удару отриманого композиту. В роботі розроблено інженерну методикку розрахунку параметрів деформації сітки між двох алюмінієвих штаб після прокатки та експериментально досліджено вплив орієнтації армуючої сітки між шарами матриці на деформацію ґратки сітки та властивості композиту, зокрема на досягнення показників розрахункової міцності, а також на здатність композиту до поглинання енергії удару. Експериментально досліджено вплив параметрів деформації на формозміну сітки та на механічні властивості армованого композиту. Встановлено три механізми руйнування композиту під час випробування на розтягування. Встановлено, що моделювання процесу прокатки армованого композиту в середовищі програмного продукту QForm адекватно представляє результати експерименту. Досліджено вплив термічної обробки після процесів деформації на механічні властивості, а також досліджена анізотропія властивостей прокатаного композиту шляхом порівняння результатів вимірювання механічних властивостей в поздовжньому та поперечному напрямках. На основі результатів дослідження розроблено основи технології



прокатки алюмінієвих штаб армованими сталевими сітками для одержання суцільного композиту з підвищеними механічними властивостями.

Ключові слова: прокатка, алюмінієва матриця, сталева сітка, армування, розшарування композиту, механічні властивості

#### АННОТАЦИЯ

**Макеева А.С. Разработка основ технологии прокатки алюминиевых полос с армированием стальными сетками для конструкционных изделий с прогнозируемыми механическими свойствами – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением. – Национальная металлургическая академия Украины, Днепро, 2018.

Диссертация направлена на решение научно-технической задачи, которая заключается в разработке технологии получения алюминиевых полос, армированных стальной сеткой, способом горячей прокатки за счет исследования параметров деформации клетки сетки, вытяжки и овализации ее проволоки, а также влиянию этих параметров на механические свойства и способность поглощать энергию удара полученного композита. В работе проанализированы известные технологии получения армированных композитов на основе алюминиевой матрицы и обоснована актуальность создания алюминиевого армированного композита. Разработана инженерная методика расчета параметров деформации сетки между двух алюминиевых полос после прокатки и экспериментально исследовано влияние ориентации армирующей сетки между слоями матрицы на деформацию ячейки сетки и свойства композита, в частности на достижение показателей расчетной прочности, а также на способность композита к поглощению энергии удара. Экспериментально исследовано влияние параметров деформации на формоизменение сетки и механические свойства армированного композита. Установлены три механизма разрушения композита в процессе испытаний на растяжение. Установлено, что моделирование процесса прокатки армированного композита в среде программного продукта QForm адекватно представляет результаты эксперимента. Исследовано влияние термической обработки после процессов пластической деформации на свойства композита, а также исследована анизотропия свойств прокатанного композита путем сравнения результатов измерения механических свойств в продольном и поперечном направлениях. На основании результатов исследований разработаны основы технологии прокатки алюминиевых полос, армированных стальными сетками, для получения однородного композита с повышенными механическими свойствами.

Ключевые слова: прокатка, алюминиевая матрица, стальная сетка, армирование, расслоение композита, механические свойства

## ABSTRACT

**Makeieva H. Development of the technology fundamentals of rolling aluminum strips with steel net reinforcement for structural products with predicted mechanical properties**

Thesis for the candidate degree (Doctor of Philosophy) in engineering sciences by specialty 05.03.05 «Processes and machines of metal forming». – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

This thesis focuses on solving the scientific and technical problem, which is in the development of the technology of obtaining the aluminum composite reinforced with steel netting with the method of hot rolling by analysis of strain parameters of net cell elongation, wire elongation and wire ovalisation as well as the influence of these parameters on the mechanical properties and ability to absorb impact energy of the obtained composite. The well-known technologies of obtaining reinforced composites based on aluminum matrix were analyzed in this work, and the relevance of the reinforced aluminum composite creation was substantiated. The engineering method of calculating the strain parameters of the net between two aluminum strips after rolling was developed and the influence of the orientation of the reinforcing net between the layers of the matrix on the net cell deformation and the composite properties and the effect of reinforcement on the properties of the composite, in particular, on the achievement of calculated strengths, as well as on the ability of the composite to absorb the impact energy was experimentally investigated. The influence of the strain parameters on the net shape changes and on the mechanical properties of the reinforced composite was experimentally investigated. Three mechanisms of composite fractures were established during the tensile test. It was established that the simulation of the rolling process of the reinforced composite within the QForm software adequately represents the results of the experiment. The dependences of the reinforcing steel net deformation located between the aluminum strips, namely the lengthening of the entire composite, the transformation of the net cell, the lengthening and ovalization of the wire on the deformation degree during rolling, were established.

The influence of thermal treatment after deformation processes on the properties of the composite and the anisotropy of the properties of the rolled composite compared with the results of mechanical properties measurements in the longitudinal and transverse directions were studied. Based on the results of the study, the technology foundations of rolling aluminum stripes with reinforced steel netting were developed to obtain a solid composite with increased mechanical properties.

The results of the research were transferred for use to PrJSC Dniprovsky plant “ALYUMASH” and in the educational process at the Paderborn University and at the National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Keywords:** rolling, aluminum matrix, steel net, reinforcement, delamination, mechanical properties